

ConLam - Et beregningsprogram for  
dimensjonering av betongbjelker med  
utenpåliggende, pålimt  
karbonfiberforsterkning

**Eivind Arne R Kvinge**  
**Espen Randen**

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)  
Innlevert: juni 2015  
Hovedveileder: Terje Kanstad, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk





## MASTEROPPGAVE 2015

FAGOMRÅDE: Konstruksjonsteknikk	DATO: 06.06.2015	ANTALL SIDER: 122 + 208 + minnepinne
------------------------------------	---------------------	---

TITTEL:

**ConLam – Et beregningsprogram for dimensjonering av betongbjelker med utenpåliggende, pålimt karbonfiberforsterkning**

ConLam - A calculation program for design of concrete beams with externally bonded carbon fibre reinforcement

UTFØRT AV:



Eivind Arne R. Kvinge



Espen Randen

SAMMENDRAG:

Oppgaven omhandler forsterkning av armerte betongkonstruksjoner med utenpåliggende, pålimt karbonfiberkomposit. I dette arbeidet er det utviklet et beregningsprogram til dimensjonering av bøyingsforsterkning for denne typen konstruksjoner. Programmet er laget i MS Excel med tillegget MS Visual Basic for Applications, og har fått navnet ConLam.

ConLam utfører kapasitetsberegninger i bruddgrensetilstand for tverrsnitt med og uten karbonfiberforsterkning, samt beregninger i bruksgrensetilstand for forsterket tverrsnitt. I bruksgrense beregnes kapasiteter knyttet til karakteristiske- og tilnærmet permanente lastkombinasjoner, samt tverrsnittets bøyestivhet. Programmet inkluderer både slakkarmering i strekk og trykk, aksialkraft og spennarmering, i tillegg til forsterkningsmaterialet. Betongbidraget i kapasitetsberegningene blir inkludert ved hjelp av lamellmetoden.

Testing av programmet er utført opp mot eksempler og teori fra relevant faglitteratur, i tillegg til at det er sammenlignet med et lignende beregningsprogram fra Sika. Resultat fra testene viser lite avvik, noe som verifiserer ConLams pålitelighet. I tillegg fremkommer det av testene at programmet i de fleste tilfeller beregner mindre konservativt sammenlignet med test-eksemplene, og dermed gir ConLam bedre kapasitet. Konklusjonen er at beregningsprogrammet som er utviklet i denne oppgaven fungerer til sitt formål, i tillegg til at det er fleksibelt og brukervennlig.

FAGLÆRER: Terje Kanstad

VEILEDER: Terje Kanstad

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU



## Forord

Denne rapporten er det skriftlige uttrykket av et halvt års arbeid med masteroppgave ved institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU våren 2015. Masteroppgaven markerer slutten på et 2-årig sivilingeniørstudium ved NTNU, og samtidig et 5-årig utdanningsløp, for begge rapportens forfattere; Eivind Arne Rettedal Kvinge og Espen Randen. Oppgaven omhandler forsterkning av armerte betongkonstruksjoner med utenpåliggende, pålimt karbonfiber-kompositt. I dette arbeidet er det utviklet et beregningsprogram til dimensjonering av bøyingsforsterkning for denne typen konstruksjoner. Denne rapporten dreier seg i stor grad om dette programmet, som har fått navnet ConLam.

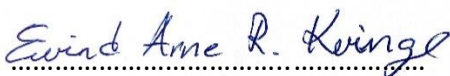
Karbonfiberforsterkning av betongkonstruksjoner er aktuelt og fremtidsrettet, samtidig som det gjenstår noe arbeid med konseptet for at bruken skal eskalere i en konservativ bransje. En fristende kombinasjon av muligheter og utfordringer som gjorde valg av oppgave enkelt. Videre ønsket forfatterne å sette sine opparbeidede teoretiske kunnskaper i bruk samt å gjøre noe uprøvd; å lage et beregningsprogram.

Arbeidet med emnet generelt og programmet spesielt har gitt verdifull erfaring i prosjektarbeid, og dypere innsikt i materialenes oppførsel, beregningsmetoder og ikke minst programmering. Prosessen med utvikling av programmet har vært lærerik og utfordrende, og har gitt oss den mestringsfølelsen vi søkte.

Vi vil rette en stor takk til professor Terje Kanstad for uvurderlig god veiledning, han har utvist tålmodighet når vi har manglet kunnskaper. Videre vil vi takke Per Rismark og Sika Norge for tilgang på programvare og nyttig informasjon, samt Rune Kirkestuen og Sto Norge for tilgang til nyttig faglitteratur. Takk til Thomas Blanksvärd og Björn Täljsten ved Luleå Tekniska Universitet for svar på spørsmål omkring emnet, og takk til Kjetil Stavenjord i Omega for råd og tips i forbindelse med programmering. En takk sendes også til Nicolas Bakkebø og Sondre Larssen for bidrag til testing av ConLam. Til slutt vil vi rette en takk til hverandre for godt samarbeid.

NTNU, Trondheim

06.06.2015



Eivind Arne R. Kvinge



Espen Randen





# Innhold

<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>2 TEORI</b> .....	<b>2</b>
2.1 KARBONFIBER SOM BYGNINGSMATERIALE .....	2
2.1.1 <i>Historie</i> .....	2
2.1.2 <i>Produktkategorier</i> .....	3
2.1.3 <i>Effekter av pålimt fiberforsterkning</i> .....	8
2.1.4 <i>Utfordringer knyttet til pålimt fiberforsterkning</i> .....	14
2.2 MATERIAL OG DIMENSJONERING .....	15
2.2.1 <i>Karbonfiber</i> .....	15
2.2.2 <i>Betong</i> .....	19
2.2.3 <i>Slakkarmering</i> .....	21
2.2.4 <i>Spennarmering</i> .....	24
2.2.5 <i>Bindemiddel for FRP-forsterkning</i> .....	26
2.2.6 <i>Dimensjonering og sikkerhet</i> .....	27
2.3 UTFØRELSE AV PÅLIMT FIBERFORSTERKNING .....	29
2.3.1 <i>Før forsterkning</i> .....	29
2.3.2 <i>Under forsterkning</i> .....	30
2.3.3 <i>Etter forsterkning</i> .....	30
2.3.4 <i>Generelt</i> .....	31
2.4 BEREGNINGSPROGRAM FOR KARBONFIBERFORSTERKNING .....	33
2.5 LAMELLETODEN .....	35
<b>3 CONLAM – BEREGNINGSPROGRAM</b> .....	<b>39</b>
3.1 BRUKERGRENSENITT .....	40
3.1.1 <i>Oppstart</i> .....	40
3.1.2 <i>Input uforsterket tverrsnitt</i> .....	42
3.1.3 <i>Beregning og resultat for uforsterket tverrsnitt</i> .....	48
3.1.4 <i>Input forsterket tverrsnitt</i> .....	52
3.1.5 <i>Beregning og resultat for forsterket tverrsnitt</i> .....	53
3.1.6 <i>Utskrift</i> .....	57
3.2 PROGRAMMETS VIRKEMÅTE .....	58
3.2.1 <i>Generell virkemåte</i> .....	58
3.2.2 <i>Beskrivelse av en sub-prosedyre</i> .....	66
3.3 BEGRENSNINGER.....	81
3.4 VIDEREUTVIKLING OG FORBEDRING .....	84
<b>4 TESTING OG DISKUSJON</b> .....	<b>86</b>
4.1 GENERELT.....	86
4.2 TEST 1: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK.....	87
4.3 TEST 2: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK.....	88



4.4	TEST 3: T-TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK.....	89
4.5	TEST 4: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SPENNARMERING, OG SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK .....	91
4.6	TEST 5: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK, MED NORMALKRAFT .....	93
4.7	TEST 6: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG FRP-FORSTERKNING .....	95
4.8	TEST 7: T-TVERRSNITT – SPENNARMERING OG FRP-FORSTERKNING .....	96
4.9	TEST 8: T-TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG CFRP-FORSTERKNING .....	97
4.10	TEST 9: T-TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG CFRP-FORSTERKNING, SPENNINGSBEGRENSNING I BRUKSGRENSETILSTAND .....	99
4.11	TEST 10: BØYESTIVHET FOR CFRP-FORSTERKET TVERRSNITT MED SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK .	100
4.12	TEST 11: SIKA CARBODUR BEREGNINGSPROGRAM VERSUS CONLAM .....	101
4.13	OPPSUMMERING .....	106
<b>5</b>	<b>KONKLUSJON .....</b>	<b>107</b>
<b>6</b>	<b>REFERANSER .....</b>	<b>108</b>
<b>7</b>	<b>VEDLEGG.....</b>	<b>111</b>

## Figuroversikt

FIGUR 1: ULIK CFRP-FORSTERKNING OG RESULTATER AV TESTING (MOHAMMAD OG AL-SULAYFANI 2013).	12
FIGUR 2: SPENNING-TØYINGSFORLØP FOR EN-AKSIAL STREKK PÅ ULIKE FRP-MATERIALER OG STÅL	16
FIGUR 3: SPENNING-TØYINGSFORLØP CFRP-MATERIALE FRA CONLAM.	18
FIGUR 4: IDEALISERT SPENNING-TØYNINGSKURVE FOR BETONG UNDER TRYKK, HENTET FRA EC2, FIGUR 3.3.	19
FIGUR 5: SPENNING-TØYINGSFORLØP C45/55-BETONG FRA CONLAM.	20
FIGUR 6: BI-LINEÆR SPENNING-TØYNINGSSAMMENHENG. EC2, FIGUR 3.4.	21
FIGUR 7: SPENNING-TØYNINGSSAMMENHENG FOR TYPISK ARMERINGSSTÅL, VARMVALSET.	22
FIGUR 8: IDEALISERT OG DIMENSJONERENDE SPENNING-TØYNINGSSAMMENHENG FOR ARMERINGSSTÅL (STREKK OG TRYKK).	22
FIGUR 9: SPENNING-TØYINGSFORLØP ARMERINGSSTÅL FRA CONLAM.	23
FIGUR 10: SPENNING-TØYINGSFORLØP FOR TYPISK SPENNSTÅL I STREKK. HENTET FRA EC2, FIGUR 3.9.	24
FIGUR 11: IDEALISERT OG DIMENSJONERENDE SPENNING-TØYNINGSSAMMENHENG FOR SPENNSTÅL (STREKK), HENTET FRA EC2, FIGUR 3.10.	25
FIGUR 12: SPENNING-TØYINGSFORLØP SPENNSTÅL FRA CONLAM.	26
FIGUR 13: SAMMENHENG LAST-NEDBØYNING, FORSKJELLER MELLOM UFORSTERKET, OG FORSTERKET UTEN OG MED FORSPENNING. HENTET 22.MAI 2015 FRA: <a href="http://usa.sika.com/dms/getdocument.get/e60fbed3-ff04-3135-9d6e-4f39f5c517e1/bro-tcforSikaCarboDurStructuralStrengtheningSystems-US.pdf">HTTP://USA.SIKA.COM/DMS/GETDOCUMENT.GET/E60FBED3-FF04-3135-9D6E-4F39F5C517E1/BRO-TCFORSIKACARBODURSTRUCTURALSTRENGTHENINGSYSTEMS-US.PDF</a>	30
FIGUR 14: BESKRIVELSE AV FORSTERKNINGSPROSESSEN (TÅLJSTEN, BLANKSVÅRD, OG SAS 2011, 102).	32
FIGUR 15: ILLUSTRASJON FRA SIKA CARBODUR BEREGNINGSPROGRAM (SIKA NORGE 2014).	33
FIGUR 16: ILLUSTRASJON FRA CONLAM BEREGNINGSPROGRAM.	34
FIGUR 17: LAMELLMETODENS FORENKLING AV BETONGENS TØYNINGER, SPENNINGER OG TVERRSNITTSKREFTER.	36
FIGUR 18: MOMENT-KRUMNINGSDIAGRAM FRA CONLAM.	38
FIGUR 19: ILLUSTRASJON FRA CONLAM BEREGNINGSPROGRAM.	39
FIGUR 20: SAMHANDLING MELLOM EXCEL OG VBA.	39
FIGUR 21: INPUT AV TVERRSNITTSTYPER OG -MÅL I CONLAM.	42
FIGUR 22: T-TVERRSNITT MED VARIERENDE TYKKELSE OG BREDDE I CONLAM.	43
FIGUR 23: INPUT AV OVERDEKNING OG AVSTANDER MELLOM ARMERINGSLAG I CONLAM.	44
FIGUR 24: INPUT AV ARMERINGSSTÅL I CONLAM.	44
FIGUR 25: TVERRSNITT MED INNLAGT ARMERING I CONLAM.	45
FIGUR 26: VALG AV BETONGKVALITET I CONLAM.	45
FIGUR 27: MATERIEGENSKAPER BETONG FRA CONLAM.	46
FIGUR 28: MATERIEGENSKAPER ARMERINGSSTÅL FRA CONLAM.	46
FIGUR 29: MATERIEGENSKAPER SPENNSTÅL FRA CONLAM.	47
FIGUR 30: VALG AV ANTALL LAMELLER I CONLAM.	47
FIGUR 31: YTRE AKSIALKRAFT I CONLAM.	48
FIGUR 32: EKSEMPEL PÅ RESULTATER FRA BEREGNING AV UFORSTERKET TVERRSNITT I CONLAM.	49
FIGUR 33: INITIALMOMENT I CONLAM.	52
FIGUR 34: MATERIEGENSKAPER FORSTERKNING FRA CONLAM.	53
FIGUR 35: RESULTAT AV BEREGNING INITIALTØYNING I CONLAM.	53
FIGUR 36: EKSEMPEL PÅ RESULTATER FRA BEREGNING AV TVERRSNITT MED FORSTERKNING I CONLAM.	54
FIGUR 37: INPUT TIL BEREGNING AV BØYESTIVHET I CONLAM.	57
FIGUR 38: RESULTAT FRA BEREGNING AV BØYESTIVHET I CONLAM.	57
FIGUR 39: MODULER.	58
FIGUR 40: MODUL OG SUB-PROSEDYRE	58
FIGUR 41: BEREGNING AV UFORSTERKET TVERRSNITT	59
FIGUR 42: BEREGNING AV TØYNING I UNDERKANT TVERRSNITT VED PÅFØRING AV FORSTERKNINGSMATERIALE	60

FIGUR 43: BEREGNING AV FORSTERKET TVERRSNITT .....	61
FIGUR 44: BEREGNING AV KARAKTERISTISK OG TILNÆRMET PERMANENT MOMENTKAPASITET (SLS).....	62
FIGUR 45: BEREGNING AV BØYESTIVHET FOR FORSTERKET TVERRSNITT .....	63
FIGUR 46: BEREGNINGSGANG FOR UFORSTERKET TVERRSNITT PÅKJENT AV AKSIALKRAFT .....	64
FIGUR 47: BEREGNINGSGANG FOR FORSTERKET TVERRSNITT .....	64
FIGUR 48: SAMMENHENG MELLOM FIGUR 41 OG FIGUR 42.....	65
FIGUR 49: SAMMENHENG MELLOM FIGUR 42 OG FIGUR 43, SAMT FIGUR 42 OG FIGUR 44 .....	65
FIGUR 50: SAMMENHENG MELLOM FIGUR 43 OG FIGUR 45 .....	65
FIGUR 51: LAMELLMETODEN – HER SAMMENFALLER TP BETONG OG N.A. ....	68
FIGUR 52: FØRSTE ITERASJON. ....	70
FIGUR 53: ANDRE ITERASJON, TØYNING I UNDERKANT ØKER. ....	70
FIGUR 54: TREDJE ITERASJON, TØYNINGSGRENSE OVERSTIGES. ....	70
FIGUR 55: FJERDE ITERASJON, TØYNING I UNDERKANT REDUSERES, STOPPER PÅ TØYNINGSGRENSE. ....	70
FIGUR 56: MOMENT-KRUMNINGSDIAGRAM. ....	71
FIGUR 57: SUM AV KREFTER .....	75
FIGUR 58: TØYNING UNDERKANT TVERRSNITT .....	79
FIGUR 59: NÆRBILDE AV FIGUR 58 .....	79
FIGUR 60: FLYTSKIEMA OVER SUB «ITERASJON_FORSTERKET_REKTANGEL».....	80
FIGUR 61: GRENSETILFELLE AV TØYNINGSTILSTAND FOR TRYKKBELASTET TVERRSNITT.....	81
FIGUR 62: I-BJELKE OG DOBBEL L-BJELKE.....	84

## Bildeoversikt

BILDE 1: ELGSETER BRU, TRONDHEIM. DENNE BRUEN ER FORSTERKET MED CFRP. ....	3
BILDE 2: STANGARMERING AV GFRP, FLOODWAY BRIDGE I MANITOBA, CANADA (BUSEL 2012). ....	4
BILDE 3: FIBERLINE-BRUEN, KOLDING, DANMARK. ....	5
BILDE 4: ILLUSTRASJON AV KONSEPTET MED FRP-BUER I NEAL BRIGDE. ....	6
BILDE 5: EKSEMPEL PÅ BRUKSOMRÅDER AV UTENPÅLIGGENDE CFRP-FORSTERKNING (TÄLJSTEN 2003, 19). ....	8
BILDE 6: BRUK AV CFRP TIL MOMENT-FORSTERKNING AV BJELKE (SIKA 2014A).....	9
BILDE 7: BRUK AV CFRP TIL SKJÆR-FORSTERKNING AV BJELKE (SIKA 2014A). ....	9
BILDE 8: SKJÆRFORSTERKNING AV BETONGBJELKE MED CFRP (FIB 2001). ....	9
BILDE 9: SKJÆRBRUDD I SØYLE (VENSTRE) OG PÅLEGGING AV CFRP-FORSTERKNING PÅ SØYLER (HØYRE).....	10
BILDE 10: SØYLER FORSTERKET MED SIKAWRAP, CFRP (SIKA 2014B). ....	11
BILDE 11: CFRP-FORSTERKNING AV BJELKE-SØYLE FORBINDELSE. ....	12
BILDE 12: ØDELEGGELSER ETTER JORDSKJELV I ALGERIE I 2003. ....	13
BILDE 13: SKIEMA FOR KVALITETSSIKRING VED FORSTERKNING MED SIKA CARBODUR SYSTEM. ....	31
BILDE 14: FORUTSETNINGER VED BESTEMMELSE AV MOMENTKAPASITET, HENTET FRA EC2, 6.1(2).....	35
BILDE 15: SIKKERHETSADVARSEL VED OPPSTART AV CONLAM. ....	40

## Tabelloversikt

TABELL 1: MATERIALEGENSKAPER TIL ULIKE FIBRE SAMMENLIGNET MED ARMERINGSSTÅL .....	15
TABELL 2: MATERIALEGENSKAPER CFRP-PRODUKT .....	17
TABELL 3: VERDIEN AV K FOR STANGARMERING OG STENGER FRA KVEIL.....	23
TABELL 4: MATERIALEGENSKAPER, FESTEMIDDEL .....	26
TABELL 5: SIKKERHETSFAKTORER FOR PÅLIMT FORSTERKNING FOR ULIKE DIMENSJONERENDE SITUASJONER.....	28
TABELL 6: SAMMENLIGNING MELLOM LAMELLMETODEN OG SPENNINGSBLOKK. ....	38
TABELL 7: OVERSIKT OVER DE ULIKE ARKENE I CONLAM .....	41
TABELL 8: RESULTATER FRA STEG I DEN ITERATIVE BEREGNINGEN AV UFORSTERKET TVERRSNITT I CONLAM.....	51
TABELL 9: RESULTATER FRA STEG I DEN ITERATIVE BEREGNINGEN AV TVERRSNITT MED FORSTERKNING I CONLAM. ....	56
TABELL 10: EKSEMPLER PÅ DATATYPER I VBA. ....	66
TABELL 11: TEST 1-1 – RESULTAT, UNDERARMERT TVERRSNITT.....	87
TABELL 12: TEST 1-2 – RESULTAT, NORMALARMERT TVERRSNITT. ....	87
TABELL 13: TEST 1-3 – RESULTAT, OVERARMERT TVERRSNITT.....	87
TABELL 14: TEST 2 – RESULTAT, REKTANGULÆRT TVERRSNITT MED SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK.....	88
TABELL 15: TEST 3 – RESULTAT, SAMMENLIGNING MED BEREGNINGSEKSEMPEL I SØRENSEN (2010). ....	89
TABELL 16: TEST 3 – RESULTAT, SAMMENLIGNING MED BEREGNINGSPROGRAM, BAKKEBØ OG LARSEN (2015). ....	89
TABELL 17: TEST 4-1 – RESULTAT, KUN SPENNARMERING. ....	91
TABELL 18: TEST 4-2 – RESULTAT, SPENNARMERING OG SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK. ....	91
TABELL 19: TEST 4-1 – RESULTAT, KUN SPENNARMERING, BRUDDGRENSEN PÅ 30 %. ....	92
TABELL 20: TEST 4-2 – RESULTAT, SPENNARMERING OG SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK, BRUDDGRENSE 30 %. ....	92
TABELL 21: TEST 5-1 – RESULTAT, TRYKKBRUDD I BETONG .....	93
TABELL 22: TEST 5-2 – RESULTAT, TRYKKBRUDD I BETONG OG FLYTNING I STREKKARMERING.....	93
TABELL 23: TEST 5-3 – RESULTAT, TRYKKBRUDD I BETONG OG DOBBEL FLYTETØYNING I STREKKARMERING (NORMALARMERT). .....	94
TABELL 24: TEST 5-4 – RESULTAT, TRYKKBRUDD I BETONG OG STOR TØYNING I STREKKARMERING.....	94
TABELL 25: TEST 6 – RESULTAT. ....	95
TABELL 26: TEST 7 – RESULTAT. ....	96
TABELL 27: TEST 8 – RESULTAT, SAMMENLIGNING MED BEREGNINGSEKSEMPEL I SØRENSEN (2010). ....	97
TABELL 28: TEST 8 – RESULTAT, SAMMENLIGNING MED BEREGNINGSPROGRAM, BAKKEBØ OG LARSEN.....	97
TABELL 29: TEST 9 – RESULTAT .....	99
TABELL 30: TEST 10-1 OG 10-2 – RESULTAT .....	100
TABELL 31: TEST 11-1 – RESULTAT, KAPASITETSBEREGNING I ULS, REKTANGULÆRT TVERRSNITT MED SLAKKARMERING I STREKK.....	101
TABELL 32: TEST 11-2 – RESULTAT, KAPASITETSBEREGNING I ULS, REKTANGULÆRT TVERRSNITT MED SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK. ....	102
TABELL 33: TEST 11-3 – RESULTAT, KAPASITETSBEREGNING I ULS, T-TVERRSNITT MED SLAKKARMERING I STREKK. ....	102
TABELL 34: TEST 11-4 – RESULTAT, KAPASITETSBEREGNING I ULS, T-TVERRSNITT MED SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK. .....	103
TABELL 35: TEST 11-5 – RESULTAT, KAPASITETSBEREGNING I SLS (T-TVERRSNITT, SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK)....	103
TABELL 36: TEST 11-6 – RESULTAT, KAPASITETSBEREGNING I ULS, DEKKESTRIPE MED SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK.	104
TABELL 37: OPPSUMMERING TESTAVVIK. ....	106

## Sammendrag

Denne oppgaven omhandler forsterkning av armerte betongkonstruksjoner med utenpåliggende, pålimt karbonfiberkomposit. I dette arbeidet er det utviklet et beregningsprogram til dimensjonering av bøyingsforsterkning for denne typen konstruksjoner. Programmet er laget i MS Excel med tillegget MS Visual Basic for Applications, og har fått navnet ConLam.

ConLam utfører kapasitetsberegninger i bruddgrensetilstand for tverrsnitt med og uten karbonfiberforsterkning, samt beregninger i bruksgrensetilstand for forsterket tverrsnitt. I bruksgrense beregnes kapasiteter knyttet til karakteristiske- og tilnærmet permanente lastkombinasjoner, samt tverrsnittets bøyestivhet. Programmet inkluderer både slakkarmering i strekk og trykk, aksialkraft og spennarmering, i tillegg til forsterkningsmaterialet. Betongen behandles med parabel-rektangulær spenning-tøyningssammenheng, og betongbidraget i kapasitetsberegningene blir inkludert ved hjelp av lamellmetoden.

Testing av programmet er utført opp mot eksempler og teori fra relevant faglitteratur og retningslinjer innenfor temaet, i tillegg til at det er sammenlignet med et lignende beregningsprogram fra Sika.

Resultat fra testene viser lite avvik, noe som verifiserer ConLams pålitelighet. I tillegg fremkommer det av testene at programmet i de fleste tilfeller beregner mindre konservativt sammenlignet med testeksemplene, og dermed gir ConLam bedre kapasitet. Konklusjonen er at beregningsprogrammet som er utviklet i denne oppgaven fungerer til sitt formål, i tillegg til at det er fleksibelt og brukervennlig.

## Abstract

This thesis discusses the aspects of reinforced concrete structures with externally bonded carbon fibre composite reinforcement. During this work, a calculation program for design of bending reinforcement for this type of structures there has been developed. The program, named ConLam, is created in MS Excel with MS Visual Basic for Applications.

ConLam performs capacity calculations in ultimate limit state for sections with and without carbon fibre reinforcement, and in service limit state of reinforced cross-sections. Capacities related to characteristic- and quasi-permanent load combinations are calculated in service limit state, as well as the bending stiffness of the cross-section. The program includes both reinforcement bars in tension and compression, axial loads and prestressed reinforcement, as well as the fibre reinforcement. The concrete is treated with a parabolic-rectangular stress-strain relation, and the contribution of the concrete in capacity calculations is included by using the Multi Layer Method (Norwegian: Lamellmetoden).

Testing of the program is performed by comparing results against examples and theory from relevant literature and guidelines on the topic. In addition, the program is tested against a similar calculation program delivered by Sika.

Test results show little deviation, which verifies ConLam's reliability. Evidence from testing implies calculations in the program are less conservative compared with the test examples in most cases, and thereby ConLam gives better capacity. As a result, the thesis concludes that the calculation program developed serves its purpose whilst maintaining a high degree of tractability.

## 1 Innledning

Utenpåliggende forsterkning av eksisterende betongkonstruksjoner har vært aktuelt siden 1960-tallet. Den gangen var stål det mest brukte materialet, men siden 1980-tallet har forsterkning med materialer av fiberkompositt, FRP (Fiber Reinforced Polymer), blitt benyttet i økende grad. Bruken av pålimt karbonfiberforsterkning (CFRP – Carbon Fibre Reinforced Polymer) har blitt mye benyttet til forsterkning og reparasjon av betongkonstruksjoner i utlandet, og økt bruk forventes også i Norge.

Denne oppgaven omhandler utvikling av et beregningsprogram, ConLam, for bruk ved dimensjonering av CFRP-forsterkede betongkonstruksjoner. Målet har vært å utvikle et program som kan sammenlignes med tilsvarende dimensjoneringsprogrammer på markedet. Videre har det vært et mål å få inkludert aksialkraft og spennarmering i beregningene, samt å utvikle et fleksibelt og brukervennlig program.

Oppgaven er delt opp i fem deler. Etter innledningen (kapittel 1) blir bakgrunnsteorien som er benyttet i oppgaven presentert (kapittel 2). Her får leseren et innsyn i karbonfiber som bygningmateriale, samt at det blir presentert materialmodeller som er lagt til grunn i utarbeidelsen av programmet, og viktige faktorer ved dimensjonering av CFRP-forsterkede betongkonstruksjoner. Det blir også presentert hva som finnes av beregningsprogrammer til dette formålet per i dag, i tillegg til at lamellmetoden blir beskrevet. Etter bakgrunnsteorien blir selve beregningsprogrammet beskrevet (kapittel 3). Her blir først brukergrensesnittet presentert, i form av en tilnærmet brukerhåndbok, før det blir gitt en detaljert innføring i programmets virkemåte. I kapittel 4 blir ulike tester av programmet presentert og diskutert, før det til slutt blir presentert en konklusjon i (kapittel 5) på arbeidet som er utført.

## 2 Teori

### 2.1 Karbonfiber som bygningsmateriale

#### 2.1.1 Historie

Oppgradering av eksisterende infrastruktur har dukket opp som en av de store byggeaktivitetene over hele verden i den senere tid, og årsakene til dette er forskjellige. Standarder for dimensjonering blir stadig oppgradert med nye lastkrav som krever høyere styrke på konstruksjonselementene. Miljøpåvirkninger forringer eksisterende konstruksjoner med tiden på grunn av korrosjon av armering, karbonatisering, frost og tining. I tillegg er det mange eldre betongkonstruksjoner som ikke oppfyller dagens dimensjoneringskrav knyttet til jordskjelv (Adhikary og Mutsuyoshi 2006, 366). Dårlig byggekvalitet og utilstrekkelig dimensjonering kan også være årsaken til dette behovet (Pendhari, Kant, og Desai 2008, 115).

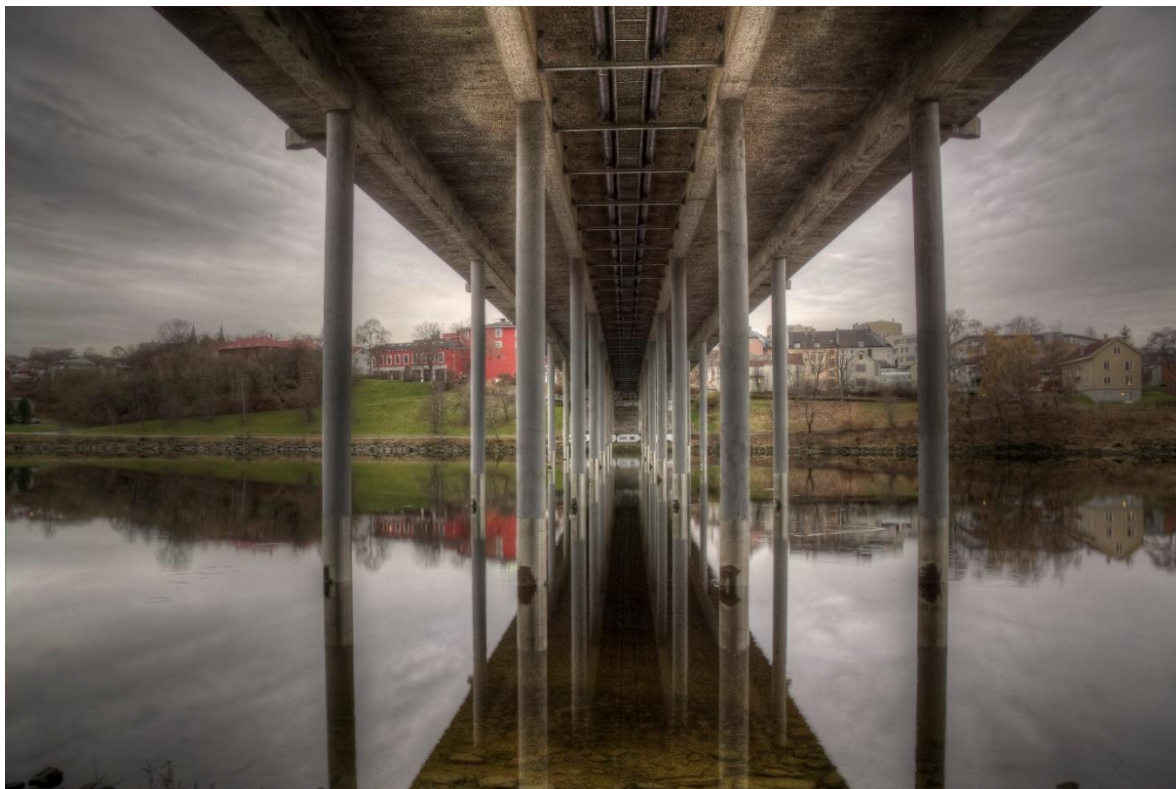
Denne nødvendige oppgraderingen har ført til et økende behov for nye metoder for reparasjon, oppgradering og forsterkning. Fra midten av 1960-årene har mange land benyttet utenpåliggende plater, skiver eller stag til forsterkning av betongkonstruksjoner. Stål har vært det mest brukte materialet til dette formålet, men på 1990-tallet ble forsterkning med pålimte plater eller bånd av komposittmaterialer en akseptert forsterkningsmetode (Thorenfeldt et al. 2006, ii).

Bruk av fibre til å forsterke sprø materialer kan dateres tilbake til de egyptiske og babylonske epoker, om ikke tidligere. Eksempler på tidlig bruk av fibre er blant annet bruk av strå til forsterkning av murstein utsatt for sterkt sollys og vegger på hytter bygd av gjørme, hestehår til forsterkning av gips, og asbestfibre til å forsterke Portland-sementmørtel (Nawy 2008, 22-2). Fra rundt 1960 har avanserte komposittmaterialer blitt brukt mye innenfor romfart, fly-, båt- og bilindustrien, og i senere tid har ingeniører og byggebransjen begynt å innse potensialet i kompositter som forsterkningsmateriale for mange problemer forbundet med forringelse av infrastruktur. På grunn av sine gode tekniske egenskaper har det vært en økning i anvendelsen av FRP i byggebransjen siden midten av 1990-tallet (Pendhari, Kant, og Desai 2008, 114).

Historisk ble utenpåliggende forsterkning med FRP først brukt som materiale for bøyemomentforsterkning på armerte betongbruer, og som omsluttingsforsterkning av armerte betongsøyler på 80-tallet. Utviklingen siden den første forskningen på midten av 80-tallet har vært enorm (Bakis et al. 2002, 81). På begynnelsen av 1990-tallet begynte man å forske på dette i Norden, og første anvendelse ble gjort i Sverige i 1996 (Thorenfeldt et al. 2006, 32)

De vanligste typene av FRP er laget av glass, aramid (kevlar) eller karbon (Thorenfeldt et al. 2006, ii). Karbonfiberarmerte kompositter, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers), er kanskje den mest egnede kompositten av disse, til bruk innen forsterkning av betongkonstruksjoner til byggeformål (Vetlesen 2009, 1).





Bilde 1: Elgseter bru, Trondheim. Denne bruene er forsterket med CFRP.

Hentet 19.mai 2015 fra: <https://nordicpictures.files.wordpress.com/2014/03/elgesether.jpg>

### 2.1.2 Produktkategorier

Det er flere årsaker til at kompositter benyttes i økende grad til utbedring og forsterkning av betongkonstruksjoner; svært høy styrke i strekk, lav egenvekt, skreddersydd stivhet til det enkelte prosjekt, stor deformasjonskapasitet, ingen korrosjon og nesten ubegrenset tilgjengelighet i geometri og dimensjoner av fiberarmerte polymerer (FIB 2001, 2). I tillegg har større kunnskap i bygningsindustrien om hvordan FRP-materialer kan benyttes, sammen med en positiv utvikling på produktkostnadene for brukeren, ført til økt bruk. Dette har videre ført til at flere ulike produkt har funnet sin plass på markedet. Når det gjelder kompositter innen bygningsindustrien har det kommet en mengde produkter til mange forskjellige anvendelsesområder. Med god kunnskap og et bredt produktutvalg er det derfor en vurdering mellom kostnad og funksjon om FRP-kompositt skal velges framfor tradisjonelle produkter (Thorenfeldt et al. 2006). FRP-produkter for bygningsindustrien kan deles inn i følgende kategorier (ibid. 20-21):

- Slakkarmering i betong
- Spennarmering og strekkstag i betong
- Nye konstruksjoner laget av komposittmateriale
- Forsterkning av konstruksjoner med pålimt fiberforsterkning

Alle de fire kategoriene blir presentert i dette delkapittelet, men videre i oppgaven er det kun forsterkning av konstruksjoner med pålimt fiberforsterkning som blir behandlet.

### Slakkarmering

Et aktuelt bruksområde for fiberarmerte polymerer er slakkarmering i betong. Armeringen kan ha form som stenger eller armeringsnett tilsvarende tradisjonelle armeringsformer. FRP-materialet virker da som en erstatning for tradisjonell stålarmering, og kan i likhet med stål produseres i forskjellige diametere. Aramid- glass- og karbonfiber er de vanligste fibertypene til denne anvendelsen, der glassfiber er mest brukt (Thorenfeldt et al. 2006, 21, Sto Norge 2006, 3). FRP-armering har minst like bra heft til betong som stålarmering. Overflaten til armeringsstengene kan være deformert, rett, rett og tilsandet, flettet og tilsandet, eller spiralformet (Newhook og Svecova 2007, 4.5).

Det finnes fortsatt ikke noen standardiserte produksjonsmetoder eller materialegenskaper for FRP-armering. Dette er en fordel for rådgivende konsulenter fordi det muliggjør at man kan tilpasse armeringens egenskaper til det enkelte bruksområdet. Produktene blir stadig endret og forbedret, derfor oppfordres man til å kontakte produsenten for å verifisere at man har de riktige egenskapene til produktet når man utfører dimensjonering med FRP-forsterkning (Newhook og Svecova 2007, 4.12).

Bruksområder der slakkarmering av FRP-materiale er godt egnet er konstruksjoner som er utsatt for salt, som brudekker, parkeringsdekker, rørgater eller betongkonstruksjoner i marine områder (Thorenfeldt et al. 2006, 21). Bilde 2 viser eksempel på bruk av FRP-stangarmering, her i form av glassfiber, i brudekke på Floodway Bridge i Manitoba, Canada. Fiberarmerte polymerer er også gunstig å bruke i konstruksjoner eller elementer der kravet til overdekning er en begrensende faktor for bruk av stål, grunnet stålets dårlige korrosjonsmotstand. Andre bruksområder er konstruksjoner som bør ha armering som ikke er elektrisk ledende eller påvirkbar av elektromagnetiske bølger, som for eksempel sykehus, antenner og fundament til elkraftgeneratorer (Thorenfeldt et al. 2006, 21).



Bilde 2: Stangarmering av GFRP, Floodway Bridge i Manitoba, Canada (Busel 2012).

### Spennarmering og strekkstag

Tilsvarende som for FRP-slakkarmering kan FRP-spennarmering bestå av materialene glass-, aramid- eller karbonfiber, der sistnevnte er den mest brukte. CFRP spennarmering er formet som stenger eller kabler (Thorenfeldt et al. 2006, 22). Kablene består av fiberelementer som er 3 til 4 millimeter i diameter og har en bruddstyrke på mellom 1866 til 2070 MPa, en styrke som er sammenlignbar med ståltrådene i kablene til tradisjonell spennarmering (Nawy 2008, 22-24). Karbonfiber er foretrukket fremfor andre komposittmaterialer grunnet gode bestandighetsegenskaper, høy strekkfasthet og stivhet (Thorenfeldt et al. 2006, 22).

Bruksområder for forspente komposittmaterialer er blant annet ulike typer strekkstag, jord- og fjellforankring, utenpåliggende kabler og som tradisjonell forspenning (Thorenfeldt et al. 2006, 22). Andre anvendelsesområder er pilarer og rullebane/flyplassdekke, men det er mest brukt til forspenning i brukonstruksjoner (Bakis et al. 2002, 80).

### Nye konstruksjoner laget av komposittmateriale

Noen bruksområder for FRP-komposittmaterialer i nye bygningskonstruksjoner er beskrevet i dette avsnittet. I flere land i Europa har det blitt bygd bruer med FRP-kompositt, både vei-, gang- og sykkelbruer. Et eksempel på dette er Skandinavias første komposittbru, Fiberline-bruen i Kolding i Danmark, som ble bygd i 1997. Bruen er vist på Bilde 3.

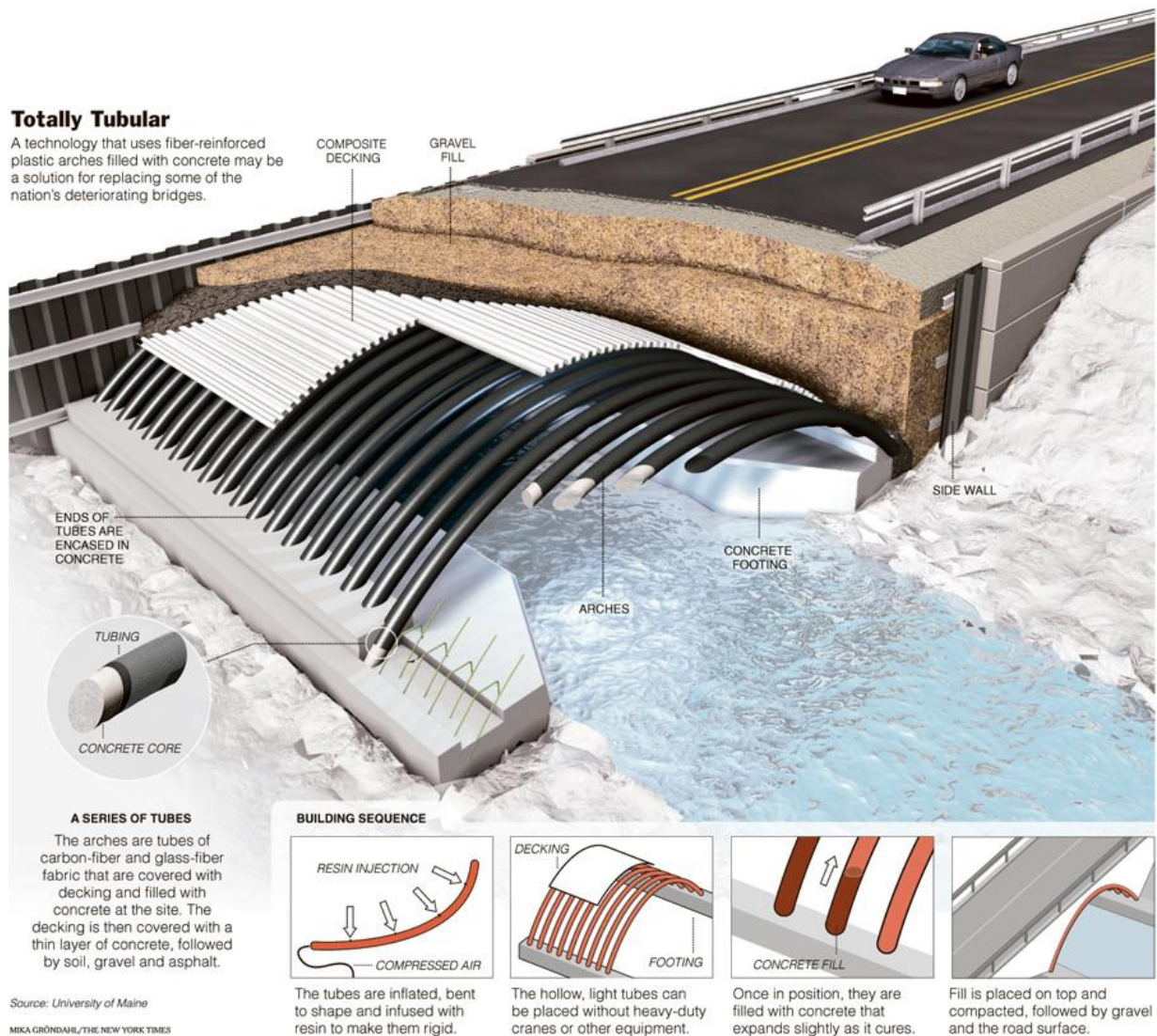


Bilde 3: Fiberline-bruen, Kolding, Danmark.

Hentet 02.juni 2015 fra: [http://fiberline.com/sites/default/files/case-stories/fiberline\\_broen\\_f82.jpg](http://fiberline.com/sites/default/files/case-stories/fiberline_broen_f82.jpg)

## 2 Teori

Neal Bridge i Pittsfield, USA, ble i 2008 verdens første bru som er blitt bygd med betongfylte FRP-buer, se Bilde 4. Dette konseptet har blitt benyttet i flere bruer i USA i ettertid.



Bilde 4: Illustrasjon av konseptet med FRP-buer i Neal Bridge.

Hentet 12.februar 2015 fra:

<http://www.nytimes.com/2009/10/13/science/13bridge.html?pagewanted=all&r=0>.

CFRP-rør til betongsøyler er også et aktuelt område for bruk av FRP i nye konstruksjoner. Dette er rør som fylles med betong og eventuelt lengdearmoring i stål, og som i tillegg til forsterkning kan benyttes som forskaling, noe som muliggjør tidsbesparelse ved montering. Effekten blir den samme som beskrevet i 2.1.3 om trykkbelastede søyle; økt styrke og duktilitet. Økt styrke gjelder kapasitet med tanke på både moment-, skjær- og aksialkraft.

Utenpåliggende CFRP kan benyttes for å lage slankere konstruksjonsdeler sammenlignet med vanlig armert betong. Dette er likevel lite brukt innenfor bygningsindustrien, da kostnadene blir relativt høye sammenlignet med alternativene.

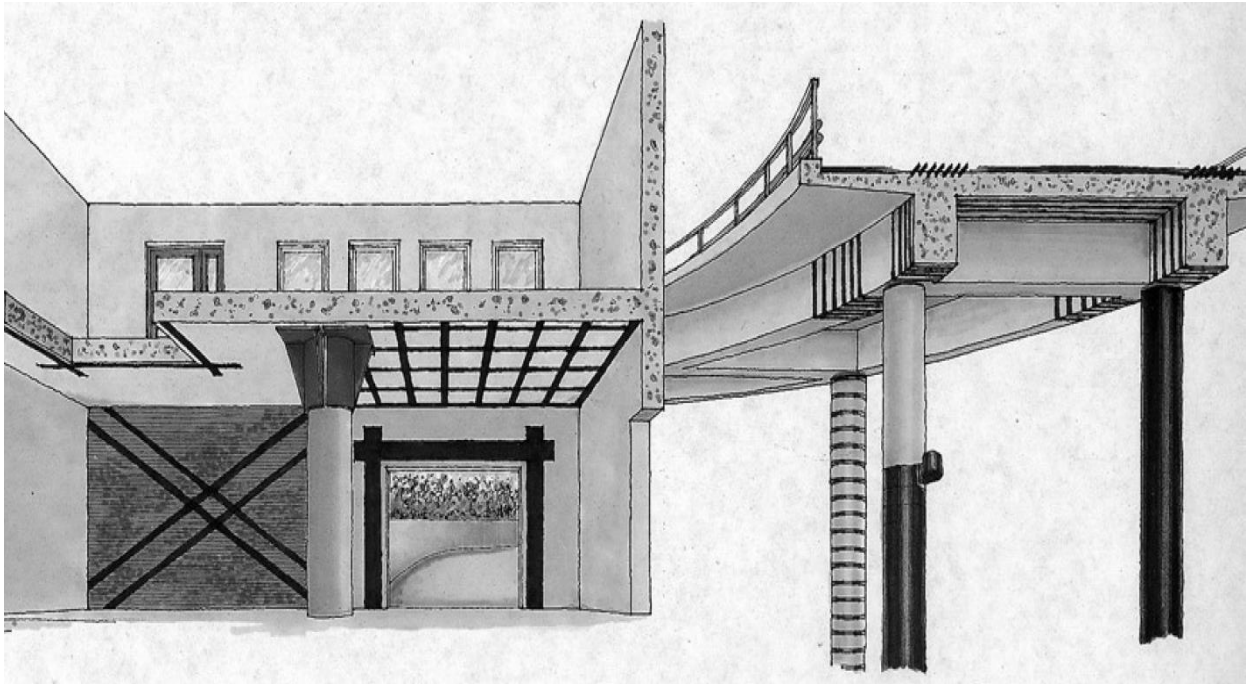
I tillegg til dette, samt stangarmering, spennarmering og strekkstag som er omtalt tidligere, kan FRP-materiale benyttes i nye bygningskonstruksjoner til for eksempel rekkverk, trapper, dører, vinduer med mer.

### **Forsterkning av konstruksjoner med pålimt fiberforsterkning**

Fiberkompositter er i utgangspunktet et relativt kostbart armeringsmateriale. Flere av bruksområdene til denne typen armering kan vise seg vanskelig å forsvare kostnadmessig, men det finnes unntak. Forsterkning, vedlikehold og reparasjon av eksisterende konstruksjoner ved bruk av FRP-armering kan vise seg kostbesparende målt mot alternativene for den enkelte konstruksjonen. Dette fordi alternativet i rehabiliterings- og modifiseringssammenheng ofte vil være å rive og bygge nytt. Tradisjonelt har det vært vanlig å benytte pålimt stål som utenpåliggende forsterkning av betongbjelker og –dekker. Egenskaper som taler til FRP-materialers fordel med tanke på forsterkning er blant annet korrosjonsmotstand og stålplatenes begrensede lengder som medfører skjøting (FIB 2001, 2). Det dominerende FRP-forsterkningsmaterialet er karbonfiber, men aramid- og glassfiber er også vanlige (Thorenfeldt et al. 2006, 22).

Det finnes flere metoder for å forsterke eksisterende konstruksjoner ved hjelp av utenpåliggende fiberkompositter, og valg av metode avhenger av flere aspekter. Hvilket konstruksjonselement som skal forsterkes og hvilke krefter/deformasjoner/skader man ønsker å forsterke mot er viktige kriterier ved valg av metode. Man kan prinsipielt skille mellom følgende metoder for utenpåliggende forsterkning med komposittmaterialer; omvikling, stenger innslipt i betongen, pålagt laminat, vev eller duk, og former eller laminat som er prefabrikkert (Thorenfeldt et al. 2006, 22).

Omvikling er en vanlig metode ved forsterkning av søyler, og man skiller mellom tørr- og våtvikling. Forskjellen er at ved tørrvikling aktiveres harpiksen i materialet med varme, mens ved våtvikling går fibrene gjennom et limbad før den vikles rundt søylen. Stenger eller profiler av FRP-materiale som limes inn i utfresede spor i ytterkant av betongen er en nyere og interessant metode. Metoden benevnes ved NSM, NSR eller NSMR av det engelske «Near Surface Mounted Reinforcement». Denne teknikken gir bedre beskyttelse av FRP-kompositten mot for eksempel mekanisk skade enn med utenpåliggende forsterkning, i tillegg til at den gir en større heftflate mot konstruksjonen. Prefabrikkerte komposittformer eller -laminat som formes etter den konstruksjonen som skal forsterkes er en annen metode for utenpåliggende forsterkning. Forsterkning med laminat, vev eller duk er vanlige og mye anvendte metoder. Laminat benyttes på plane overflater som søyler, vegger og bjelkelag, mens vev eller duk er mer fleksibel og smidig metode som er godt egnet på krumme flater.



Bilde 5: Eksempel på bruksområder av utenpåliggende CFRP-forsterkning (Täljsten 2003, 19).

Bilde 5 viser eksempler på mulige bruksområder for utenpåliggende fiberforsterkning, som forsterkning av teglvegg, betongdekke, -søyle og -bjelke, og forsterkning ved hulltaking i dekke og vegg.

### 2.1.3 Effekter av pålimt fiberforsterkning

Bruken av pålimt karbonfiberforsterkning har som nevnt økt mye de siste ti-årene, og temaet har blitt gjenstand for mye forskning. Utviklingen knyttet til materialer, metoder og teknikker for forsterkning av konstruksjoner har vært enorm. For å få en oversikt over hvor en står per i dag, er det i dette delkapittelet presentert en oversikt over forskjellige muligheter knyttet til denne forsterkningsmetoden.

Denne oppgaven søker i utgangspunktet å presentere muligheter og utfordringer knyttet til FRP-komposittmaterialer av karbon. I dette delkapittelet er det likevel valgt å presentere resultater fra studier som også omfatter andre typer FRP-kompositter, da generell FRP-forskning angir effekter som kan være direkte overførbare til CFRP.

## Bøyemoment

Forsterkning av konstruksjoner for å øke momentkapasitet er den vanligste anvendelsesformen for FRP-forsterkning (Täljsten, Blanksvärd, og Sas 2011, 29). Bilde 6 viser eksempel på forsterkning av bjelke med utenpåliggende, pålimt CFRP.

En litteraturgjennomgang av Pendhari, Kant, og Desai (2008, 115) innenfor bruken av FRP-kompositter i byggebransjen har vist at det er mulig med nesten 40 % økning i styrke for armerte betongbjelker forsterket med GFRP (Glas Fibre Reinforced Polymere), og rundt 200 % økning med CFRP.



*Bilde 6: Bruk av CFRP til momentforsterkning av bjelke (Sika 2014a).*



*Bilde 7: Bruk av CFRP til skjærforsterkning av bjelke (Sika 2014a).*

## Skjærkraft

Bilde 7 og Bilde 8 viser eksempler på utført skjærforsterkning av bjelker med CFRP. Når det gjelder effekten av denne type forsterkning viser litteraturgjennomgangen av Pendhari, Kant, og Desai (2008, 116) at det gjennom ulike forskninger er observert at skjærstyrken til nye armerte betongbjelker kan økes med 60 til 120 % ved hjelp av FRP-vev. Vev lagt i U-form på bjelken, som vist på Bilde 8, har vist seg å være den mest effektive forsterkningen for armerte betongbjelker med omtrent 119 % økning i skjærstyrke.



*Bilde 8: Skjærforsterkning av betongbjelke med CFRP (FIB 2001).*

## 2 Teori

Skjærstyrke i søyler har blitt testet i ulike forskningssammenhenger, spesielt i forbindelse med modifisering («retrofitting») knyttet til jordskjelvdimensjonering. Resultater fra ulike tester med syklisk lateral last på armerte betongsøyler omsluttet med FRP-forsterkning, der hovedfibrene er orientert i omslutningsretningen, viste at metoden er effektiv med tanke på å øke skjærkapasiteten til søylen slik at kritisk bruddform går fra sprøtt skjærbrudd til duktilt bøyingsbrudd (Teng et al. 2003, 57). Bilde 9 viser skadene ved et typisk skjærbrudd på grunn av jordskjelvbelastning, og hvordan søyler kan skjærforsterkes med omsluttet CFRP.



Bilde 9: Skjærbrudd i søyle (venstre) og pålegging av CFRP-forsterkning på søyler (høyre).  
Hentet 12.februar 2015 fra: <http://www.umich.edu/~acemrl/NewFiles/projects/recc.html> og  
<http://www.luckett-farley.com/frp-strengthening/>

### Trykkraft

Trykkbelastede konstruksjonselementer, som for eksempel søyler, kan også forsterkes med FRP, se Bilde 10. De kan pakkes fullstendig inn i FRP eller det kan legges på bånd eller vev på deler av elementet. For å kunne øke kapasiteten med tanke på trykkraft må forsterkningen omslutte søylen. Når det gjelder effekten av FRP-forsterkning på trykkbelastede konstruksjonselementer konkluderes det i studien til Pendhari, Kant, og Desai (2008, 119) med at omslutning av betongsøyler, i form av innpakning med FRP-stoffer eller -rør, har vist seg å være svært gunstig. Med denne typen forsterkning har en oppnådd forbedring i styrke, bæreevne, energiabsorpsjon, duktilitet og stivhet, samt en forbedring av type bruddform. Hvorvidt disse forbedringene gjør seg gjeldende i ulike tilfeller er avhengig av mange faktorer, som for eksempel type, mengde og retning av omsluttet materiale, samt størrelse, form og lastbetingelser på søylen (ibid. 119).

Forsøk på trykkbelastede armerte betongsøyler utført av Thorenfeldt og Øverli (2006) viste en kapasitetsøkning på 20 % ved forsterkning med ett lag CFRP-vev og 50 % ved bruk av to lag. Det ble her brukt SikaWrap med lagtykkelse 0,13 mm. Søylen som var forsterket med CFRP fikk økt duktilitet sammenlignet med søyle uten forsterkning, som følge av økt tøyningsevne før brudd, men det er verdt å merke seg at bruddet ble mer eksplosivt.



Dette er altså en lovende metode for forsterkning og reparasjon av betongkonstruksjoner, men den er mest effektiv på sirkulære søyler. Rektangulære søyler må avrundes på hjørner for bedre effekten (Pendhari, Kant, og Desai 2008, 117).



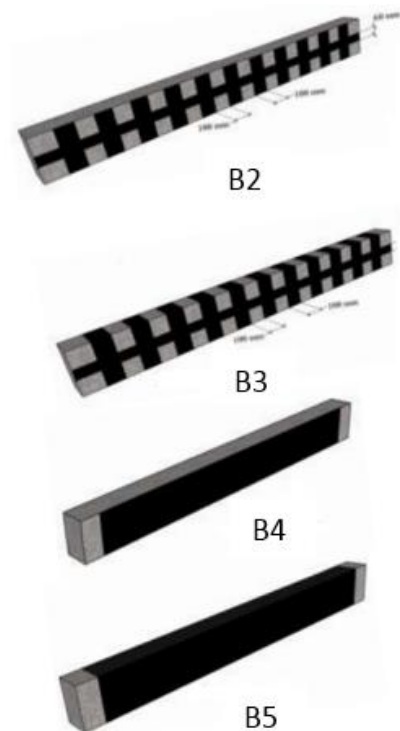
Bilde 10: Søyler forsterket med SikaWrap, CFRP (Sika 2014b).

### Torsjon

Det er ikke utført like mye forskning på forsterkning av torsjonskapasitet med FRP, sammenlignet med moment- og skjærforsterkning. Salom, Gergely, og Young (2004, 157) har i sin studie kommet frem til at torsjonskapasiteten kan økes med mer enn 70 % for betongbjelker forsterket med FRP-laminat. I denne studien ble det benyttet CFRP. Ghobarah, Ghorbel, og Chidiac (2002, 257) konkluderer også i sine forsøk med at forsterkning med CFRP (og GFRP) øker torsjonskapasiteten i betongbjelker. Videre fant de ut at bjelker som var totalt omsluttet ga bedre kapasitet enn bjelker forsterket med FRP-striper. Dette viser også resultatene i studien til Mohammad og Al-Sulayfani (2013), der de testet fem betongbjelker med ulik form for CFRP-forsterkning. Figur 1 viser hvordan bjelkene ble forsterket, og resultater fra studien. Bjelke B1 er referansebjelke uten CFRP-forsterkning.

### Ultimate Torques and Corresponding Increase Percentage and Failure Modes.

Beam No.	Ultimate Torque (kN.m)	Ultimate Torque increasing (%)	Failure Mode
B1 (Ref. beam)	8.36	----- --	Yield & Crushing
B2	10.05	20	Diagonal cracking & CFRP Debonding
B3	12.32	47	Crushing & CFRP Rupture
B4	10.63	27	Diagonal cracking & CFRP Debonding
B5	14.44	73	Crushing & CFRP Rupture



Figur 1: Ulik CFRP-forsterkning og resultater av testing (Mohammad og Al-Sulayfani 2013).

### Bjelke-søyleforbindelse

FRP kan også benyttes til forsterkning av bjelke-søyleforbindelser i betong, som vist på Bilde 11. Pendhari, Kant, og Desai (2008, 118) skriver at utenpåliggende FRP-forsterkning er en effektiv metode, som kan øke momentkapasiteten til en bjelke-søyleforbindelse med om lag 60 % og skjærkapasitet av forbindelsen med om lag 35 %. Økningen i momentkapasitet viser her til forskning utført med FRP-forsterkning i form av aramid/kevlar (AFRP), mens økningen i skjærkapasitet viser til studier knyttet til FRP-forsterkning med karbon. Pendhari, Kant, og Desai (2008, 119) konkluderer med at pålimt FRP-forsterkning er en bærekraftig løsning for å bedre karakteristikker knyttet til styrke, stivhet og energitap i bjelke-søyleforbindelser av armert betong utsatt for ordinære, samt seismiske laster. De konkluderer



Bilde 11: CFRP-forsterkning av bjelke-søyleforbindelse.

Hentet 15.februar 2015 fra:

<http://www.specifile.co.za/specifier/cement-a-concrete/897-carbon-fibre-wrap-strengthens-concrete-columns>

videre med at metoden også forbedrer skjærkapasitet, og forbedrer den generelle skadekontrollen / type bruddform. Det er likevel viktig å merke seg at oppførselen til FRP-forsterkede bjelke-søyleforbindelser er komplekse og fortsatt ikke fullstendig forstått (Pendhari, Kant, og Desai 2008, 118).

### Jordskjelv

FRP kan benyttes til både reparasjon og modifisering knyttet til seismisk belastning. Forsterkning i form av omslutning av søyler og skjærforsterkning av bjelke-søyleforbindelser er noen av metodene som er aktuelle innenfor temaet jordskjelv. Dette er presentert i de foregående avsnittene. Bilde 12 viser eksempel på hva et jordskjelv kan gjøre med betongsøylene i en bygningskonstruksjon, og på Bilde 9 kan man se skade på søyle i brukonstruksjon på grunn av jordskjelvbeklastning.

Den seismisk kapasiteten til modifiserte betongsøyler kan økes betraktelig på grunn av omslutningseffekten av FRP. Forskning har vist at denne forsterkningsteknikken bidrar til å øke forskyvningsduktilitet og styrke, samt at reparerte søyleprøver gir mindre forringelse under stor syklisk belastning enn nye søyler (Pendhari, Kant, og Desai 2008, 118).

I studier av blant annet Karayannis og Sirkelis (2008), Ghobarah og Said (2002) og Mukherjee og Joshi (2005) har testing vist at FRP-forsterkning kan forbedre skjærbruddkapasiteten, energiabsorbering og duktilitet betydelig, samt at det bidrar til å forbedre bruddformen ved å eliminere eller forsinke skjærbrudd.



Bilde 12: Ødeleggelse etter jordskjelv i Algerie i 2003.

Hentet 15. februar 2015 fra: <http://www.strutturista.com/2012/05/terremoti-storici-i-boumerdes-algeria-21-maggio-2003/>

## 2 Teori

### 2.1.4 utfordringer knyttet til pålimt fiberforsterkning

Det finnes flere faktorer som kan være utfordrende eller begrensende for bruken FRP-komposittmaterialer til forsterkning av bygningskonstruksjoner. Thorenfeldt et al. (2006, 5) lister opp de mest vanlige faktorene de mener bidrar til at andre løsninger og metoder benyttes:

- Materialkostnad
  - Krav om lave investeringskostnader, og vedlikeholdskostnader over tid
- Geometriske forhold
  - Krav til plane flater uten sår og øvrige støpefeil, porer, steinreir med mer
- Tilgjengelighet
  - Kan være begrenset på grunn av tilstøtende konstruksjonsdeler eller installasjoner
- Forankring av laminat eller vev
  - Behov for forankringslengde kan komme i konflikt med andre deler av konstruksjonen
- Bestandighet over tid
  - Temperaturvekslinger, UV-stråling, fuktsykluser, salter og klorider
- Materialeegenskaper over tid
  - Relaksasjon, kryp, utmatting
- Mekanisk nedbrytning
  - Sårbar og utsatt for mekanisk slitasje eller skade
- Egenskaper ved brannbelastning
  - Krever beskyttelse for å tilfredsstille krav
- Heftegenskaper til eksisterende konstruksjon
  - Redusert heftfasthet på eksisterende konstruksjon eller avspilting av overdekning

Videre er det utfordringer knyttet til den termiske utvidelseskoeffisienten til FRP. CFRP og AFRP har inkompatibel termisk utvidelseskoeffisient sammenlignet med betong. I motsetning til stål som er et elastoplastisk materiale, er komposittene mer eller mindre lineært elastisk til brudd inntreffer, uten noen markant flytning eller plastisk deformasjon, noe som fører til redusert duktilitet (FIB 2001, 2).

Når det gjelder områder med begrenset tilgang på forskning konkluderer Pendhari, Kant, og Desai (2008, 119) i sin litteraturgjennomgang at det er nødvendig med mer forskning for blant annet å kunne bestemme bestandigheten av FRP-kompositter under brann, utmatting av forsterkede konstruksjoner og effekten av kjemisk påvirkning og UV-stråling. De mener også at det er nødvendig med langvarige studier som undersøker effekten av blant annet alkalitet og temperaturer på harpiks og fibre, samt effekten av fryse-tine sykluser under vedvarende belastning. Videre oppsummerer de med at det er nødvendig med forskning for å studere oppførselen til korte- og lange søyler utsatt for kombinert aksialkraft og bøyemoment, søyler utsatt for dynamisk belastning, samt at det er nødvendig med eksperimentelle og analytiske studier for å forstå oppførselen til bjelke-søyleforbindelser knyttet til torsjon, duktilitet og bestandighet.

## 2.2 Material og dimensjonering

### 2.2.1 Karbonfiber

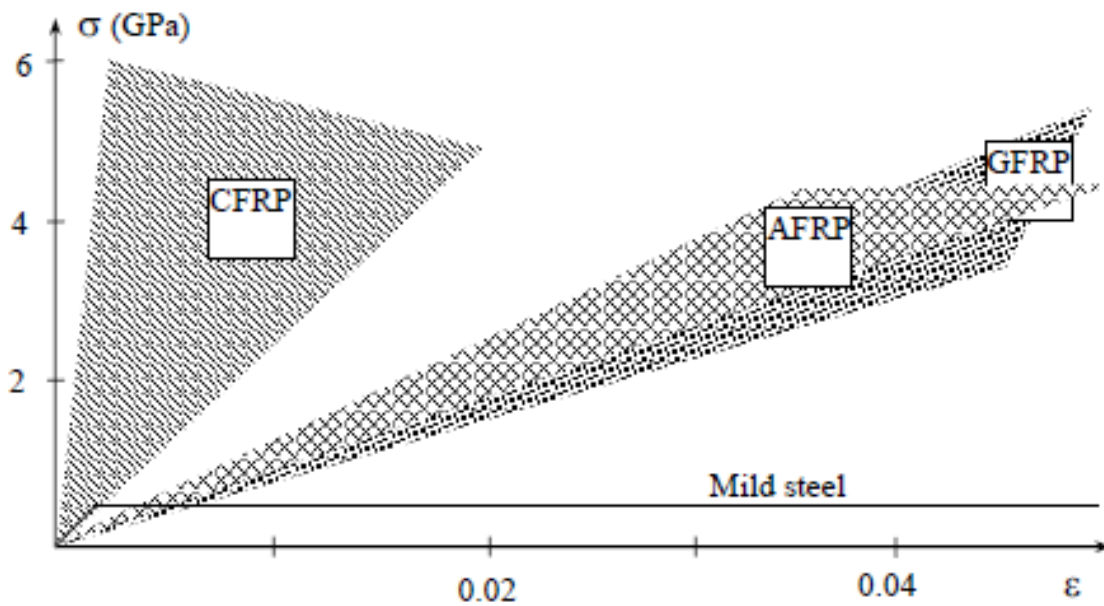
CFRP er et komposittmateriale i likhet med armert betong. Slik som armeringsstålet er omhylllet av en matrise av betong, er også karbonfibret omhylllet av en kontinuerlig matrise. Polymer er den vanligste matrisen i karbonfiberkompositt, men det finnes også metalliske- og keramiske matrisematerialer. Generelt kan en kompositt beskrives ved at et diskontinuerlig materiale, armeringsmaterialet, er omhyllt av et kontinuerlig materiale, matrisen (Thorenfeldt et al. 2006, 6).

Denne oppgaven omhandler karbonfiber som utenpåliggende forsterkningsmateriale, men for å kunne sammenligne med alternativer er det i Tabell 1 presentert en oversikt over materialegenskapene til de mest anvendte armeringsmaterialene i FRP-kompositter. Verdiene for FRP-materialer i tabellen er hentet fra Täljsten, Blanksvärd, og Sas (2011, 20). Annen litteratur på området kan vise større variasjon i materialegenskapene til ulike karbonfiber, som for eksempel tabell 3.2 i Publikasjon nr.36 av Norsk Betongforening (Thorenfeldt et al. 2006, 9). Det er likevel valgt å kun presentere disse verdiene for å gi en generell oversikt over materialegenskapene til karbonfiber. Egenskapene til tradisjonell slakkarmering er også lagt inn i tabellen for å gi et sammenligningsgrunnlag.

Materiale	E-modul [GPa]	Strekkfasthet [MPa]	Bruddtøyning [%]
<b>Karbon HM</b>	350 – 650	2500 – 4000	5
<b>Karbon HS</b>	240	3500	11
<b>Aramid (kevlar)</b>	62 – 175	3620	14
<b>E-glass</b>	72,4	3450	24
<b>S-glass</b>	85,5	4580	33
<b>AR-glass</b>	70 – 76	1800 – 3500	20 – 30
<b>Armeringsstål</b>	200	500	75 (teknisk klasse C)

Tabell 1: Materialegenskaper til ulike fibre sammenlignet med armeringsstål.

Betegnelse «HM» og «HS» på karbonet i Tabell 1, er forkortelser for henholdsvis «High modulus» og «High strength». HM har altså en høy E-modul mens HS har høy strekkfasthet og standard E-modul. Selv om det finnes ulike typer karbonfiber med ulike materialegenskaper, har alle typer likevel lineær-elastisk oppførsel og høy styrke, noe som er illustrert i Figur 2 gjengitt fra FIB (2001, 1). Denne viser også en sammenligning av CFRP opp mot GFRP og AFRP.



Figur 2: Spenning-tøyingsforløp for en-aksial strekk på ulike FRP-materialer og stål.

Når det gjelder materialegenskapene på det endelige produktet, CFRP-kompositten, finnes det mange alternativer. I likhet med Täljsten, Blanksvärd, og Sas (2011, 177-183) er det i Tabell 2 presentert produkter fra tre ulike leverandører med tilhørende materialegenskaper. Noen av verdiene fra denne litteraturen stemmer likevel ikke overens med informasjon på leverandørenes hjemmesider, og av den grunn er noen av verdiene her oppdatert med hensyn til dette. Det er også lagt til noen produkter som ikke er tatt med i litteraturen fra Täljsten, Blanksvärd, og Sas (2011). Justerte verdier og tillagte produkter er markert i tabellen.

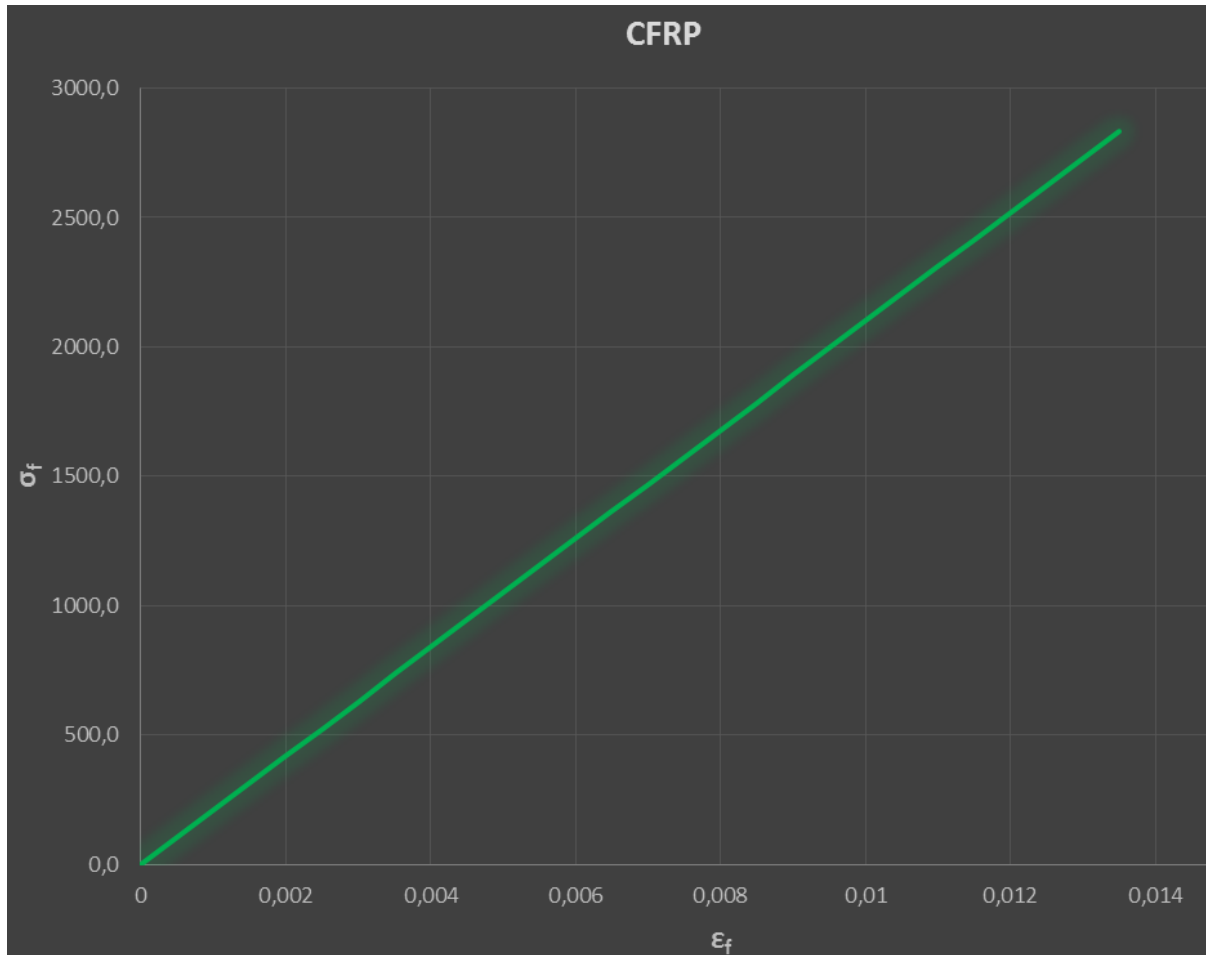
Produkttype	Leverandør	Produktnavn	E-modul [GPa]	Strekfasthet [MPa]	Bruddtøyning [%]	
Karbonfiber- vev / duk	S&P	S&P C-Sheet 240 <sup>1</sup>	240	4300 – 45000	17,0 – 17,5	
		S&P C-Sheet 640 <sup>2</sup>	640	2650	4,0	
	Sika	SikaWrap Hex-230C <sup>3</sup>	230	3450	15,0	
		SikaWrap Hex-103C <sup>4</sup>	234,5	3793	15,0	
	Sto	StoFRP Sheet S	240	4000	17,0	
		StoFRP Sheet IM	290	5500	19,0	
		StoFRP Sheet M	395	4600	12,0	
	Karbonfiber- laminat	S&P	CFRP- laminates CFK 150/2000 <sup>5</sup>	170	2800	16,0
			CFRP- laminates CFK 200/2000 <sup>5</sup>	205	2800	13,5
Sika		Sika Carbodur S	165	3100	17,0	
		Sika Carbodur M	210	3200	13,5	
		Sika Carbodur H <sup>6</sup>	300	1500	4,5	
Sto		StoFRP Plate E	160	2100	13,0	
		StoFRP Plate S	170	3100	18,0	
		StoFRP Plate IM	210	3300	15,7	
		StoFRP Plate M	260	2500	9,6	

Tabell 2: Materialegenskaper CFRP-produkt.

<sup>1</sup>Hentet fra S&P (2014a), <sup>2</sup>Hentet fra S&P (2014b), <sup>3</sup>Hentet fra Sika USA (2011), <sup>4</sup>Hentet fra Sika USA (2014), <sup>5</sup> Hentet fra S&P (2014c), <sup>6</sup>Hentet fra Sika Norge (2006).

## 2 Teori

I denne oppgaven, og dermed i beregningsprogrammet som er utarbeidet, er spenning-tøyningsforløp til CFRP-forsterkningen lagt inn med lineær-elastisk oppførsel. Figur 3 er hentet fra ConLam, og viser hvordan beregningsprogrammet behandler CFRP-materialet. I dette eksempelet er det lagt inn en E-modul på 210 000 MPa og en bruddtøyning på 13,5 ‰, noe som tilsvarer materialegenskapene til Sika Carbodur M laminat (Sika Norge 2006).



Figur 3: Spenning-tøyningsforløp CFRP-materiale fra ConLam.

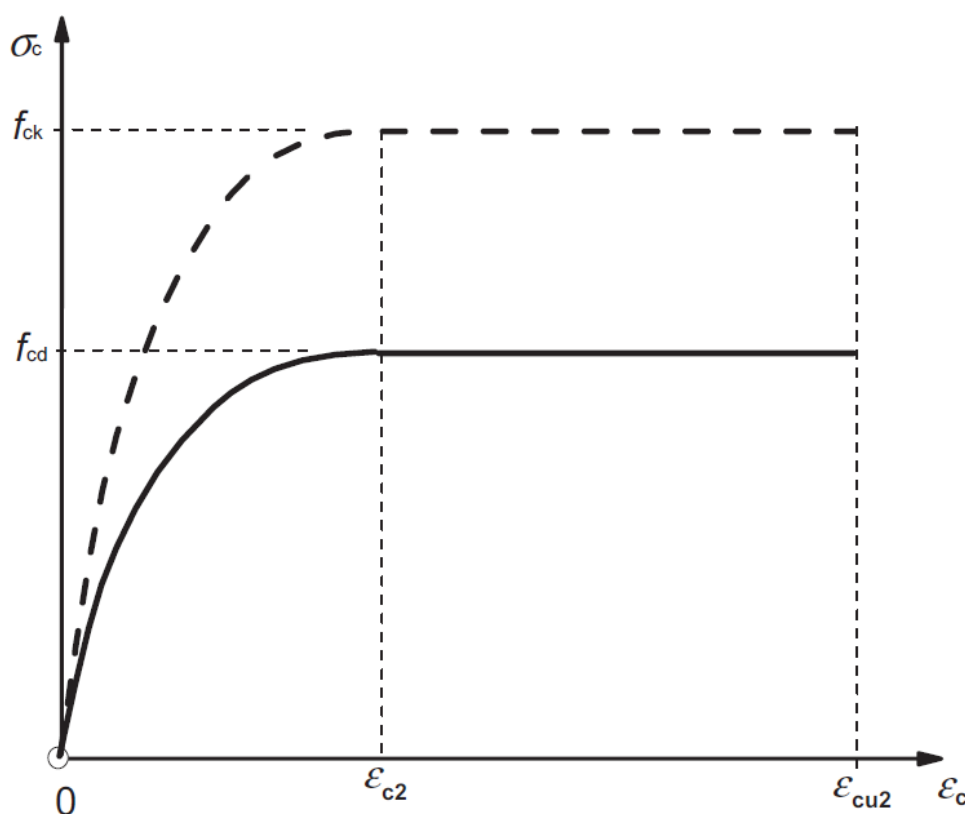


### 2.2.2 Betong

Betong i trykk framviser en fullstendig ikke-lineær spenning-tøyningsoppførsel, mens den har en meget lav fasthet mot strekk sammenlignet med trykk (Sørensen 2010, 9). I denne oppgaven er det benyttet en parabel-rektangulær spenning-tøyningsssammenheng for betong i trykk, som vist i Figur 4. Modellen er hentet fra EC2 [NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008] 3.1.7(1), og beregningene av dimensjonerende betongspenninger frem til tøyningsgrensen  $\epsilon_{c2}$  blir utført i henhold til standardens formel 3.17:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{for} \quad 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2}$$

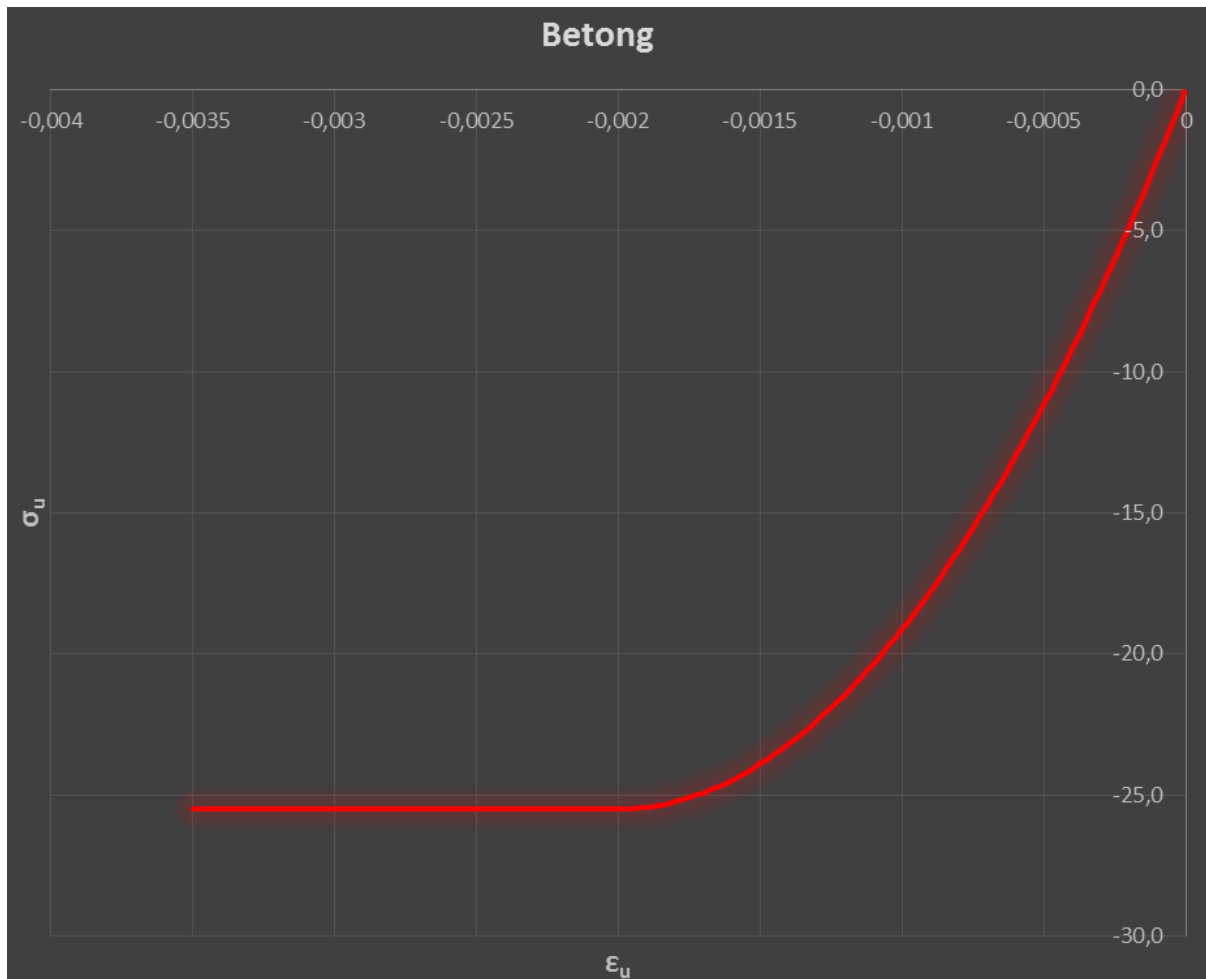
Tøyningsverdien  $\epsilon_{c2}$  avhenger av betongkvaliteten. Den er konstant fra C12/15 til C50/60, og økende etter dette. Samtidig reduseres bruddtøyning  $\epsilon_{cu2}$  for økende fastheter, noe som fører til at betong av høyere fasthetsklasser oppfører seg sprøere enn betong med lavere fasthet.



Figur 4: Idealisert spenning-tøyningskurve for betong under trykk, hentet fra EC2, figur 3.3.

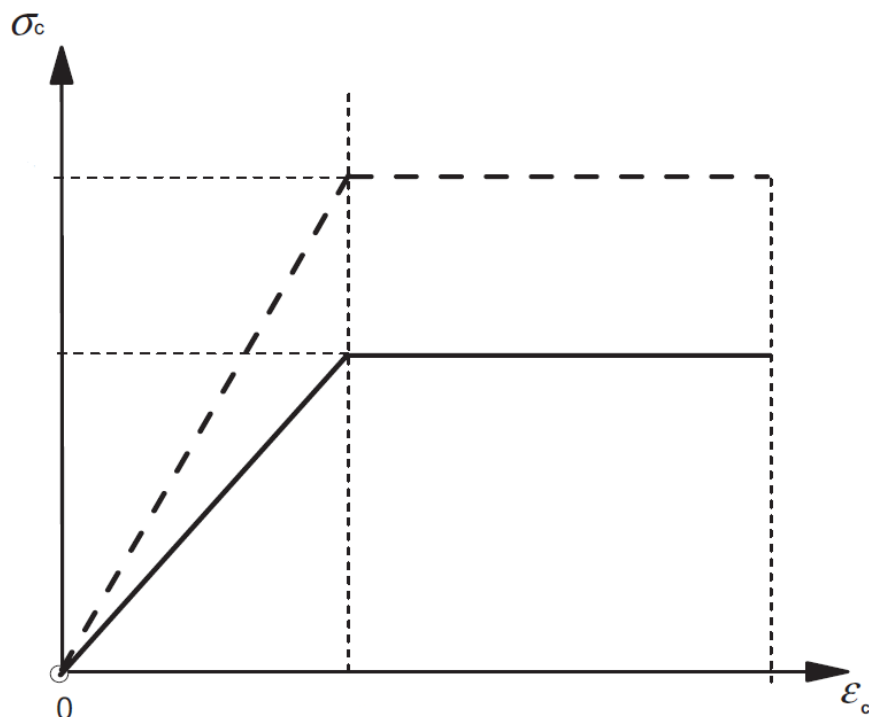
## 2 Teori

Denne materialoppførselen til betong er benyttet i kapasitetsberegninger i brudd- og bruksgrensetilstand i ConLam. Dimensjonerende materialmodell for C45/55-betong er vist som eksempel hentet fra programmet i Figur 5. Programmet håndterer trykkspenninger og stukning som negative verdier.



Figur 5: Spenning-tøyningsforløp C45/55-betong fra ConLam.

EC2 tillater å benytte andre forenklede spenning-tøyningssammenhenger dersom de tilsvarer, eller er mer konservative enn den parabel-rektangelformede sammenhengen i Figur 4. Et eksempel på dette er en bi-lineær sammenheng, som vist i Figur 6 gjengitt fra EC2 3.1.7(2). Det er valgt å benytte denne sammenhengen i beregninger av bøyestivhet i ConLam. Tøynings- og spenningsgrenser i den sammenhengen er beskrevet i kapittel 2.2.6.

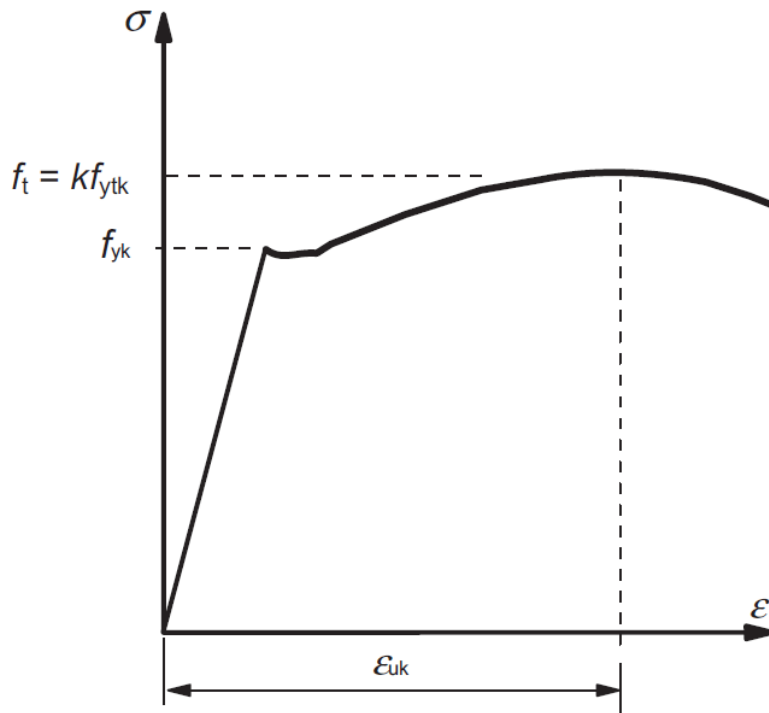


Figur 6: Bi-lineær spenning-tøyningsammenheng. EC2, figur 3.4.

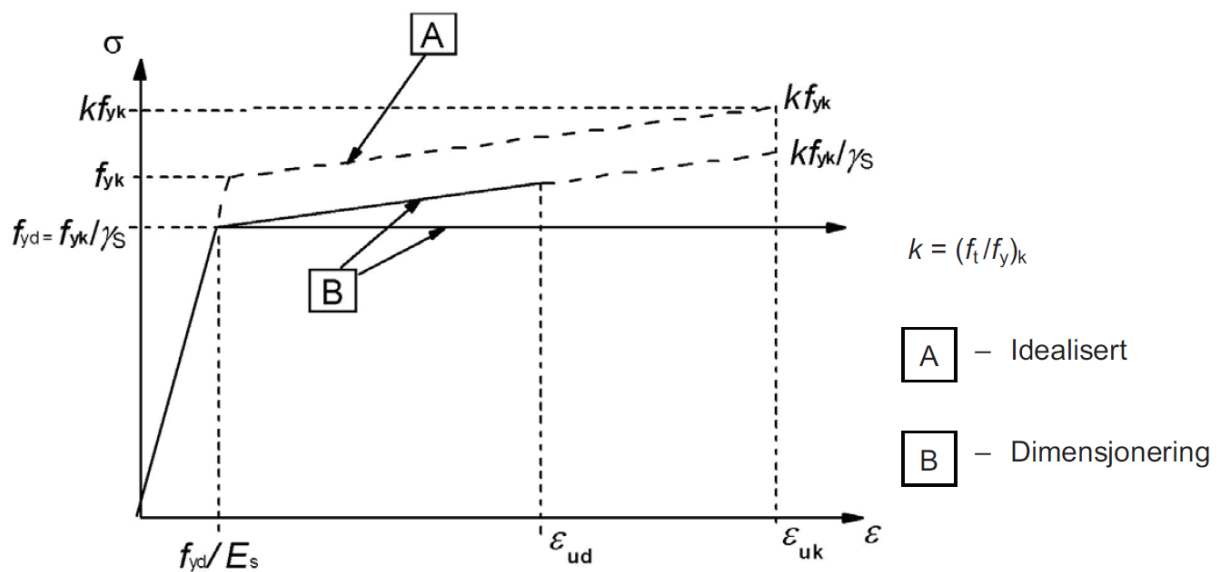
Materialfaktor for betong  $\gamma_c$  og koeffisient  $\alpha_{cc}$ , som tar hensyn til virkninger av langtidslast på trykkfastheten, samt ugunstige virkninger som er en følge av måten lasten påføres benyttes i programmet i henhold til nasjonalt tillegg til EC2. Henholdsvis NA.2.4.2.4 og NA.3.1.6(1)P.

### 2.2.3 Slakkarmering

Beregningsmetodene i denne oppgaven gjelder for sveisbart kamstål og sveiste nett med flytegrense  $f_{yk}$  i område 400 til 600 MPa, i henhold til kapittel 3.2 i EC2. Det typiske spenning-tøyningsforløpet til varmvalset stål er vist i Figur 7, hentet fra EC2 3.2.4(2). Spenning-tøyningsforløpet som blir benyttet til dimensjonering er vist ved kurve B i Figur 8, hentet fra EC2, 3.2.7(2).



Figur 7: Spenning-tøyningsammenheng for typisk armeringsstål, varmvalset.



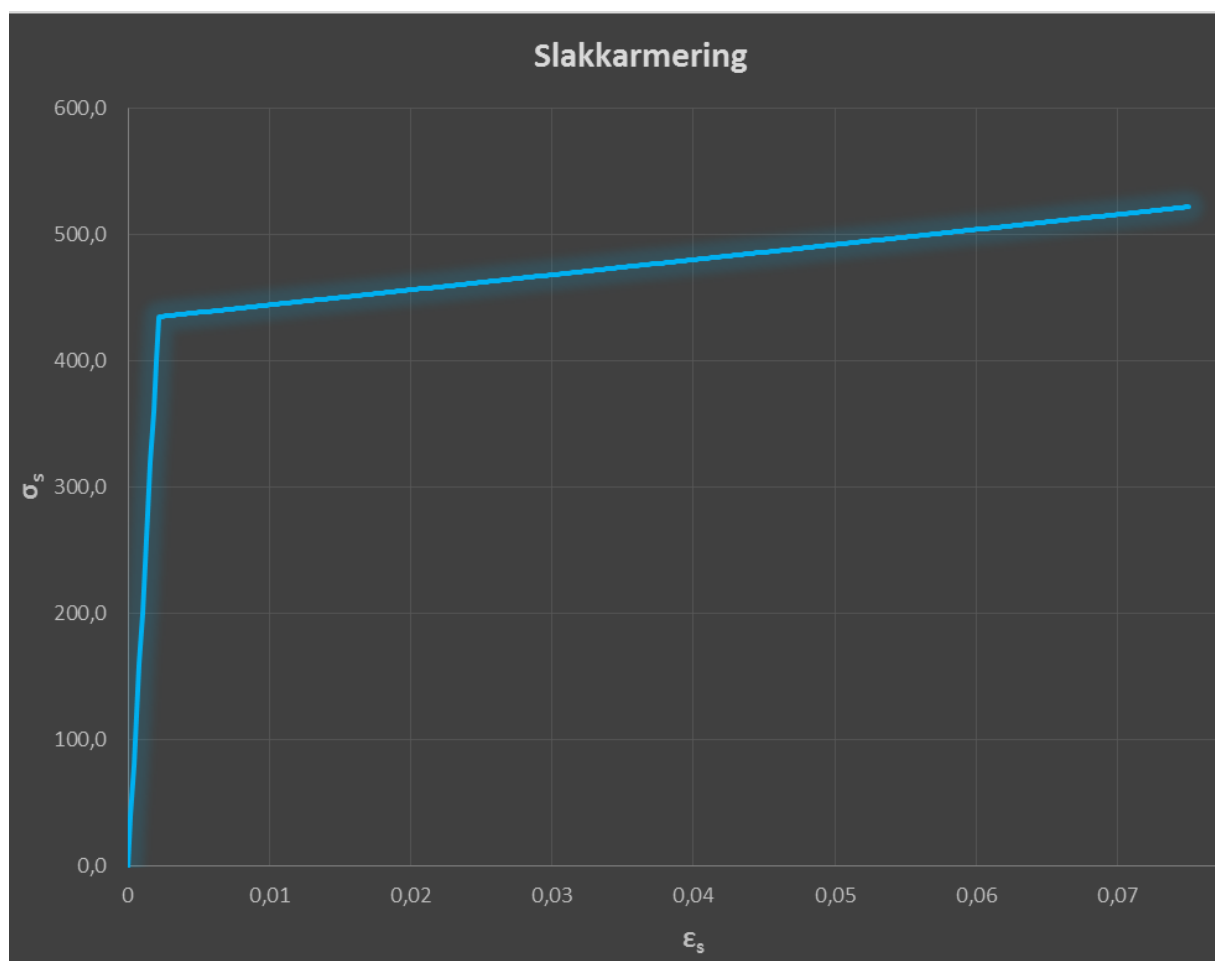
Figur 8: Idealisert og dimensjonerende spenning-tøyningsammenheng for armeringsstål (strek og trykk).

I den dimensjonerende kurven med fastning, bestemmes faktoren  $k$  av forholdet mellom armeringens karakteristiske flytegrense og armeringens karakteristiske strekkfasthet,  $f_{tk}/f_{yk}$ . I denne oppgaven er det valgt å benytte tabell C.1 i EC2, tillegg C, for bestemmelse av grenseverdier for  $k$ . Verdier fra denne tabellen er gjengitt i Tabell 3. Alternativt kan man benytte verdier fra tabell NA.3.5(901) i EC2.

Teknisk klasse	A	B	C
Karakteristisk flytegrense $f_{yk}$ eller $f_{0,2k}$ (MPa)	400 til 600		
Minste verdi av $k = (f_t/f_y)_k$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$
Karakteristisk tøyning ved største kraft $\epsilon_{uk}$ (‰)	$\geq 25$	$\geq 50$	$\geq 75$

Tabell 3: Verdien av  $k$  for stangarmering og stenger fra kveil.

For å utføre beregninger av tverrsnittskapasitet opp mot virkelig oppførsel av materialene, er det valgt å benytte spenning-tøyningsforløp med fastning for armeringen i denne oppgaven, og dermed også i beregningsprogrammet ConLam. Figur 9 viser eksempel på dimensjonerende materialmodell for armeringsstål fra ConLam, her med  $f_{yk} = 500$  MPa og  $f_{tk} = 600$  MPa ( $k = 1,2$ ).



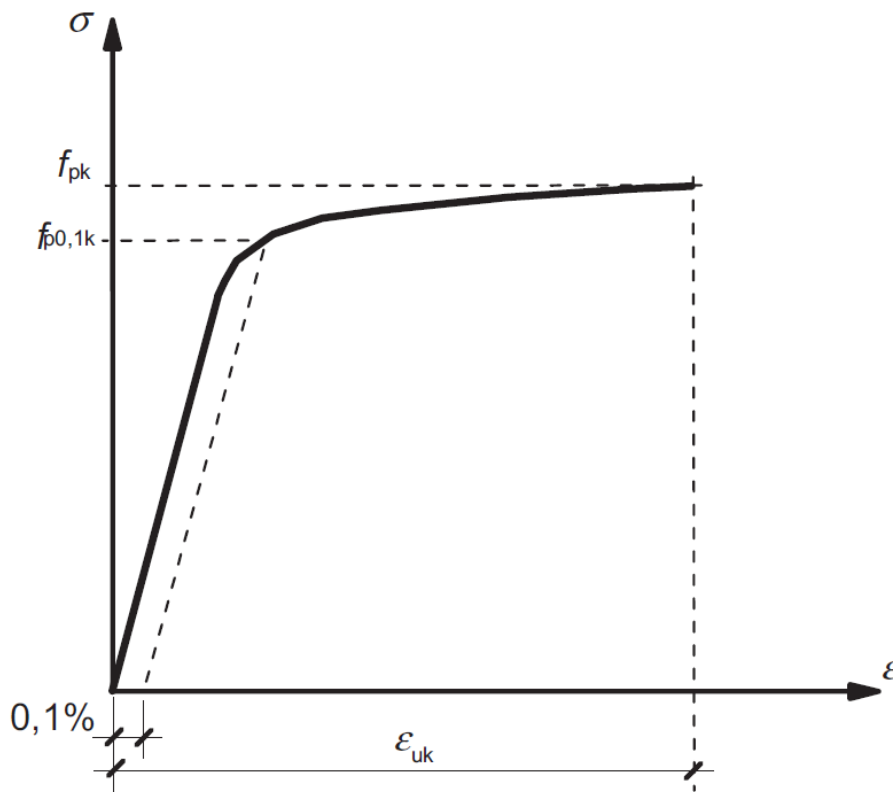
Figur 9: Spenning-tøyningsforløp armeringsstål fra ConLam.

## 2 Teori

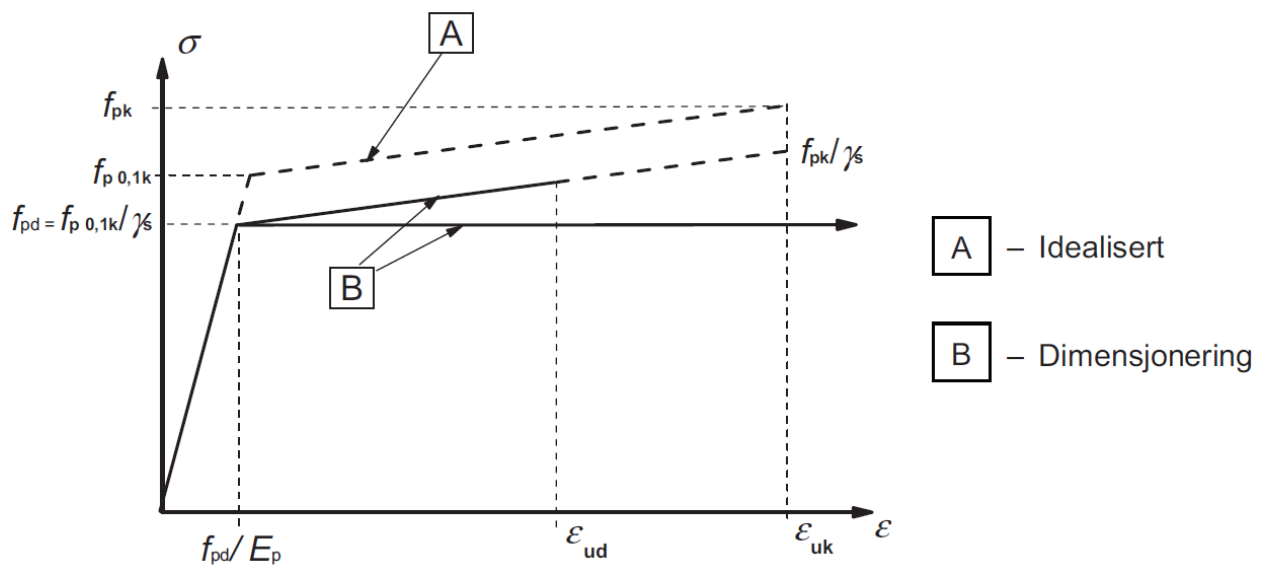
I henhold til EC2 3.2.7(4) kan dimensjonerende verdi av E-modulen  $E_s$  forutsettes å være 200 000 MPa. Karakteristisk bruddgrensetøyning  $\epsilon_{uk}$  kan hentes fra tabell C.1 i EC2. Verdier fra denne er gjengitt i Tabell 3. Materialfaktor for armeringsstål  $\gamma_s$  benyttes i programmet i henhold til nasjonalt tillegg til EC2 NA.2.4.2.4.

### 2.2.4 Spennarmering

Figur 10 viser, i henhold til EC2 3.3.3(1), spenning-tøyningsammenhengen for typisk spennstål.  $f_{pk}$  er karakteristisk strekkfasthet ved største belastningen i direkte strekkbelastning, og  $f_{p0,1k}$  er den karakteristiske verdien av 0,1 %-strekkgrensen. Spenning-tøyningsforløpet som blir benyttet til dimensjonering er vist ved kurve B i Figur 11, hentet fra EC2, 3.3.6(7).



Figur 10: Spenning-tøyningsforløp for typisk spennstål i strekk. Hentet fra EC2, figur 3.9.



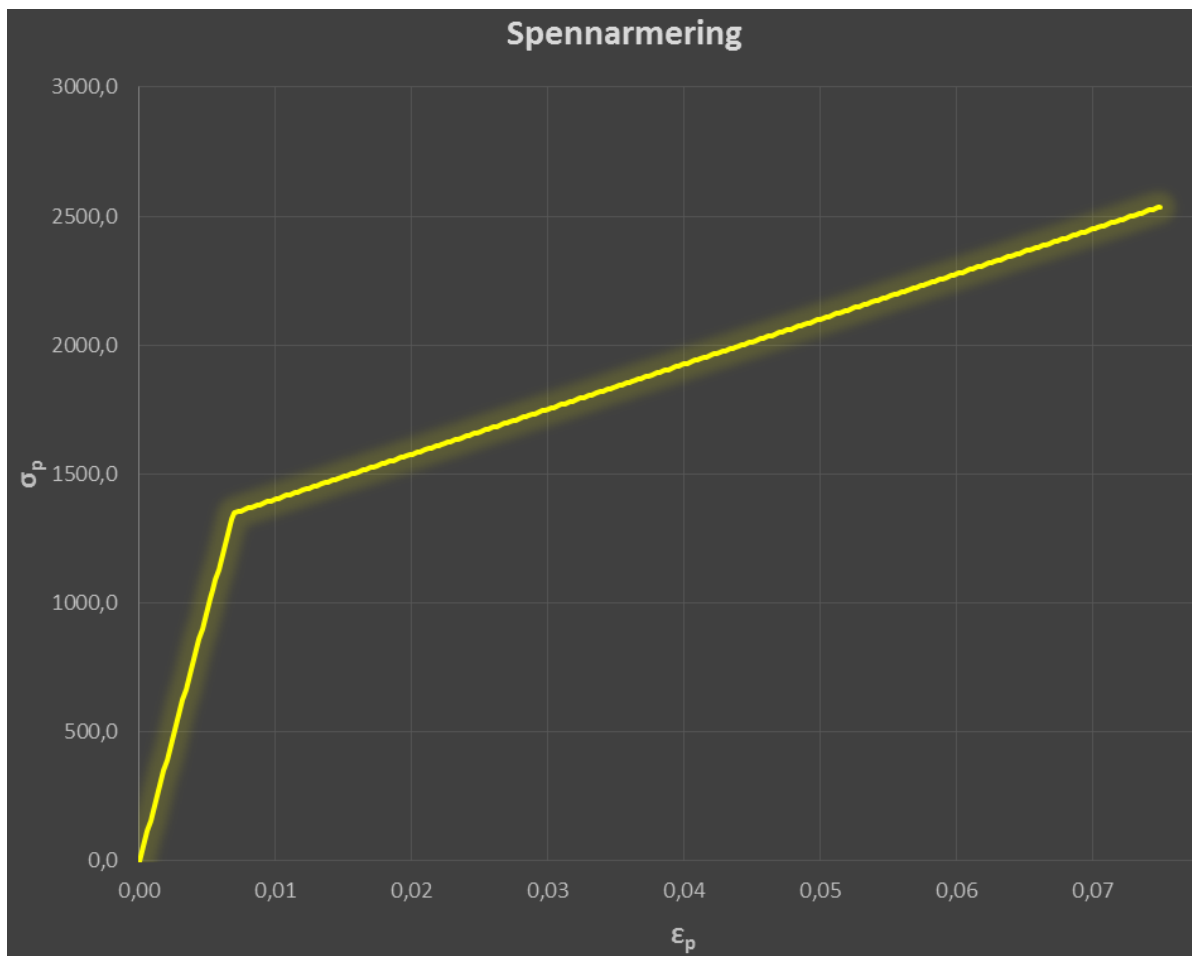
Figur 11: Idealisert og dimensjonerende spenning-tøyningssammenheng for spennstål (strek), hentet fra EC2, figur 3.10.

Grunnlaget for spennstålets materialoppførsel i fastningsfasen blir hentet fra EC2 NA.3.3.6(7), som sier at grensetøyningen  $\epsilon_{ud}$  kan settes lik den største av 0,01 og  $0,4 \cdot \epsilon_{uk}$ , med en tilhørende spenning ikke større enn  $1,04 \cdot f_{p0,1k} / \gamma_s$ . Dersom verdien for  $\epsilon_{uk}$  ikke er kjent, velges grensen på 10%. Dette er et valg som blant annet er benyttet i dimensjoneringsprogrammet NovaDesign, med begrunnelse i at  $\epsilon_{uk}$  skal hentes fra EN 10138, men at denne foreløpig ikke er utgitt. NovaDesign er et dimensjoneringsprogram for armerte betongtverrsnitt utviklet av Dr. Ing. A. Aas-Jakobsen AS. Ved kjent  $\epsilon_{uk}$  kan man velge å benytte denne sammen med spenningen  $f_{pk} / \gamma_s$ , som i Figur 11.

Materialfaktor for spennstål  $\gamma_s$ , benyttes i samsvar med nasjonalt tillegg til EC2, NA.2.4.2.4. Dimensjonerende verdi av E-modulen  $E_p$  kan, i henhold til EC2 3.3.6 (2) og (3), forutsettes å være 205 000 MPa for tråd og stenger og 195 000 MPa for tau.

I denne oppgaven er det valgt å benytte dimensjonerende spenning-tøyingsforløp med fastning, og i utgangspunktet med verdiene  $\epsilon_{ud} = 10 \text{ ‰}$  og tilhørende spenning på  $1,04 \cdot f_{p0,1k} / \gamma_s$ . Figur 12 viser eksempel på dimensjonerende materialmodell for spennstål fra ConLam, her med  $f_{p0,1k} = 1550 \text{ MPa}$  ( $f_{pk} = 1700 \text{ MPa}$ ) og  $E_p = 195 000 \text{ MPa}$ . ConLam tillater likevel å endre input på grensetøyninger.

Når det gjelder denne oppgaven er det valgt å begrense omfanget knyttet til spennarmering ved å kun legge inn tøyning ved oppspenning inkludert spennkrafttap. Det blir med andre ord ikke utført beregninger på disse tapene i ConLam.



Figur 12: Spenning-tøyningsforløp spennstål fra ConLam.

### 2.2.5 Bindemiddel for FRP-forsterkning

For å feste FRP-materialer til betongen må man benytte et feste-/bindemiddel. Materialeegenskaper for vanlige bindemidler benyttet i bygningskonstruksjoner er presentert i Tabell 4, hentet fra Nilimaa (2015, 20).

Egenskap	Polyester	Epoxy	Vinylester
Strekfasthet [MPa]	34 – 104	55 – 130	73 – 81
E-modul [GPa]	2,1 – 3,5	2,7 – 4,1	3,0 – 3,5
Bruddtøyning [%]	1,0 – 6,5	1,5 – 9,0	4,0 – 5,0

Tabell 4: Materialeegenskaper, festemiddel.

Grunnet god heft til betong, god bestandighet og motstandsdyktighet mot miljøpåvirkning er Epoxy det mest brukte bindemidlet ved denne typen forsterkning. Det finnes likevel ulemper ved bruken av dette som man burde ta hensyn til. På grunn av faktorer som helsefare, temperaturkrav ved påføring, sensitivitet for fukt under herding, samt diffusjonslukkede



overflater, mener noen fagfolk innenfor denne forsterkningsformen at man burde forsøke å bruke mer mineralbaserte bindemidler. Her er epoksyen erstattet av et sementholdig bindemiddel (Nilimaa 2015, 22).

Når det gjelder oppgaven, og utarbeidet beregningsprogram, er det valgt å begrense omfanget knyttet til bindemiddel. Egenskapene til disse blir ikke medregnet ved beregning av kapasitet til tverrsnittet.

### 2.2.6 Dimensjonering og sikkerhet

Generelt skal dimensjonering av armerte betongkonstruksjoner med utenpåliggende CFRP-forsterkning være i henhold til EC0 [NS-EN 1990:2002+NA:2008] med tilhørende nasjonalt tillegg, i tillegg til at regler fra EC2 med tilhørende nasjonalt tillegg må følges. For at disse reglene skal kunne følges, er det nødvendig å innhente tilstrekkelig dokumentasjon på den eksisterende konstruksjonen. Med dette menes dokumentasjon som beskriver materialegenskaper til betong og armering, samt geometri som for eksempel tverrsnittsmål og overdekning til gjeldende konstruksjonselement. Det er også avgjørende med en korrekt vurdering av betongkonstruksjonens tilstand før eventuell beskyttelse og reparasjon.

Dimensjonering omhandler beregninger innenfor både bruks- og bruddgrensetilstand. I bruksgrensetilstand ser man på spenningsbegrensninger, deformasjoner og nedbøyninger, samt riss av betong. Ved beregning av tverrsnittskapasitet i bruksgrensetilstand er det i denne oppgaven benyttet spenningsbegrensninger på materialer fra EC2, 7.2 og NA.7.2. For karakteristisk lastkombinasjon er begrensninger satt til  $k_1 \cdot f_{ck}$  for betong,  $k_3 \cdot f_{yk}$  for slakkarmering og  $k_5 \cdot f_{pk}$  for spennarmering, der verdiene for  $k$  er på henholdsvis 0,6, 0,8 og 0,75. Begrensning i tilnærmet permanent lastkombinasjon er satt til  $k_2 \cdot f_{ck}$  for betong, mens verdiene for slakk- og spennarmering er de samme som for karakteristisk lastkombinasjon. Verdien for  $k_2$  er på 0,45. Da beregningsprogrammet utviklet i denne oppgaven er et tverrsnittsprogram vil det ikke være mulig å beregne nedbøyning av aktuelt konstruksjonselement direkte. Programmet kan utføre beregninger av bøyestivhet for det opprissede tverrsnittet, som kan benyttes av brukeren til videre beregninger av deformasjoner og nedbøyning. Grenseverdier for materialer i disse beregningene er satt til  $0,6 \cdot f_{ck}$  for betongen, og karakteristisk flytegrense for slakk- og spennarmering. Ved dimensjonering i bruddgrensetilstand kontrolleres mulige bruddformer, og dimensjonering gjøres til ønsket bruddform. Man søker her en duktil (seig) bruddform for at konstruksjonen skal gi forvarsel på brudd gjennom store deformasjoner. Retningslinjer knyttet til duktilitet kan variere i det enkelte land, og land som er mer utsatt for jordskjelv gir som regel andre retningslinjer til tøyning i armering ved brudd i betong eller brudd i FRP-forsterkningen. I USA anbefales eksempelvis en tøyning på minst 5,0 ‰ i slakkarmeringen ved brudd i betong eller brudd i FRP-forsterkningen (ACI 2008).

Det finnes foreløpig ingen standardisert metode for dimensjonering av CFRP-forsterkede betongkonstruksjoner, men det finnes ulik litteratur som kan benyttes som retningslinjer ved

## 2 Teori

dimensjonering, som blant annet Thorenfeldt et al. (2006), Täljsten, Blanksvärd, og Sas (2011), ACI (2008), Zilch, Niedermeier, og Finckh (2014) og FIB (2001). Denne litteraturen gir retningslinjer i henholdsvis Norge, Sverige, USA, Tyskland, samt generelle europeiske retningslinjer. Beregningsprogrammet utarbeidet i denne oppgaven er et tverrsnittsprogram. ConLam er konstruert på den måten at man kan legge inn verdier hentet fra den nevnte litteraturen på variabler som for eksempel materialfaktor for CFRP-forsterkningen. Valgte variabler fra retningslinjene blir da hensyntatt i rene mekaniske betraktninger av tverrsnittet og materialegenskaper. ConLam forutsetter fullt samvirke mellom betong og CFRP-materiale.

Når det gjelder sikkerhetsfaktoren til CFRP-produkter kan man for eksempel benytte verdiene i Tabell 5 som er gjengitt og oversatt fra tabell 2.1 i Zilch, Niedermeier, og Finckh (2014, 6). Denne litteraturen beskriver de tyske retningslinjene for dimensjonering av pålimt forsterkning på betongkonstruksjoner (DAfStb guideline), samt bakgrunnsarbeidet for disse retningslinjene. Verdiene på sikkerhetsfaktorene for laminat og vev er de samme i svensk dimensjoneringshåndbok av Täljsten, Blanksvärd, og Sas (2011). I bruksgrensetilstand settes sikkerhetsfaktoren til 1,0.

Dimensjonerende situasjon	CFRP-laminat	CF-vev	Heft/bindingen av pålimt utenpåliggende forsterkning	Heft/binding av «Near-surface-mounted» forsterkning	Heft/binding av stål mot stål, eller CFRP mot CFRP
	$\gamma_{LL}$	$\gamma_{LG}$	$\gamma_{BA}$	$\gamma_{BE}$	$\gamma_{BG}$
Vedvarende og forbigående	1,2	1,35	1,5	1,3	1,3
Ulykke	1,05	1,1	1,2	1,05	1,05

Tabell 5: Sikkerhetsfaktorer for pålimt forsterkning for ulike dimensjonerende situasjoner. Oversatt fra Zilch, Niedermeier, og Finckh (2014).

Det er også viktig å ta hensyn til ulik miljøpåvirkning ved planlegging og dimensjonering av FRP-forsterkede betongkonstruksjoner. I litteratur fra blant annet Täljsten, Blanksvärd, og Sas (2011) og Thorenfeldt et al. (2006) blir temperatur, frost og fukt nevnt som miljøpåvirkninger som kan være utfordrende for denne typen konstruksjoner. Det er i denne oppgaven valgt å ikke gå nærmere inn på dette aspektet ved dimensjoneringen.

CFRP-forsterkede betongkonstruksjoner må også tilfredsstillende krav knyttet til ulykkessituasjoner som brann, eksplosjon, støt eller konsekvenser av lokal skade, og seismisk situasjon. Av hensyn til begrenset oppgaven er ikke dette inkludert i utarbeidet beregningsprogram.

### 2.3 Utførelse av pålimt fiberforsterkning

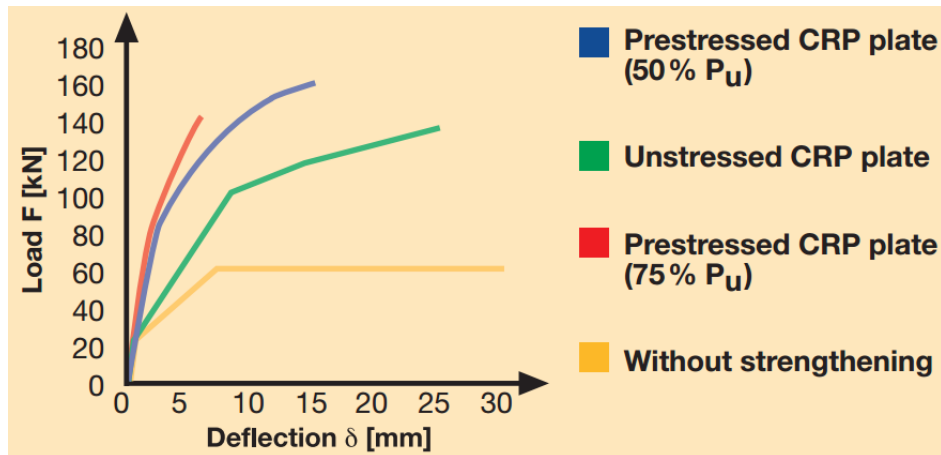
Da denne oppgaven i hovedsak omhandler utvikling av programvare for dimensjonering av eksisterende betongkonstruksjoner med utenpåliggende fiberforsterkning, er det er valgt å ikke gå i detalj på selve utførelsen av forsterkningsarbeidet. Det er likevel valgt gi en liten oversikt på temaet, da dette kan relateres direkte til programmet ved at det er en avgjørende forutsetning med korrekt utførelse for at resultatene fra ConLam skal kunne anvendes.

#### 2.3.1 Før forsterkning

Når det gjelder bruk av FRP-forsterkning på eksisterende betongkonstruksjoner må man samle inn tilstrekkelig informasjon til at forsterkningen skal kunne gjennomføres på en tilfredsstillende måte, før man påbegynner forsterkningsarbeidet. Denne informasjonen er blant annet eksisterende dokumentasjon på konstruksjonen, som når den er bygd, tegninger, armeringsplassering, materialegenskaper, lasthistorikk, tidligere reparasjoner og så videre. Man må også vite hvilke krav som stilles til den nye forsterkede konstruksjonen, samt at det må utføres en tilstandsvurdering som blant annet kartlegger skadeomfang som pågående armeringskorrosjon, rissomfang og virkelige materialkvaliteter. Det er også viktig å kartlegge om planlagte endringer i deler av konstruksjonen vil påvirke hele, eller andre deler av bygningskonstruksjonen, ved for eksempel endret bruddform eller større deformasjoner (Täljsten, Blanksvärd, og Sas 2011).

Med denne informasjonen på plass må det tas en avgjørelse på hvilke skader som eventuelt må utbedres på betongen før man kan forsterke, om konstruksjonen er egnet til å bli forsterket, og hvilken forsterkningsmetode som egner seg best.

Vedrørende valg av forsterkningsmetode er det også viktig å avklare om man burde/må avlaste eller jekke opp konstruksjonsdelen, eller benytte forspenning av FRP-forsterkningen. Eksempelvis dersom spennarmering i eksisterende betongkonstruksjon har en tøyning opp mot sin dimensjonerende bruddgrense, kan det være hensiktsmessig å redusere denne før påføring av FRP-komposittforsterkningen for å få en større økning i momentkapasiteten i bruddgrensetilstand. På konstruksjonsdeler med høye bruksgrensekrav som for eksempel små deformasjoner, kan det være hensiktsmessig å forspenne fiberkompositten for å gi større styrke, se Figur 13.



Figur 13: Sammenheng last-nedbøyning, forskjeller mellom uforsterket, og forsterket uten og med forspenning. Hentet 22.mai 2015 fra: <http://usa.sika.com/dms/getdocument.get/e60fbed3-ff04-3135-9d6e-4f39f5c517e1/bro-TCforSikaCarboDurStructuralStrengtheningSystems-us.pdf>

Dersom det er aktuelt med oppjekking/avlastning må man også kartlegge om det er praktisk gjennomførbart å utføre denne arbeidsoperasjonen på den aktuelle konstruksjonen. Tåler den underliggende konstruksjonen belastningen fra en totalavlastning av konstruksjonsdelene over? Er det eventuelt mulig å støtte opp underliggende deler? Er det tilstrekkelig plass til nødvendig utstyr for gjennomføring?

### 2.3.2 Under forsterkning

Under arbeidet med forsterkningen er det viktig å følge opp arbeidet ved blant annet å kontrollere at temperatur, fuktighet og ujevnheter i betongoverflaten holdes innenfor anbefalte nivåer. Kontroll av eventuell avlastning er også svært viktig. Når det gjelder arbeidsoperasjonene knyttet til selve påføringen av fiberkompositten må disse følge angivelser fra den aktuelle leverandøren, eventuelle tekniske godkjenninger på produktet, samt at lover og retningslinjer knyttet til generelt helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid på arbeidsplassen må følges.

Når det gjelder forsterkning av vei- og jernbanebruer er det fullt mulig å utføre forsterkningsarbeidet samtidig med at bruene er utsatt for trafikkbelastning, og erfaring viser at man kan oppnå god forsterkningseffekt selv med tung trafikk (Thorenfeldt et al. 2006).

### 2.3.3 Etter forsterkning

Etter forsterkningen er montert, er det viktig å kontrollere resultatet av limingen. Denne kontrollen søker å kartlegge eventuell forekomst av bom eller hulrom, misfarging eller luftporer. Eventuell bom må injiseres med herdeplast. Kritiske områder som for eksempel forankringssoner er spesielt viktige å kontrollere (Thorenfeldt et al. 2006).

Eventuell beskyttelse av CFRP-kompositten må monteres dersom det er behov for dette. Det kan være beskyttelse mot for eksempel brann, UV-stråling, vann/fukt, mekanisk slitasje og skade. Estetisk utbedring som maling utføres også etter forsterkning er ferdigmontert.

#### 2.3.4 Generelt

I de foregående delkapitlene er viktige faktorer i arbeidet før-, under- og etter forsterkning kort beskrevet. Generelt for disse gjelder god kvalitetssikring. Gode rutiner og dokumentasjon er viktig for å få et best mulig resultat. Bilde 13 viser eksempel på et kvalitetssikringskjema fra Sika som skal følge hele prosessen ved bruk av systemet Sika CarboDur.

## Kvalitetssikring

### Sika<sup>®</sup> CarboDur<sup>®</sup> Systemet

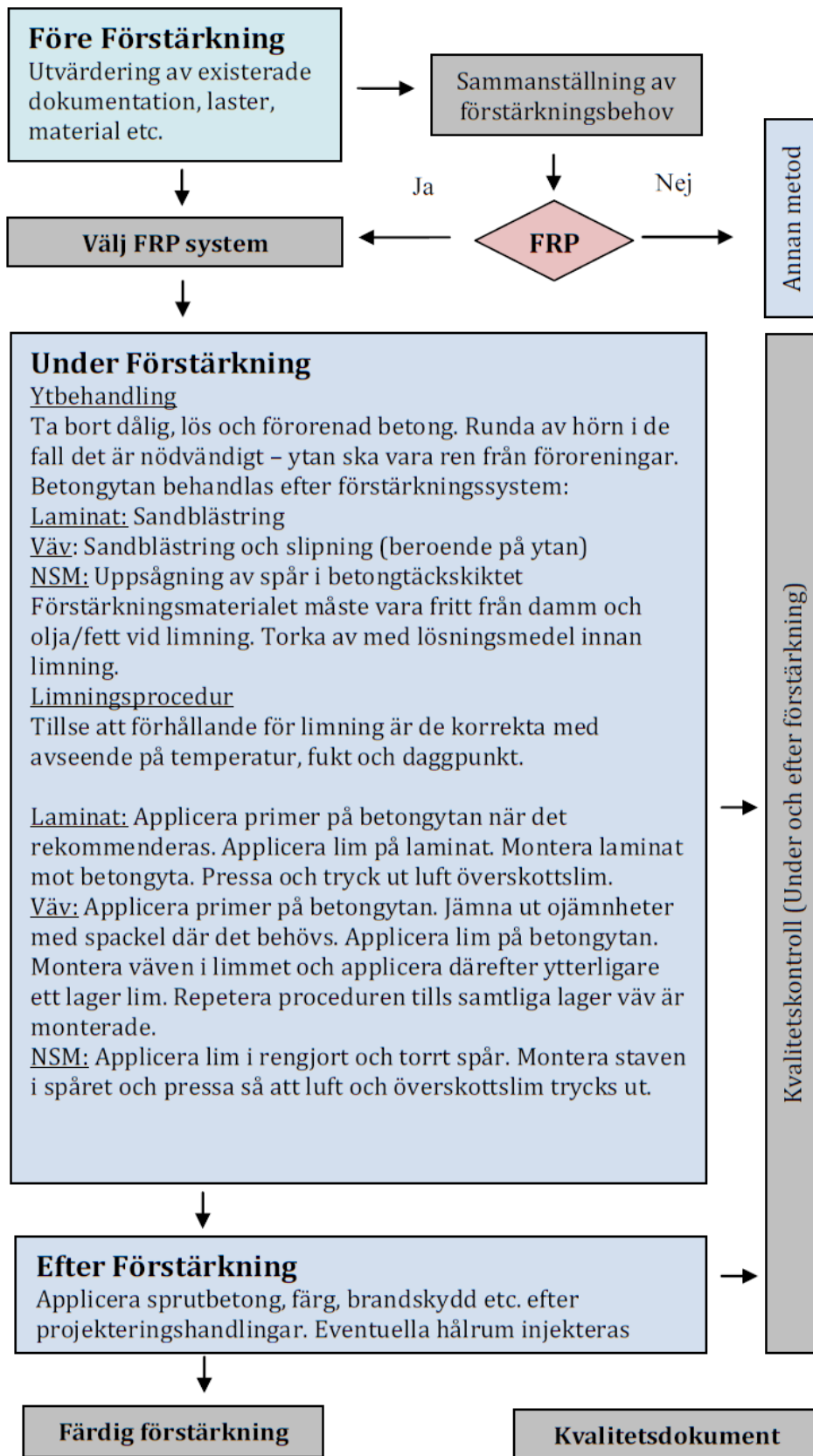
Operasjon	Utført Dato	Sign.	Kontroll (Sign.)
Statiske beregninger.			
Reparasjon av skadet betong / oppretting av ujevnheter i underlaget med Sikadur <sup>®</sup> -41 / Sikadur <sup>®</sup> -30 tilsatt kvartssand.			
Forbehandling iht. produktdatablad. Sandblåsing, nålhammer eller meisling/sliping etc.			
Rengjøring av underlaget med etterfølgende støvsugning for å sikre god heft.			
Heftprøver. Krav til heft: Se tilhørende produktdatablad.			
Kapping av båndene til riktig lengde med baufil.			
Rensing av bånd med Colma <sup>®</sup> -Rensevæske til kluten ikke lenger avgir farge. Husk å rense i samme retning. Før ikke kluten frem og tilbake.			
Blanding av lim: Sikadur <sup>®</sup> -epoksyylim blandes med Sikadur <sup>®</sup> blandespiral i min. 3 minutter.			
Sparkling av underlaget med Sikadur <sup>®</sup> -30 (ca. 1 mm).			
Påføring av lim på båndet.			
Montering av bånd.			
Etterkomprimering av bånd med gummirulle, til limet presses ut på siden av båndet.			
Kontroll av eventuelle luftlommer i limet ved å slå lett med mynt eller lignende på Sika <sup>®</sup> CarboDur <sup>®</sup> -båndene.			
Støping av prøveprismer for å etterkontrollere limets egenskaper. Prøvene skal herde under samme herdebetingelser som limet på den forsterkede konstruksjonen. Se tilhørende produktdatablad.			

Bilde 13: Skjema for kvalitetssikring ved forsterkning med Sika CarboDur System.

Hentet 22.mai 2015 fra: [http://nor.sika.com/dms/getdocument.get/4be2fce7-a56a-3d11-94f0-2c755abe9fe3/PDB\\_Sika\\_CarboDur.pdf](http://nor.sika.com/dms/getdocument.get/4be2fce7-a56a-3d11-94f0-2c755abe9fe3/PDB_Sika_CarboDur.pdf)

## 2 Teori

Som en oppsummering av utførelsen er det valgt å gjengi figur 8.1 fra Täljsten, Blanksvärd, og Sas (2011, 102) i Figur 14. Denne viser et flytskjema av forsterkningsprosessen.

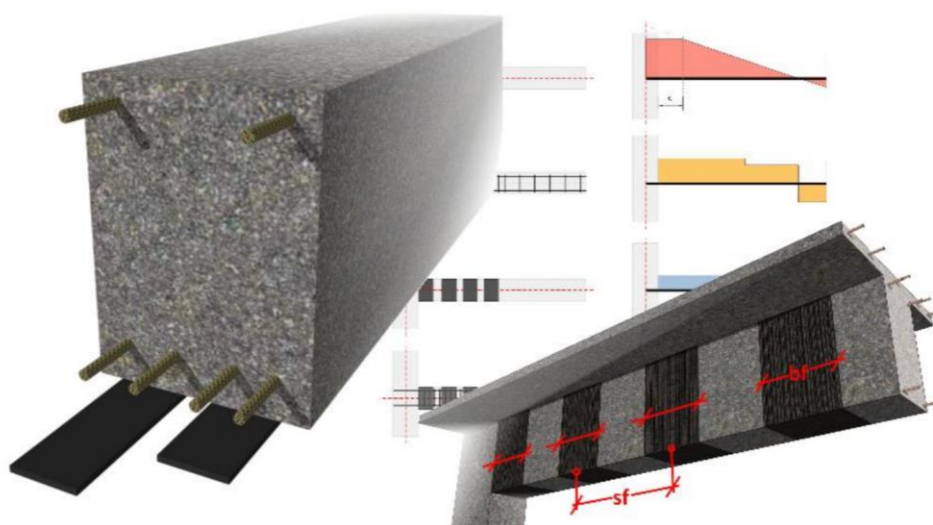


Figur 14: Beskrivelse av forsterkningsprosessen (Täljsten, Blanksvärd, og Sas 2011, 102).

## 2.4 Beregningsprogram for karbonfiberforsterkning

Som nevnt i kapittel 2.2.6 finnes det foreløpig ingen standardisert metode for dimensjonering av CFRP-forsterkede betongkonstruksjoner, men litteratur som Thorenfeldt et al. (2006), Täljsten, Blanksvärd, og Sas (2011), ACI (2008), Zilch, Niedermeier, og Finckh (2014) og FIB (2001) presenterer ulike retningslinjer. Det arbeides med å få på plass en felles europeisk standard for fiberforsterkning på eksisterende betongkonstruksjoner, men den er på dette tidspunktet ikke ferdigstilt. Denne standarden vil være en del av en ny EC2, og vil bygges mye på de tyske retningslinjene, DAfStb-guidelines, som er beskrevet i Zilch, Niedermeier, og Finckh (2014). Dette er informasjon som er fått av Thomas Blanksvärd (e-post 17.februar 2015, vedlegg A), som er med i utarbeidingskomiteen for den nye standarden.

Da det ikke finnes noe standardisert regelverk, er det heller ikke utarbeidet mange beregningsprogram for denne type dimensjonering. Kapasitetsberegninger av denne typen utføres ved håndberegninger basert på valgte retningslinjer, eventuelt programvare og/eller anbefalinger fra leverandør av FRP-forsterkning. Sika er en leverandør som har et relativt omfattende beregningsprogram, illustrert i Figur 15. Sika Carbodur beregningsprogram (2014) kan beregne nødvendig CFRP-forsterkning på både bjelker og søyler. For bjelker kan man beregne moment- og skjærforsterkning i bruks- og bruddgrensetilstand, samt brannsituasjon, i tillegg til at heft/forankring kontrolleres. For søyler kan man beregne nødvendig CFRP-omslutningsforsterkning ut fra ønske om økt styrke eller økt tøyningsgrense for betongen i trykk (Sika Norge 2014). En begrensning i denne programvaren er at beregningene blir utført basert på valg av ønsket CFRP-produkt, som da kun kan velges fra Sika sitt sortiment. Det teoretiske grunnlaget for beregningsprosedyren i programmet er basert på Bulletin 14 fra FIB (2001), samt regler fra EC0 og EC2. Det benyttes parabel-rektangulært spenning-tøyningforløp på betongen, i henhold til EC2 3.1.7(1), og dimensjonerende spenning-tøyningforløp uten fastning på slakkarmering, i henhold til EC2 3.2.7(2). Programmet kan ikke benyttes til beregning av spennarmerte betongkonstruksjoner.

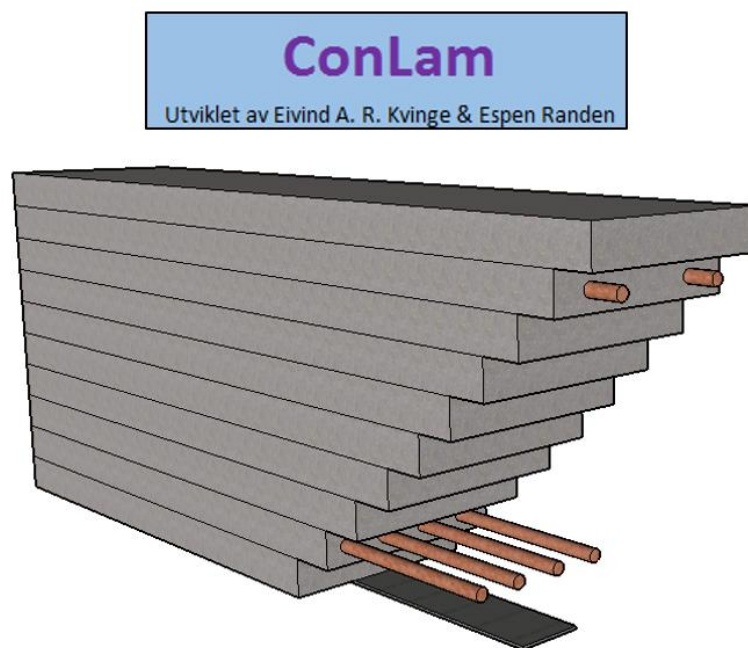


Figur 15: Illustrasjon fra Sika CarboDur beregningsprogram (Sika Norge 2014).

## 2 Teori

Som beskrevet i kapittel 2.2.6 er beregningsprogrammet utarbeidet i denne oppgaven et tverrsnittsprogram. Programmet er bygd opp slik at man kan legge inn verdier hentet fra relevante retningslinjer for ulike variabler, og disse variablene blir da hensyntatt i rene mekaniske betraktninger av tverrsnittet og materialegenskaper. Dette innebærer som nevnt forutsetning om fullt samvirke mellom betong og CFRP-materiale. En stor fordel med den valgte oppbygningen av programmet, er at det kan beregne kapasiteten til et forsterket tverrsnitt med flere forskjellige typer forsterkning, så lenge forsterkningsmaterialet har et lineært spenning-tøyningsforløp frem til brudd.

Programmet benytter spenning-tøyningsssammenhenger for de ulike materialene som beskrevet i kapittel 2.2. Forskjeller fra ConLam og Sikas beregningsprogram er blant annet at det er mulig å benytte fastning i det dimensjonerende spenning-tøyningsforløpet til slakkarmering, samt at man kan beregne spennarmerte betongkonstruksjoner og konstruksjoner påkjent av aksialkraft. For å få med betongbidraget i kapasitetsberegninger er det i denne oppgaven valgt å dele inn trykksonen i lameller. Denne metoden, lamellmetoden, blir nærmere beskrevet i kapittel 2.5. Beregningsprogrammet er også to-delt, ved at man beregner kapasitet på uforsterket tverrsnitt først, for så å velge mengde og kvalitet på forsterkning før man beregner kapasitet på fiberforsterket tverrsnitt. Da beregningsprosessen er bygd opp på denne måten, kan programmet også benyttes til kapasitetsberegninger av tradisjonelle slakk- og spennarmerte tverrsnitt uten fiberforsterkning. I tillegg kan det beregne dekker ved å betrakte en dekkestripe med en meters bredde som et rektangulært tverrsnitt, en metode som i mange tilfeller er konservativ fordi den ikke hensyntar fordelingen med bæring i to retninger. Beregningsprogrammet har fått navnet ConLam, og logoen er illustrert i Figur 16. I kapittel 3 vil programmet bli beskrevet i detalj.



Figur 16: Illustrasjon fra ConLam beregningsprogram.



## 2.5 Lamellmetoden

Ved bruk av lamellmetoden kan man beregne momentkapasiteten til et tverrsnitt i et vilkårlig snitt i en bjelke. I tillegg til kapasiteten gir metoden hele moment-krumningsforløpet fra null krumning til bruddgrensen for et av materialene oppnås. Metoden fungerer for tverrsnitt påkjent av normalkraft i tillegg til bøyning, den tillater mengder og plassering av slakk- og spennarmering etter eget ønske og fungerer for vilkårlige tverrsnittsformer. I tillegg til tradisjonell slakkarmering og spennarmering tillater metoden bruk av andre materialer som gir et bidrag til tverrsnittets momentkapasitet, som for eksempel karbonfiberforsterkning. Lamellmetoden er med andre ord en meget fleksibel beregningsmetode og i så måte godt egnet som grunnlag for et dimensjoneringsprogram for CFRP-forsterkede betongkonstruksjoner.

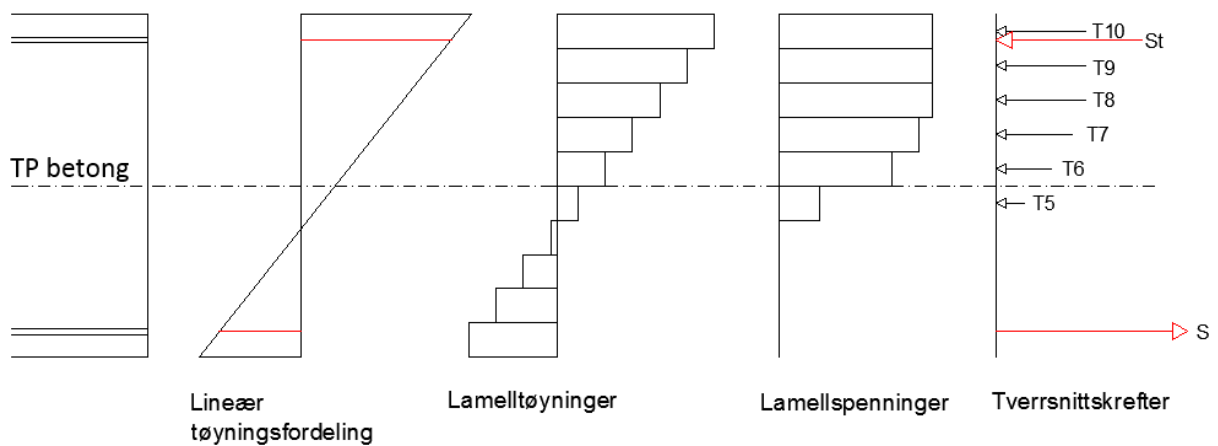
Følgende forutsetninger for bestemmelse av momentkapasitet er hentet fra EC2 6.1(2):

- plane tverrsnitt forblir plane;
- tøyningen i armering eller spennkabler med heft, uavhengig av om de er i strekk eller trykk, er den samme som for betongen omkring;
- det ses bort fra betongens strekkfasthet;
- spenningen i betongen under trykk er utledet fra dimensjonerende spennings-tøyningssammenheng gitt i 3.1.7.
- spenningen i armeringsstål og spennstål er utledet fra de dimensjonerende kurvene i 3.2.8 (figur 3.8) og 3.3 (figur 3.10);
- den initielle tøyningen i spennkablene legges til grunn ved bestemmelsen av spenningene i spennkablene.

*Bilde 14: Forutsetninger ved bestemmelse av momentkapasitet, hentet fra EC2, 6.1(2).*

Forutsetningene i Bilde 14 ligger til grunn for så vel tradisjonell kapasitetsberegning som for lamellmetoden, og i så måte for beregningsprogrammet utarbeidet i denne oppgaven. Det første punktet som sier at plane tverrsnitt forblir plane betyr det samme som at det forutsettes lineær tøyningfordeling. Forutsetningen om full heft i punkt to, er i denne oppgaven også gjeldende for sammenhengen mellom betongens- og forsterkningsmaterialets tøyninger. Betongens strekkfasthet neglisjeres i alle deler av beregningsprogrammet utarbeidet i denne oppgaven, i henhold til punkt tre. Dette fremkommer også av lamellspenninger i Figur 17, ved at strekkspenningene er utelatt. Materialenes spenning-tøyningssammenheng tilfredsstiller punkt fire og fem, som beskrevet i kapittel 2.2. Forsterkningsmaterialets spenning-tøyningssammenheng forutsettes å følge Hookes lov helt til bruddtøyning oppnås, det vil si at det er lineært elastisk. For nærmere beskrivelse av forsterkningsmaterialet vises det til kapittel 2.2.1. Den siste forutsetningen i Bilde 14 er også gjeldende for programmet utviklet i denne oppgaven. Spennarmeringen starter med en initiell tøyning forskjellig fra tøyningen i det øvrige tverrsnittet (oppspenningstøyning), deretter følger spennarmeringstøyningen tverrsnittet for øvrig helt til bruddtøyning oppnås i ett av materialene.

## 2 Teori



Figur 17: Lamellmetodens forenkling av betongens tøyninger, spenninger og tverrsnittskrefter.

Lamellmetoden gir et estimat av momentkapasiteten til et tverrsnitt. Grunnen til at det kalles et estimat er både at beregningsforutsetningene som gjøres er tilnærminger til virkeligheten, samt at forutsetningen om lineær tøyingsfordeling blir forenklet i lamellmetoden. Det antas lineær tøyingsfordeling som vist i Figur 17. Denne antakelsen blir så forenklet til konstante tøyninger i lamellene, deretter omregnes disse til konstant spenning over lamellhøydene. Sammenhengen mellom tøyningen og spenningen i den enkelte lamell er en idealisering av virkeligheten og beregnes i henhold materialmodellen for betong, beskrevet i kapittel 2.2.2, i henhold til EC2 3.1.7(1):

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{for} \quad 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2}$$

Lamelltøyningene vist i Figur 17 følger den forutsatte lineære tøyingsfordelingen til tverrsnittet. Tøyningen i hver lamell beregnes i senter av lamellhøyden ved trekantbetraktning av tøyningen i over- og underkant av den lineære tøyingsfordelingen, tverrsnittshøyden og høyden opp til senter av den enkelte lamell. Lamellspenningene blir beregnet som beskrevet over, og til slutt beregnes kraftbidraget fra hver lamell ved å multiplisere spenningen med arealet til den enkelte lamell.

Tøyingsbidragene fra slakkarmering, spennarmering og forsterkning beregnes tilsvarende som lamellene, ved trekantbetraktning. Spenningene i de forskjellige materialene beregnes ved hjelp av spenning-tøyingsrelasjonene beskrevet i kapittel 2.2. Kraftbidragene blir så beregnet ved spenning multiplisert med areal for hvert enkelt lag av de forskjellige materialene.

Når alle kraftbidragene er beregnet for en bestemt krumningstilstand så summeres alle kreftene i bjelkens lengderetning. I likhet med beregning av momentkapasitet ved spenningsblokk kreves det aksiell likevekt i lamellmetoden før momentkapasiteten kan beregnes. Kravet vises i en utvidet formel basert på formel fra Nordhus, Steinnes, og Simpson (2011, 32):

$$N = \sum \left( \sigma_{c,i} \cdot \frac{h}{n} \cdot b_i \right) + (\sigma_p \cdot A_p) + (\sigma_s \cdot A_s) + (\sigma_{st} \cdot A_{st}) + (\sigma_f \cdot A_f) + p \approx 0$$

Hvor:

$\sigma_{c,i}$ = Spenning i lamell nummer i	$\sigma_s$ = Spenning i slakkarmering i strekk
$h$ = Tverrsnittshøyde	$A_s$ = Areal slakkarmering i strekk
$n$ = Antall lameller	$\sigma_{st}$ = Spenning i slakkarmering i trykk
$b_i$ = Lamellbredde	$A_{st}$ = Areal slakkarmering i trykk
$\sigma_p$ = Spenning i spennarmering	$\sigma_f$ = Spenning i forsterkningslag
$A_p$ = Spennarmeringsareal	$A_f$ = Forsterkningsareal
	$p$ = Ytre aksialkraft

For å oppfylle kravet om likevekt av krefter for en bestemt tøyning i vilkårlig høyde i tverrsnittet må det utføres iterasjoner. Om man eksempelvis søker å finne momentkapasiteten for en bestemt tøyning i underkant tverrsnitt så må man justere tøyningen i overkant tverrsnitt til man finner den krumningen som gir aksiell likevekt. Dette gjøres best ved bruk av programvare som Matlab, Excel med tillegget Visual Basic for Applications eller lignende. Når tøyningen i overkant som gir likevekt av krefter er funnet beregnes krumningen slik:

$$\frac{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{ok}}{h}$$

Hvor:

$\varepsilon_{uk}$ = Tøyning i underkant (strekk, positiv)
$\varepsilon_{ok}$ = Tøyning i overkant (trykk, negativ)
$h$ = Tverrsnittshøyde

Momentkapasiteten for en gitt krumningstilstand beregnes med en formel basert på formel fra Nordhus, Steinnes, og Simpson (2011, 32):

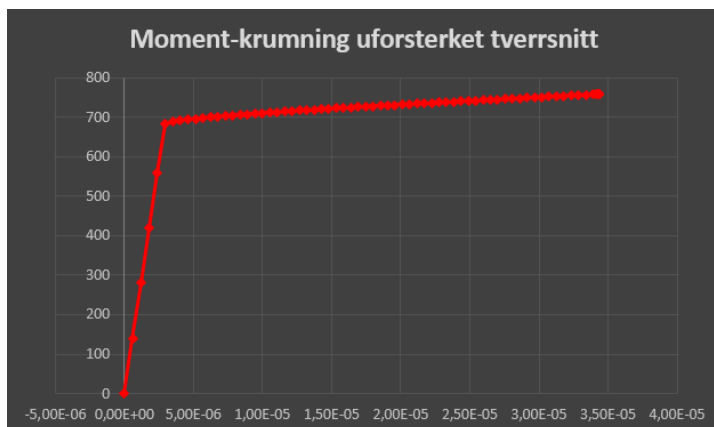
$$M = \sum \left( \sigma_{c,i} \cdot \frac{h}{n} \cdot b_i \cdot y_i \right) + (\sigma_p \cdot A_p \cdot y_p) + (\sigma_s \cdot A_s \cdot y_s) + (\sigma_{st} \cdot A_{st} \cdot y_{st}) + (\sigma_f \cdot A_f \cdot y_f)$$

Hvor:

$y_i$ = Avstand fra senter av lamell nummer i betongtverrsnittets arealsenter
$y_s$ = Avstand fra senter spennarmering til betongtverrsnittets arealsenter
$y_s$ = Avstand fra senter slakkarmering i strekk til betongtverrsnittets arealsenter
$y_{st}$ = Avstand fra senter slakkarmering i trykk til betongtverrsnittets arealsenter
$y_f$ = Avstand fra senter forsterkning (underkant tverrsnitt) til betongtverrsnittets arealsenter

## 2 Teori

Når momentet og krumningen for en krumningstilstand som gir likevekt av krefter er funnet, kan man plote ett punkt i et moment-krumningsdiagram. Man ønsker gjerne å plote flere punkter for å få frem hele moment-krumningsforløpet for det aktuelle tverrsnittet. Dette kan gjøres ved å starte med en liten tøyning i underkant, finne tøyningen i overkant som gir likevekt av krefter, så beregne moment og krumning. Deretter gjentas dette med en stadig økende tøyning i underkant tverrsnitt der hvert tøyningsteg gir ett punkt i moment-krumningsdiagrammet. For en viss tøyning i underkant tverrsnitt vil tøyningsgrensen til ett av materialene passeres når likevekt av krefter er funnet. Det er lite trolig at man treffer denne tøyningstilstanden nøyaktig. Dermed må det itereres mellom det punktet der en av tøyningsgrensene har passert, og punktet før grensen passeres. For den tilstanden der ønsket nøyaktighet er oppnådd kan man hente ut momentkapasiteten til tverrsnittet, tilhørende krumning samt de tøyninger man måtte ønske. Ut fra tøyningene kan man vurdere konstruksjonens bruddform.



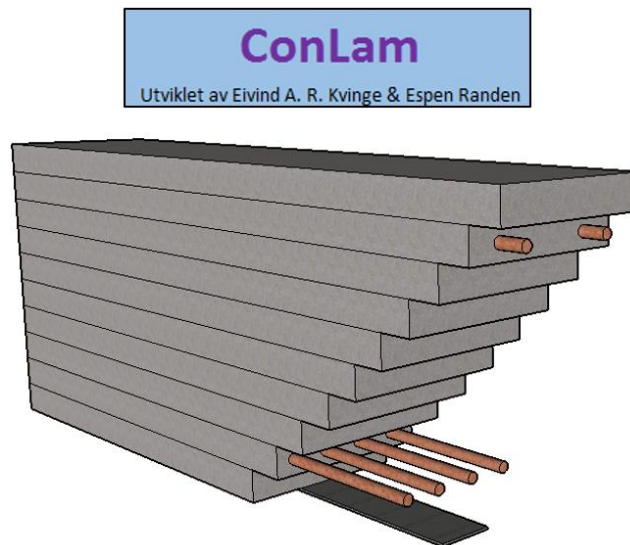
Figur 18 viser et eksempel på et moment-krumningsdiagram hentet fra programmet utviklet i denne oppgaven. I hvert punkt i grafen er det funnet aksiell likevekt for en bestemt tøyning i underkant tverrsnitt før punktet har blitt plottet. En kort sammenligning mellom lamellmetoden og spenningsblokk er vist i Tabell 6.

Figur 18: Moment-krumningsdiagram fra ConLam.

Lamellmetoden	Spenningsblokk
<ul style="list-style-type: none"><li>• Gir et rimelig nøyaktig resultat</li><li>• Gir i flere tilfeller bedre kapasitet → kostbesparende</li><li>• Beregningene er uavhengig av om tverrsnittet er over- eller underarmert</li><li>• Få og enkle formler, men mange trekantbetraktninger</li><li>• Mange repeterende beregninger, krever datakraft</li><li>• Gir hele moment-krumningsforløpet</li><li>• Gir tøyningene i materialene i tverrsnittet ved vilkårlig moment → Relevant ved forsterkning</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nøyaktig nok</li><li>• I flere tilfeller mer konservativ, men ikke alltid</li><li>• Beregningene skiller mellom over- og underarmerte tverrsnitt</li><li>• Noe mer innfløkt beregningsgang</li><li>• Kan utføres ved håndberegning</li><li>• Gir kun momentkapasitet</li><li>• Gir kun tøyningstilstanden til materialene ved brudd</li></ul>

Tabell 6: Sammenligning mellom lamellmetoden og spenningsblokk.

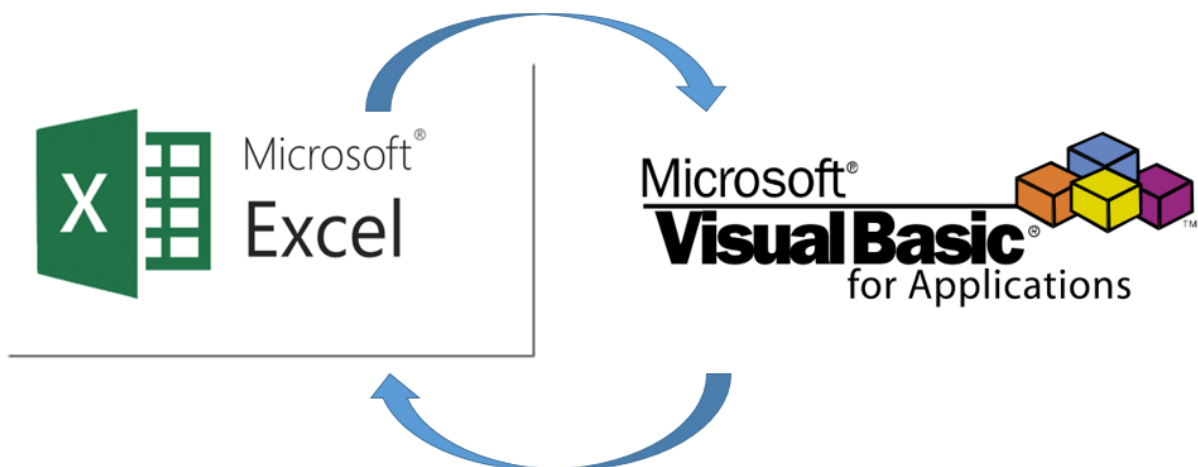
### 3 ConLam – Beregningsprogram



Figur 19: Illustrasjon fra ConLam beregningsprogram.

Beregningsprogrammet består av en del som foregår i MS Excel 2013, og en del som foregår i Visual Basic for Applications (heretter kalt VBA). Alle inputverdier, materialegenskaper og brukergrensesnittet ligger i Excel mens de store beregningene blir gjort i VBA, som til slutt sender resultatene tilbake til Excel. Den viktigste årsaken til at det er bygget opp slik, er at Excel ikke er i stand til å gjøre de nødvendige iterative beregninger som er essensielle ved bruk av lamellmetoden. En fordel er at det er enkelt å lage et ryddig og oversiktlig oppsett i Excel, samt at utviklingen av programmet gjøres på en logisk måte i VBA. Brukeren trenger bare å forholde seg til Excel-delen av programmet ved dimensjonering av karbonfiberforsterkede betongtverrsnitt.

Dette kapitlet tar først for seg grensesnittet, og gir en innføring i bruken av ConLam. Deretter kommer en beskrivelse av programmets virkemåte, fulgt av begrensninger, videreutvikling og forbedringer.



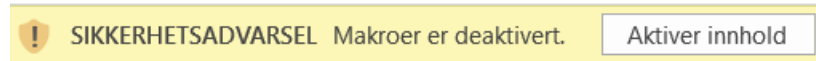
Figur 20: Samhandling mellom Excel og VBA.

## 3 ConLam - Beregningsprogram

### 3.1 Brukergrensesnitt

#### 3.1.1 Oppstart

Ved oppstart av ConLam kan det komme opp en sikkerhetsadvarsel, som vist i Bilde 15. Dersom dette skulle hende, må brukeren trykke på «Aktiver innhold» for å kunne benytte programmet.



Bilde 15: Sikkerhetsadvarsel ved oppstart av ConLam.



VBA kan ha problemer med beregninger dersom brukeren har flere eksempler av ConLam oppe samtidig på samme datamaskin. Det anbefales derfor å ha kun et Excel-ark med ConLam åpent på datamaskinen.

Excel-regnearket er låst for å unngå at brukeren ved en feil overskriver formler som ligger bak celler. Om det likevel skulle være ønskelig å låse opp regnearket, er passordet:

#### **karbon**

Ved oppstart av beregninger kan det være hensiktsmessig å nullstille input-verdier i regnearket, men det er ikke påkrevd. Dette gjøres ved å benytte knappen «Reset input» i toppen av regnearket. Gjennom regnearket er det i tillegg flere reset-knapper som nullstiller bare deler av input-verdiene.

Generelt for regnearket gjelder følgende:

Celler med		Verdier fylles inn av bruker
Celler med		Faste verdier, skal ikke fylles inn av bruker

Brukeren kan i utgangspunktet arbeide kun i arket «Input og resultater» i ConLam, men det kan likevel være av interesse for brukeren å se på bakgrunnsberegninger i andre ark i programmet. I Tabell 7 er det presentert en kort beskrivelse av hva man kan finne i de ulike arkene i programmet.

Arknavn	Beskrivelse
<b>Input og resultater</b>	Hovedarket i ConLam. Her er all brukerinnt, og presentasjon av resultater. Dette er delt i to kolonner: Venstre (grå) inneholder input, høyre (blå) inneholder resultater. Til høyre for input-kolonne i «Input og resultater» er det lagt inn diverse kommentarer og henvisninger.
<b>Beregning uforsterket</b>	Presenterer alle beregnede punkter for moment-krumningsrelasjonen til det uforsterkede tverrsnittet, inkludert trykksonehøyde og tøyninger i aktuelle materialer.
<b>Beregning forsterket</b>	Presenterer alle beregnede punkter for moment-krumningsrelasjonen til det forsterkede tverrsnittet, inkludert trykksonehøyde og tøyninger i aktuelle materialer.
<b>Beregning bruksgrense kar.</b>	Presenterer alle beregnede punkter for moment-krumningsrelasjonen til det forsterkede tverrsnittet i bruksgrense for karakteristisk lastkombinasjon, inkludert trykksonehøyde og tøyninger i aktuelle materialer.
<b>Beregning bruksgrense TP</b>	Presenterer alle beregnede punkter for moment-krumningsrelasjonen til det forsterkede tverrsnittet i bruksgrense for tilnærmet permanent lastkombinasjon, inkludert trykksonehøyde og tøyninger i aktuelle materialer.
<b>Bøyestivhet</b>	Presenterer alle beregnede punkter for moment-krumningsrelasjonen som benyttes til å finne grenseverdier til beregning av bøyestivhet, inkludert trykksonehøyde og tøyninger i aktuelle materialer.
<b>Materialmodeller</b>	Presenterer materialmodeller som blir benyttet i beregningen. Gjelder både betong, slakk- og spennarmering, og CFRP-forsterkning.
<b>Bakgrunn</b>	Inneholder oppslagstabeller for materialelegenskaper til betongkvalitetsklasse, og tverrsnittstyper. Input til nedtrekksmenyer.
<b>Bakgrunnsberegninger</b>	Beregninger som lager plottet av tverrsnittet i «Input og resultater», beregninger av E-modul i fastning til både slakk- og spennarmering, samt verdi som benyttes til valgt betongkvalitet (men ikke trengtes å vises i hovedarket, «Input og resultater»).

Tabell 7: Oversikt over de ulike arkene i ConLam

### 3 ConLam - Beregningsprogram

#### 3.1.2 Input uforsterket tverrsnitt

##### Tverrsnitt, geometri

Brukeren må først velge tverrsnittstype fra nedtrekksmeny, og deretter taste inn aktuelle tverrsnittsmål, se Figur 21. Det er mulig å nullstille tverrsnittsmål med knappen «Reset tverrsnittsmål». ConLam håndterer beregninger av rektangulære og T-tverrsnitt. T-tverrsnitt kan ha varierende tykkelse på flens, og varierende bredde på steget, som eksemplifisert i Figur 22. Det er viktig å merke seg at dette gjelder kun med tykkere flens inn mot steg sammenlignet med tykkelsen på enden av utstikk (flens kan ikke være tykkest ytterst på utstikkende flens), og bredere steg i toppen sammenlignet med bunnen (steg kan ikke være tykkest i bunn).

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

Tverrsnittstype: T (Rektangel)

Reset tverrsnittsmål

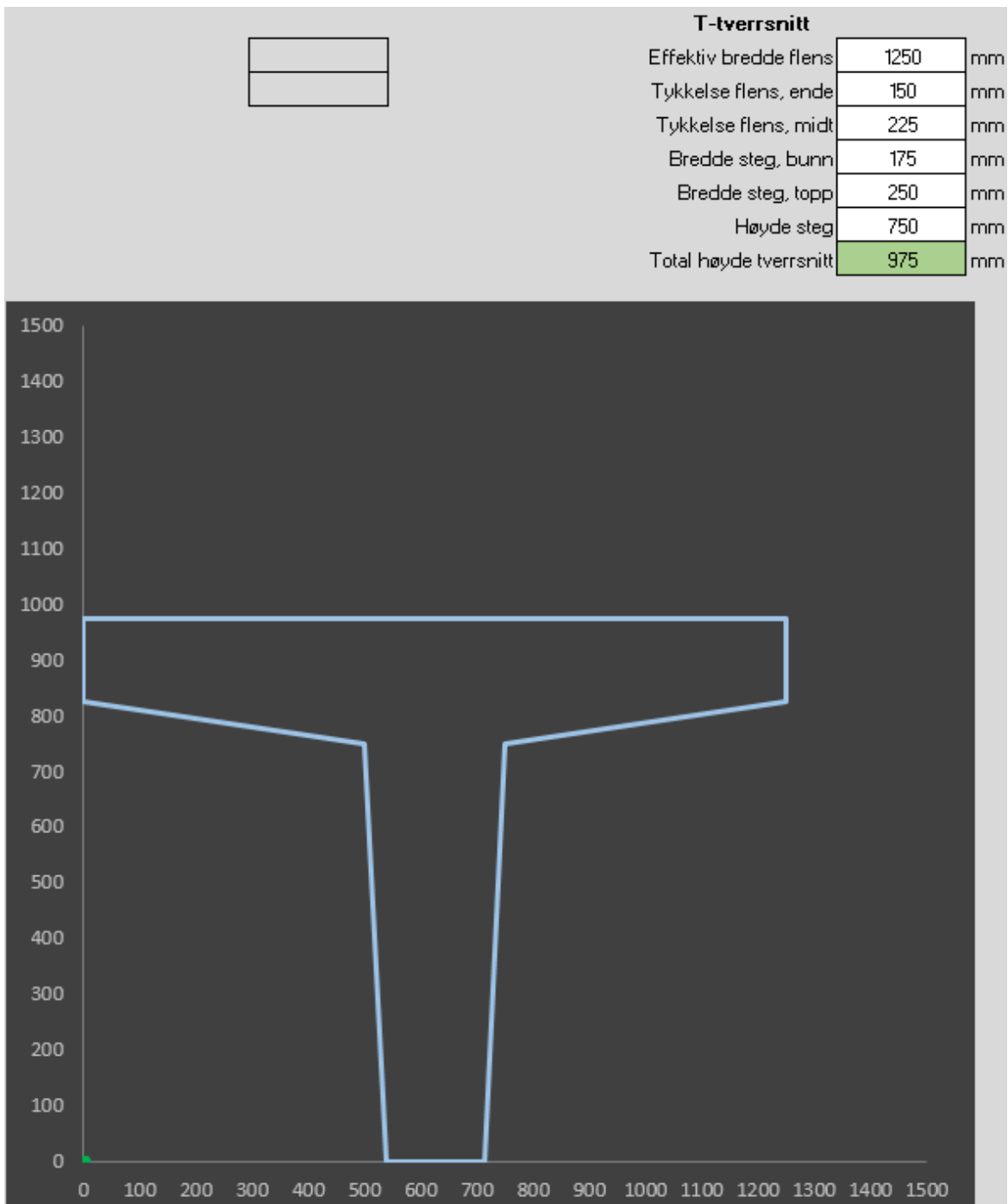
Fyll inn tverrsnittsmål:

T-tverrsnitt

Effektiv bredde flens		mm
Tykkelse flens, ende		mm
Tykkelse flens, midt		mm
Bredde steg, bunn		mm
Bredde steg, topp		mm
Høyde steg		mm
Total høyde tverrsnitt	0	mm

Figur 21: Input av tverrsnittstyper og -mål i ConLam.





Figur 22: T-tverrsnitt med varierende tykkelse og bredde i ConLam.

Videre må det legges inn aktuelle overdekninger på strekk- og trykksiden av konstruksjonselementet, samt fri avstand mellom armeringslagene i vertikal retning dersom det er armering i flere lag, se Figur 23. Disse verdiene gjelder kun for slakkarmeringen, og styrer utregningen av momentarmer/effektive høyder ( $d$ ). Det er av den grunn viktig at disse blir tastet inn for at beregningene av kapasiteter skal bli korrekte.

### 3 ConLam - Beregningsprogram

Overdekning strekkarmering	$c_{\text{nom.strekk}} =$	45	mm
Overdekning trykkarmering	$c_{\text{nom.trykk}} =$	35	mm
Fri vertikalavstand (strekklag)	$a_{\text{v.strekk}} =$	40	mm
Fri vertikalavstand (trykklag)	$a_{\text{v.trykk}} =$	40	mm

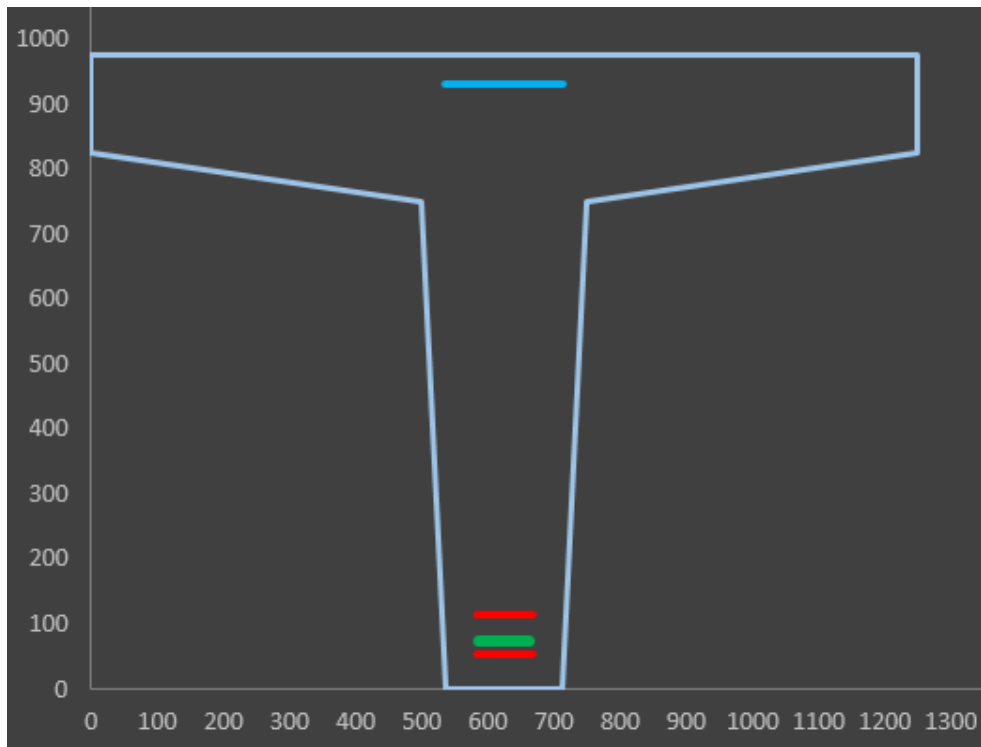
Figur 23: Input av overdekning og avstander mellom armeringslag i ConLam.

Etter betongtverrsnittet er definert må brukeren legge inn aktuell armeringsmengde, se Figur 24. ConLam håndterer opp til 4 lag med slakkarmering i strekk, 4 lag med slakkarmering i trykk, og 2 lag med spennarmering. Om det skulle være flere lag med armering i den aktuelle konstruksjonen, så er det mulig å regne om til ekvivalent armeringsmengde og effektiv høyde (d). Det man da går glipp av, er presentasjon av tøyninger i de ulike armeringslagene i resultatdelen av ConLam. Armeringslagene må legges inn fra lag 1, som er det ytterste laget. Dersom man for eksempel har kun et lag trykkarmering, så må denne legges inn i lag 1.

Det er mulig å nullstille de ulike typene armering ved hjelp av «Fjern»-knappene i regnearket. Slakkarmering legges inn med armeringsstengens diameter og antall stenger. Armeringsareal og effektiv høyde på ulike lag regnes da automatisk ut. Når det gjelder spennarmeringen må brukeren legge inn areal på spennkabel og antall kabler, samt at effektiv høyde er brukerstyrt. Innlagt armering vil vises i figuren av tverrsnittet øverst i regnearket, se Figur 25. Her vises slakkarmering i trykk med blå farge, slakkarmering i strekk med rød farge, og spennarmering med grønn farge.

Slakkarmering				
Strekk				
	Ø [mm]	n	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]
Lag 1	20	2	628,3	920
Lag 2	20	4	1256,6	860
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0
Fjern				
Trykk				
	Ø [mm]	n	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	16	6	1206,4	43
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0
Fjern				
Spennarmering				
	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	n	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1	1400	1	1400,0	900
Lag 2			0,0	
Fjern				

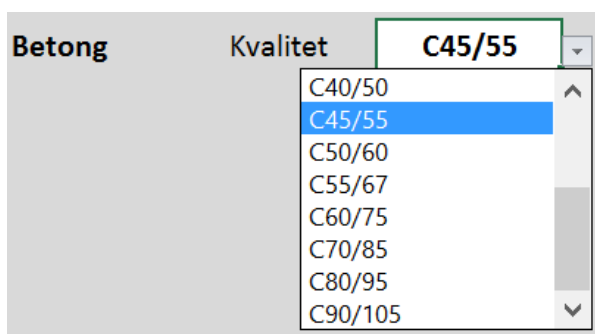
Figur 24: Input av armeringsstål i ConLam.



Figur 25: Tverrsnitt med innlagt armering i ConLam.

### Materialegenskaper, betong

Neste steg er valg av materialegenskaper. Betongkvalitet velges fra nedtrekksmeny, se Figur 26, og dekker kvaliteter fra C12/15 til C90/105. Tilhørende materialegenskaper hentes da fra tabell «Materialdata betong» som ligger i arket «Bakgrunn» i ConLam, og relevante verdier vises i «Input og resultater», se Figur 27. Verdiene i denne tabellen er i henhold til tabell 3.1 i EC2.



Figur 26: Valg av betongkvalitet i ConLam.

### 3 ConLam - Beregningsprogram

<b>Betong</b>	Kvalitet	<input type="text" value="C45/55"/>	$f_{ck} =$	<input type="text" value="45,0"/>	N/mm <sup>2</sup>	
			$f_{cd} =$	<input type="text" value="25,5"/>	N/mm <sup>2</sup>	
			$f_{cm} =$	<input type="text" value="53,0"/>	N/mm <sup>2</sup>	
		$\gamma_c =$	<input type="text" value="1,5"/>	$\epsilon_{c2} =$	<input type="text" value="2,0"/>	%
		$\alpha_{cc} =$	<input type="text" value="0,85"/>	$\epsilon_{cu2} =$	<input type="text" value="3,5"/>	%
				$E_{cm} =$	<input type="text" value="36000"/>	N/mm <sup>2</sup>
				Selvalgt E-modul, $E'_c =$	<input type="text"/>	N/mm <sup>2</sup>
				E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet, $E_c =$	<input type="text" value="36000"/>	N/mm <sup>2</sup>

Figur 27: Materialegenskaper betong fra ConLam.

E-modulen benyttes kun til beregninger av bøyestivheten til det forsterkede tverrsnittet. Denne kan overstyres av brukeren, slik at man har mulighet til å legge inn beregnet eller testet verdi. For å gjøre dette er det bare å legge inn ønsket verdi i cellen  $E'_c$  (selvalgt E-modul). Det er E-modulen fra cellen  $E_c$  som blir benyttet i beregningen av bøyestivhet.

Materialfaktor til betong i bruddgrensetilstand,  $\gamma_c$ , og koeffisient som tar hensyn til virkninger av langtidslast på trykkfastheten samt ugunstige virkninger som er en følge av måten lasten påføres,  $\alpha_{cc}$ , er lagt inn med verdier fra nasjonalt tillegg i EC2. Henholdsvis 1,5 og 0,85. Disse kan overstyres av brukeren om det skulle være nødvendig.

#### Materialegenskaper, armeringsstål

Brukerinput for armeringsstål er karakteristisk flytegrense  $f_{yk}$ , strekkfasthet  $f_t$ , dimensjonerende E-modul (frem til flytegrense)  $E_{sd1}$ , dimensjonerende grensetøyning  $\epsilon_{ud}$ , karakteristisk tøyning ved største last  $\epsilon_{uk}$ , og materialfaktor i bruddgrensetilstand  $\gamma_s$ , se Figur 28. Materialfaktoren er lagt inn med verdien 1,15 fra nasjonalt tillegg i EC2. Denne kan overstyres av brukeren om det skulle være nødvendig.

Inputen av strekkfasthet  $f_t$  styrer fastningen til stålet. Dersom brukeren ikke ønsker å regne med fastning må man sette  $f_t = f_{yk}$  (eksempelvis settes begge til 500 MPa). Aktuelle grensetøyninger legges inn i henhold til relevant armeringsstandard eller EC2.

<b>Armeringsstål</b>		$\gamma_s =$	<input type="text" value="1,15"/>	$f_{yk} =$	<input type="text" value="500"/>	N/mm <sup>2</sup>
				$f_{yd} =$	<input type="text" value="434,8"/>	N/mm <sup>2</sup>
				$f_t =$	<input type="text" value="600"/>	N/mm <sup>2</sup>
				$E_{sd1} =$	<input type="text" value="200000"/>	N/mm <sup>2</sup>
				$E_{sd2} =$	<input type="text" value="1194"/>	N/mm <sup>2</sup>
				$\epsilon_{ud} =$	<input type="text" value="30,0"/>	%
				$\epsilon_{uk} =$	<input type="text" value="75,0"/>	%
				$\epsilon_{yd} =$	<input type="text" value="2,17"/>	%

Figur 28: Materialegenskaper armeringsstål fra ConLam.

### Materialelegenskaper, spennstål

Brukerinput for spennstål er karakteristisk strekkfasthet  $f_{pk}$ , 0,1-strekkgrense  $f_{p0,1k}$ , dimensjonerende E-modul (frem til flytegrense)  $E_{p1}$ , dimensjonerende grensetøyning  $\epsilon_{pud}$ , tøyning i oppspent tilstand inkludert tap  $\epsilon'_{p0}$ , og materialfaktor i bruddgrensetilstand  $\gamma_s$ , se Figur 29. Materialfaktoren er lagt inn med verdien 1,15 fra nasjonalt tillegg i EC2. Denne kan overstyres av brukeren om det skulle være nødvendig.

Spennstål				
	$\gamma_s =$	<input type="text" value="1,15"/>		
			$f_{pk} =$	<input type="text" value="1700"/> N/mm <sup>2</sup>
			$f_{p0,1k} =$	<input type="text" value="1550"/> N/mm <sup>2</sup>
			$f_{pd} =$	<input type="text" value="1347,8"/> N/mm <sup>2</sup>
		$f_{pd,maxs} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s =$	<input type="text" value="1401,7"/>	N/mm <sup>2</sup>
			$E_{p1} =$	<input type="text" value="195000"/> N/mm <sup>2</sup>
			$E_{p2} =$	<input type="text" value="17458"/> N/mm <sup>2</sup>
	Dimensjonerende bruddtøyning		$\epsilon_{pud} =$	<input type="text" value="10,0"/> ‰
	Dimensjonerende flytetøyning		$\epsilon_{pd} =$	<input type="text" value="6,91"/> ‰
	Oppspenningstøyning inkl. tap		$\epsilon'_{p0} =$	<input type="text" value="6,30"/> ‰

Figur 29: Materialelegenskaper spennstål fra ConLam.

**NB! For at beregninger av momentkapasitet i bruksgrensetilstand (karakteristisk og tilnærmet permanente lastkombinasjoner) skal fungere er det viktig at det ligger inne verdier på  $f_{yk}$ ,  $f_t$  og  $f_{pk}$ , selv om det ikke skulle være denne type armering i det aktuelle tverrsnittet!**

### Lamellinndeling

Etter geometri og materialelegenskaper er definert må brukeren velge antall lameller tverrsnittshøyden skal deles inn i ved beregninger, se Figur 30. Her anbefales det at brukeren tester ut et par verdier med relativt stor spredning, og sammenligner resultatene. Tilstrekkelig antall lameller vil variere avhengig av kompleksiteten og størrelsen på tverrsnittet som skal beregnes.

Lamellinndeling av tverrsnitt (hele høyden):	
Ønsket nøyaktighet	$n =$ <input type="text" value="500"/> antall lameller

Figur 30: Valg av antall lameller i ConLam.

#### Ytre aksialkraft

Dersom tverrsnittet er utsatt for en ytre trykkraft skal denne legges inn med positiv verdi, og i kN, se Figur 31. ConLam er ikke bygd opp til å beregne konstruksjonselementer med strekkbelastning i kombinasjon med bøyemoment. Brukeren vil få en feilmelding om det legges inn strekkraft (her negativ verdi).

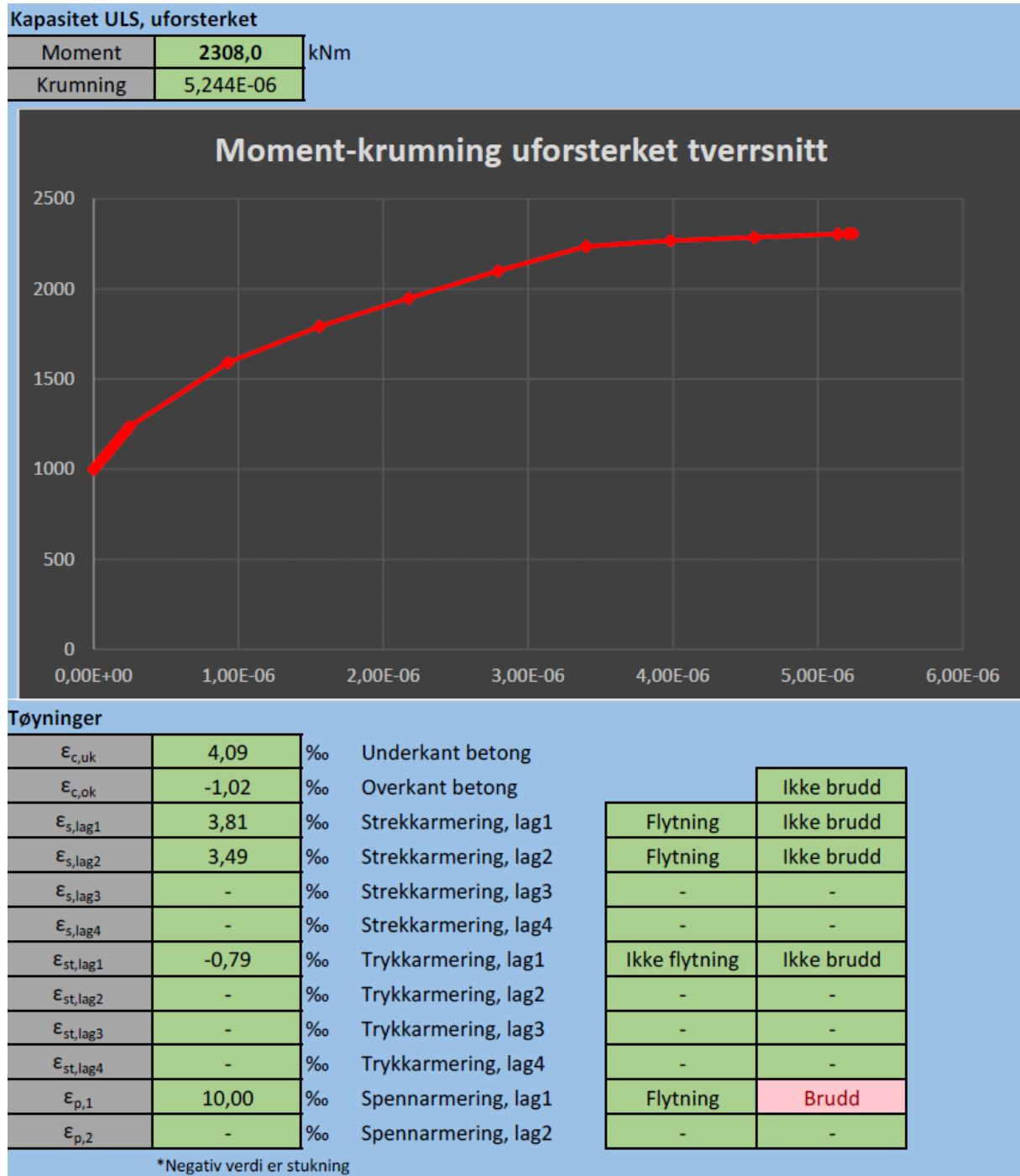
<b>Ytre aksialkraft</b>	P = <input type="text"/> kN
Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.	

Figur 31: Ytre aksialkraft i ConLam.

#### 3.1.3 Beregning og resultat for uforsterket tverrsnitt

Før brukeren utfører beregninger av det uforsterkede tverrsnittet, må man fjerne eventuelle gamle verdier som ligger igjen fra tidligere beregninger. Dette gjøres ved å trykke på knappen «Reset verdier før beregning». Dette er ikke nødvendig om man har nullstilt hele regnearket («Reset input»), men det gjør ingen skade om man også nullstiller her, da denne operasjonen kun nullstiller verdier fra beregning, og ikke input-verdier.

For å utføre beregninger av det uforsterkede tverrsnittet må brukeren trykke på knappen «Beregn uforsterket tverrsnitt». Dette vil føre til at en iterativ prosess, lignende den som er beskrevet i kapittel 3.2, starter og kjøres i bakgrunnen, og resultatene blir presentert i den høyre (blå) kolonnen under «Input og resultater», som vist i Figur 32.



Figur 32: Eksempel på resultater fra beregning av uforsterket tverrsnitt i ConLam.

Resultatene viser momentkapasitet i bruddgrensetilstand og tilhørende krumning til det valgte tverrsnittet uten forsterkning, samt hele forløpet av denne relasjonen i en graf. I tillegg presenteres tøyning i aktuelle materialer, om ulike armeringslag har gått i flytning, samt hvilken bruddform som begrenser kapasiteten.

### 3 ConLam - Beregningsprogram

Nøyaktigheten i bruddgrensetøyninger for de ulike materialene er lagt inn i kodingen i VBA. I kapasitetsberegninger av uforsterket tverrsnitt er nøyaktigheten satt til  $\pm 0,001\%$  for betong, og  $\pm 0,01\%$  for slakk- og spennarmering. Dette, i kombinasjon med at opptredende tøyninger ved brudd er oppgitt med to desimaler i resultatene, gjør at man kan oppleve at for eksempel spennarmering med tøyning på 9,99 % er angitt med «Brudd», selv om oppgitt bruddtøyning er på 10,0 %. En nærmere beskrivelse av denne kodingen er gitt i kapittel 3.2.2.

Dersom brukeren ønsker å se nærmere på resultater fra de ulike stegene i den iterative prosessen som ligger til grunn for plottingen av moment-krumningsrelasjonen, kan dette ses i arket «Beregning uforsterket». Tabell 8 viser eksempel på dette. Hvordan beregningene utføres er nærmere beskrevet i kapittel 3.2. Der er prosedyren for beregning av forsterket tverrsnitt beskrevet i detalj, men da beregning av uforsterket tverrsnitt er relativt likt, henvises det til denne beskrivelsen og vedlagte VBA-kodinger for å sette seg inn i beregningsprosedyren.



Moment [kNm]	Krumming	Trykk- sone [mm]	$\epsilon_{c,uk}$	$\epsilon_{c,ok}$	$\epsilon_{As1}$	$\epsilon_{As2}$	$\epsilon_{As3}$	$\epsilon_{As4}$	$\epsilon_{A11}$	$\epsilon_{A12}$	$\epsilon_{A13}$	$\epsilon_{A14}$	$\epsilon_{Ap1}$	$\epsilon_{Ap2}$
999,1	0,00E+00		-0,0001598	-0,000159839										
1022,3	2,443E-08		-0,0001439	-0,000167679	-0,000145199	-0,000146565	0,000000000	0,000000000	-0,000166629	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006154312	0,000000000
1045,6	4,890E-08		-0,0001279	-0,000175551	-0,000130561	-0,000133495	0,000000000	0,000000000	-0,000173449	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006168461	0,000000000
1069,0	7,340E-08		-0,0001119	-0,000183457	-0,000115925	-0,000120329	0,000000000	0,000000000	-0,000180301	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006182607	0,000000000
1092,4	9,794E-08		-0,0000959	-0,000191397	-0,000101290	-0,000107167	0,000000000	0,000000000	-0,000187186	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006196751	0,000000000
1116,0	1,225E-07		-0,0000799	-0,000199372	-0,000086658	-0,000094009	0,000000000	0,000000000	-0,000194104	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006210892	0,000000000
1139,6	1,471E-07		-0,0000639	-0,000207381	-0,000072028	-0,000080855	0,000000000	0,000000000	-0,000201055	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006225030	0,000000000
1163,2	1,718E-07		-0,0000480	-0,000215425	-0,000057399	-0,000067705	0,000000000	0,000000000	-0,000208039	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006239166	0,000000000
1187,0	1,964E-07		-0,0000320	-0,000223503	-0,000042772	-0,000054559	0,000000000	0,000000000	-0,000215056	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006253299	0,000000000
1210,8	2,212E-07		-0,0000160	-0,000231617	-0,000028148	-0,000041418	0,000000000	0,000000000	-0,000222107	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006267429	0,000000000
1234,7	2,459E-07	975,0	0,0000000	-0,000239767	-0,000013525	-0,000028280	0,000000000	0,000000000	-0,000229182	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006281556	0,000000000
1591,0	9,267E-07	435,4	0,0005000	-0,000403518	0,000449032	0,000393431	0,000000000	0,000000000	-0,000363671	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,006730499	0,000000000
1792,5	1,559E-06	333,4	0,0010000	-0,000519570	0,000914281	0,000820769	0,000000000	0,000000000	-0,000452553	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,007183110	0,000000000
1948,0	2,176E-06	285,5	0,0015000	-0,000621137	0,001380346	0,001249815	0,000000000	0,000000000	-0,000527589	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,007636836	0,000000000
2099,9	2,791E-06	258,4	0,0020000	-0,000721142	0,001846500	0,001679045	0,000000000	0,000000000	-0,000601133	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,008090681	0,000000000
2235,8	3,403E-06	240,3	0,0025000	-0,000817513	0,002312858	0,002108704	0,000000000	0,000000000	-0,000671202	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,008544807	0,000000000
2268,1	3,964E-06	222,0	0,0030000	-0,000884402	0,002780880	0,002541840	0,000000000	0,000000000	-0,000713090	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,009001200	0,000000000
2287,0	4,561E-06	207,6	0,0035000	-0,000946613	0,003249165	0,002975528	0,000000000	0,000000000	-0,000750506	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,009457953	0,000000000
2304,8	5,136E-06	196,2	0,0040000	-0,001007494	0,003717526	0,003409373	0,000000000	0,000000000	-0,000786651	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,009914808	0,000000000
2304,8	5,136E-06	196,2	0,0040000	-0,001007494	0,003717526	0,003409373	0,000000000	0,000000000	-0,000786651	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,009914808	0,000000000
2307,0	5,208E-06	194,9	0,0040625	-0,001015000	0,003776077	0,003453615	0,000000000	0,000000000	-0,000791069	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,009971923	0,000000000
2308,0	5,244E-06	194,3	0,0040938	-0,001018754	0,003805352	0,003490737	0,000000000	0,000000000	-0,000793279	0,000000000	0,000000000	0,000000000	0,0100000480	0,000000000

Tabell 8: Resultater fra steg i den iterative beregningen av uforsterket tvversnitt i ConLam.

### 3 ConLam - Beregningsprogram

#### 3.1.4 Input forsterket tverrsnitt

##### Initialtilstand

Initialtilstanden i tverrsnittet må defineres for å få beregnet korrekt kapasitet til tverrsnittet med utenpåliggende forsterkning. Dette gjøres ved å legge inn verdi på momentet i tverrsnittet når forsterkningen blir montert på konstruksjonselementet, se Figur 33. ConLam har på forhånd regnet ut grenseverdier for momentet som skal legges inn, og dette vises til høyre for celle for input av initialmoment,  $M_0$ . Ved input av verdier utenfor grensene vil brukeren få opp feilmelding.

Initialtilstand	
Last ved påføring av forsterkning, initialmoment	(karakteristiske verdier)
$M_0 = $ <input type="text" value="1500,0"/> kNm	Minimumsverdi: 1021,4 kNm Maksimal verdi: 2308,0 kNm

Figur 33: Initialmoment i ConLam.

Når det gjelder grenseverdien for minimum  $M_0$  angir denne den ytre belastningen som skal til for at tverrsnittet skal ha null krumning, mens maksimal verdi angir tverrsnittets dimensjonerende momentkapasitet i uforsterket tilstand. Dersom konstruksjonselementet for eksempel totalavlastes før og under påføring av forsterkning vil det være riktig å legge inn minimumsverdi på  $M_0$ . Med totalavlastning menes da at elementet jekkes opp til null krumning / null nedbøyning. Det er viktig å merke seg at det likevel vil være tøyninger i underkant av tverrsnittet, i form av stukning, dersom tverrsnittet har spennarmering eller påført ytre aksialtrykkraft. Se ellers kapittel 2.3 for utførelse av påliming av fiberforsterkning.

##### Materiallegenskaper, FRP-forsterkning

Brukerinput for forsterkningsmaterialet er laminatets tykkelse og bredde, samt antall lag som skal monteres utenpå hverandre. Videre må det legges inn E-modul for materialet, karakteristisk bruddtøyning og materialfaktor i bruddgrensetilstand, se Figur 34. Materialfaktoren er kun med i beregningen av alternativer til dimensjonerende grensetøyning, så det er ikke nødvendig å legge inn denne for å kunne utføre beregninger på det forsterkede tverrsnittet.

ConLam presenterer to alternativer til dimensjonerende grensetøyning for CFRP-materialet. Det første alternativet er et rent materialbrudd ved strekkbelastning, mens det andre er en grense som søker å forhindre delaminering i forsterkningsmaterialet forårsaket av mellomliggende riss i henhold til ACI (2008). Disse verdiene er kun presentert for å gi brukeren litt teoretisk grunnlag for eventuelt valg av grensetøyning, da det er brukeren selv som må legge inn ønsket dimensjonerende tøyningsgrense,  $\epsilon_{fd}$ , som skal benyttes i beregningene. Denne grensen er som oftest oppgitt av leverandøren av det aktuelle CFRP-produktet, og varierer avhengig av produkt og leverandør.

**Forsterkningsmateriale**

$V_{fm} =$

Tykkelse laminat	$t_f =$	<input type="text" value="1,4"/>	mm
Bredde laminat	$b_f =$	<input type="text" value="100"/>	mm
Antall lag	$n_f =$	<input type="text" value="2"/>	stk
Areal	$A_f =$	<input type="text" value="280"/>	mm <sup>2</sup>
	$E_f =$	<input type="text" value="165000"/>	N/mm <sup>2</sup>
	$\varepsilon_{fk} =$	<input type="text" value="15,1"/>	%

Alternativer til dimensjonerende tøyningsgrense:

$\varepsilon_{fd} = \varepsilon_{fk} / V_{fm} =$	<input type="text" value="12,583"/>	%
$\varepsilon_{fd,ACI} =$	<input type="text" value="3,046"/>	%

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$\varepsilon_{fd} =$   %

Figur 34: Materialegenskaper forsterkning fra ConLam.

### 3.1.5 Beregning og resultat for forsterket tverrsnitt

#### Kapasitetsberegning, brudd- og bruksgrense

For å beregne kapasiteten til tverrsnittet med forsterkning må brukeren først beregne initialtøyningen i underkant av betongtverrsnittet. Dette er som nevnt initialtilstanden når forsterkningen monteres utenpå betongen. For å beregne denne må brukeren trykke på knappen «Beregn initialtøyning» etter å ha lagt inn initialmomentet  $M_0$ , som vist i Figur 33. Resultatet blir presentert i høyre kolonne i «Input og resultater», som vist i Figur 35.

**Initialtøyning**

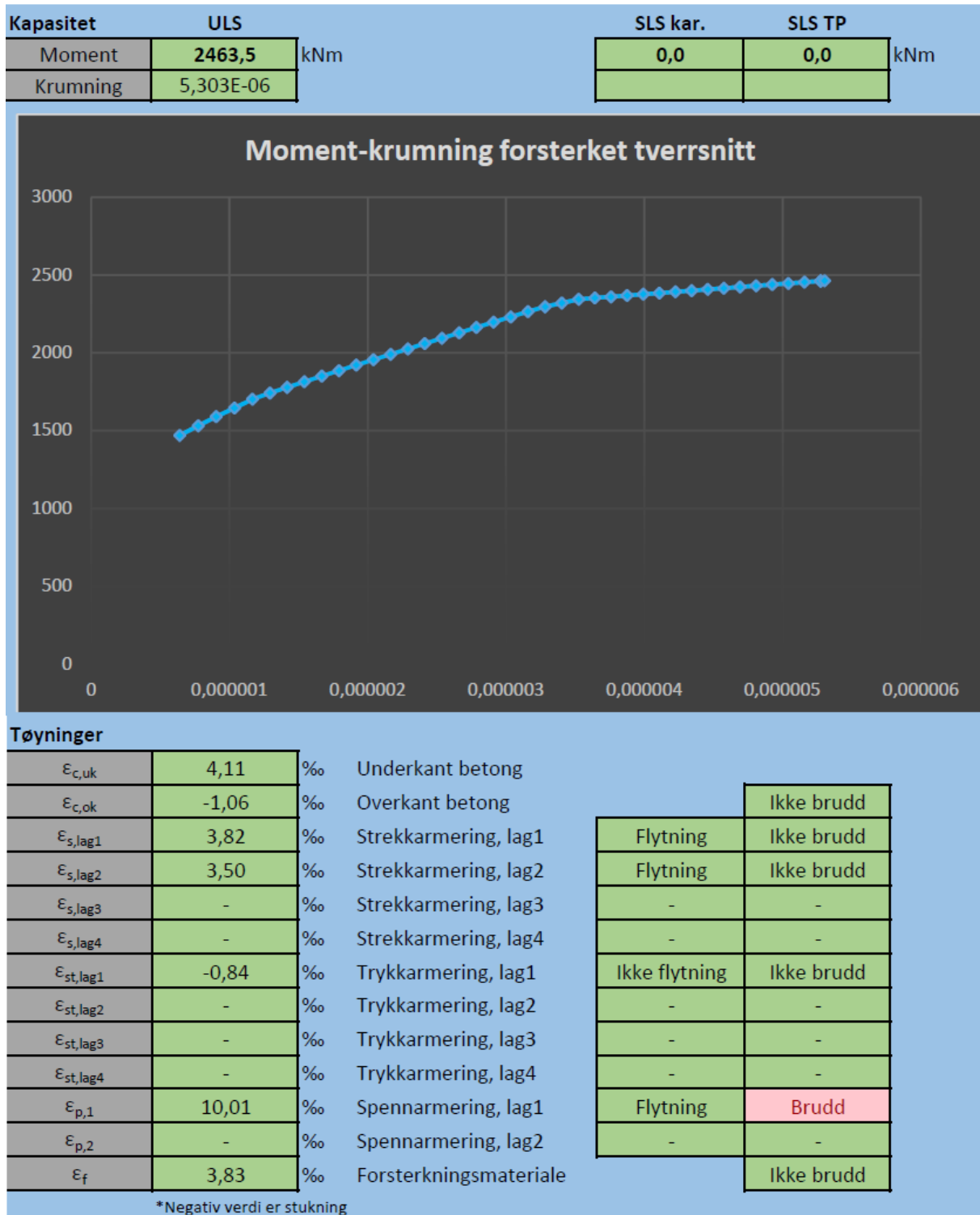
$\varepsilon_{uk,initial} =$   %

Tøyning i underkant betong ved påføring av utenpåliggende forsterkning.

Figur 35: Resultat av beregning initialtøyning i ConLam.

Før brukeren utfører beregninger av det forsterkede tverrsnittet, må man fjerne eventuelle gamle verdier som ligger igjen fra tidligere beregninger. Dette gjøres ved å trykke på knappen «Reset verdier før beregning». Deretter kan brukeren utføre videre beregninger av det forsterkede tverrsnittet ved å trykke på knappen «Beregn forsterket tverrsnitt». Dette vil føre til at den iterative prosessen som er beskrevet i kapittel 3.2.2 starter og kjøres i bakgrunnen, og resultatene blir presentert i den høyre (blå) kolonnen under «Input og resultater», som vist i Figur 36.

### 3 ConLam - Beregningsprogram



Figur 36: Eksempel på resultater fra beregning av tverrsnitt med forsterkning i ConLam.

Resultatene viser momentkapasitet i bruddgrensetilstand og tilhørende krumning til det valgte tverrsnittet med forsterkning, samt hele forløpet av denne relasjonen i en graf. I tillegg presenteres tøyning i alle aktuelle materialer, om ulike armeringslag har gått i flytning, samt hvilken bruddform som begrenser kapasiteten.

Som nevnt i kapittel 3.1.3, er nøyaktigheten i bruddgrensetøyninger for de ulike materialene lagt inn i kodingen i VBA. I kapasitetsberegninger av forsterket tverrsnitt er nøyaktigheten satt til  $\pm 0,001\%$  for betong og forsterkningsmateriale, og  $\pm 0,01\%$  for slakk- og spennarmering. Dette, i kombinasjon med at opptredende tøyninger ved brudd er oppgitt med to desimaler i resultatene, gjør at man også her kan oppleve at for eksempel spennarmering med tøyning på  $9,99\%$  er angitt med «Brudd», selv om oppgitt bruddtøyning er på  $10,0\%$ . En nærmere beskrivelse av denne kodingen er gitt i kapittel 3.2.2.

Dersom brukeren ønsker å se nærmere på resultater fra de ulike stegene i den iterative prosessen som ligger til grunn for plottingen av moment-krumningsrelasjonen, kan dette ses i arket «Beregning forsterket». Tabell 9 viser eksempel på dette.

ConLam beregner også kapasiteten til tverrsnittet i bruksgrensetilstand. Her blir det beregnet momentkapasitet for karakteristisk og tilnærmet permanent lastkombinasjon. For å utføre dette må brukeren trykke på knappen «Beregn SLS», men også her må brukeren først nullstille eventuelle verdier fra tidligere beregninger ved å trykke på knappen «Reset verdier før beregning». Resultatene blir presentert sammen med resultater fra bruddgrenseberegninger, se Figur 36. I dette eksempelet ser man at kapasiteten blir lik i de to lastkombinasjonene. Dette er tilfelle fordi begge beregningene blir begrenset av spenninger i spennstålet, og grenser for spenning i slakk- og spennarmering er de samme for de ulike lastkombinasjonene som beskrevet i kapittel 2.2.6.

Dersom brukeren ønsker å se nærmere på resultater fra de ulike stegene i de iterative prosessene som ligger til grunn for plottingen av moment-krumningsrelasjonen i bruksgrensetilstand, kan dette ses i arkene «Beregning bruksgrense kar.» og «Beregning bruksgrense TP». Hvordan beregningene utføres er nærmere beskrevet i kapittel 3.2. Der er prosedyren for kapasitetsberegning av forsterket tverrsnitt i bruddgrense beskrevet i detalj, men da kapasitetsberegning i bruksgrense er relativt lik henvises det til denne beskrivelsen og vedlagte VBA-kodinger for å sette seg inn i beregningsprosedyren. Forskjellen ligger i grenseverdier for materialspenninger, som er beskrevet i kapittel 2.2.



### Beregning av bøyestivhet

ConLam kan også beregne bøyestivhet til opprisset tverrsnitt med utenpåliggende forsterkning. Samtidig som momentkapasiteten beregnes for forsterket tverrsnitt, beregnes også grenseverdier til input av moment for utregning av bøyestivheten, se Figur 37. For å beregne bøyestivheten til det aktuelle tverrsnittet må brukeren legge inn momentverdi,  $M_{EI}$ , innenfor grensene, og trykke på knappen «Beregn bøyestivhet». Resultatet blir presentert i høyre kolonne i «Input og resultater», se Figur 38.

Bøyestivhet			
$M_{EI} =$	<input type="text" value="1500,0"/>	kNm	
		Minimumsverdi:	1492,7 kNm
		Maksimal verdi:	2370,7 kNm

Figur 37: Input til beregning av bøyestivhet i ConLam.

Bøyestivhet	
$EI =$	<input type="text" value="2,694E+15"/> Nmm <sup>2</sup>

Figur 38: Resultat fra beregning av bøyestivhet i ConLam.

Dersom brukeren ønsker å se nærmere på resultater fra de ulike stegene i den iterative prosessen som ligger til grunn for plottingen av moment-krumningsrelasjonen, kan dette ses i arket «Bøyestivhet».

#### 3.1.6 Utskrift

Øverst i arket «Input og resultater» ligger en utskrifts-knapp. Ved å trykke på denne generer programmet automatisk et utskriftvennlig dokument, og brukeren kommer rett inn i forhåndsvisning av utskriften.

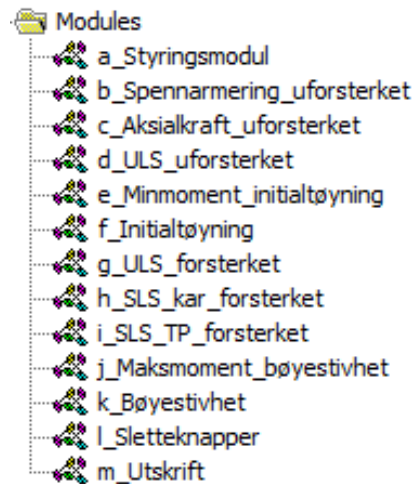
**NB! Brukeren må ha valgt standardskriver på datamaskinen før man trykker på utskrifts-knappen, da dette ikke kan velges fra forhåndsvisningen.**

### 3 ConLam - Beregningsprogram

#### 3.2 Programmets virkemåte

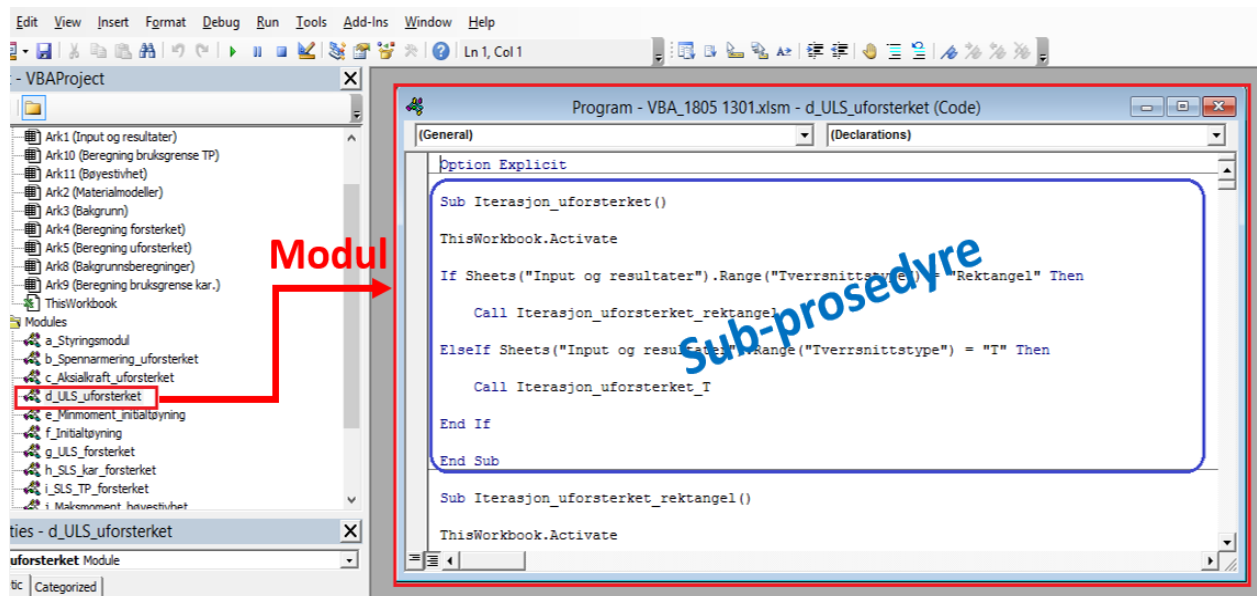
##### 3.2.1 Generell virkemåte

Programmet består av 42 sub-prosedyrer (heretter kalt suber) som kommuniserer med hverandre og Excel. En sub er et lite program som ved koding kan utføre beregninger, samt hente og returnere informasjon fra Excel (Larsen 2009, 511 og 564). Noen av subene i ConLam fungerer som styringsprogrammer for andre suber, noen er slette- og utskriftsprogrammer mens de øvrige utfører beregninger. Subene er organisert i de 13 modulene som er vist i Figur 39. En modul er et objekt i VBA som lagrer programmeringskode, for eksempel suber (Larsen 2009, 534). Figur 40 viser hvordan en modul og en sub ser ut i VBA.



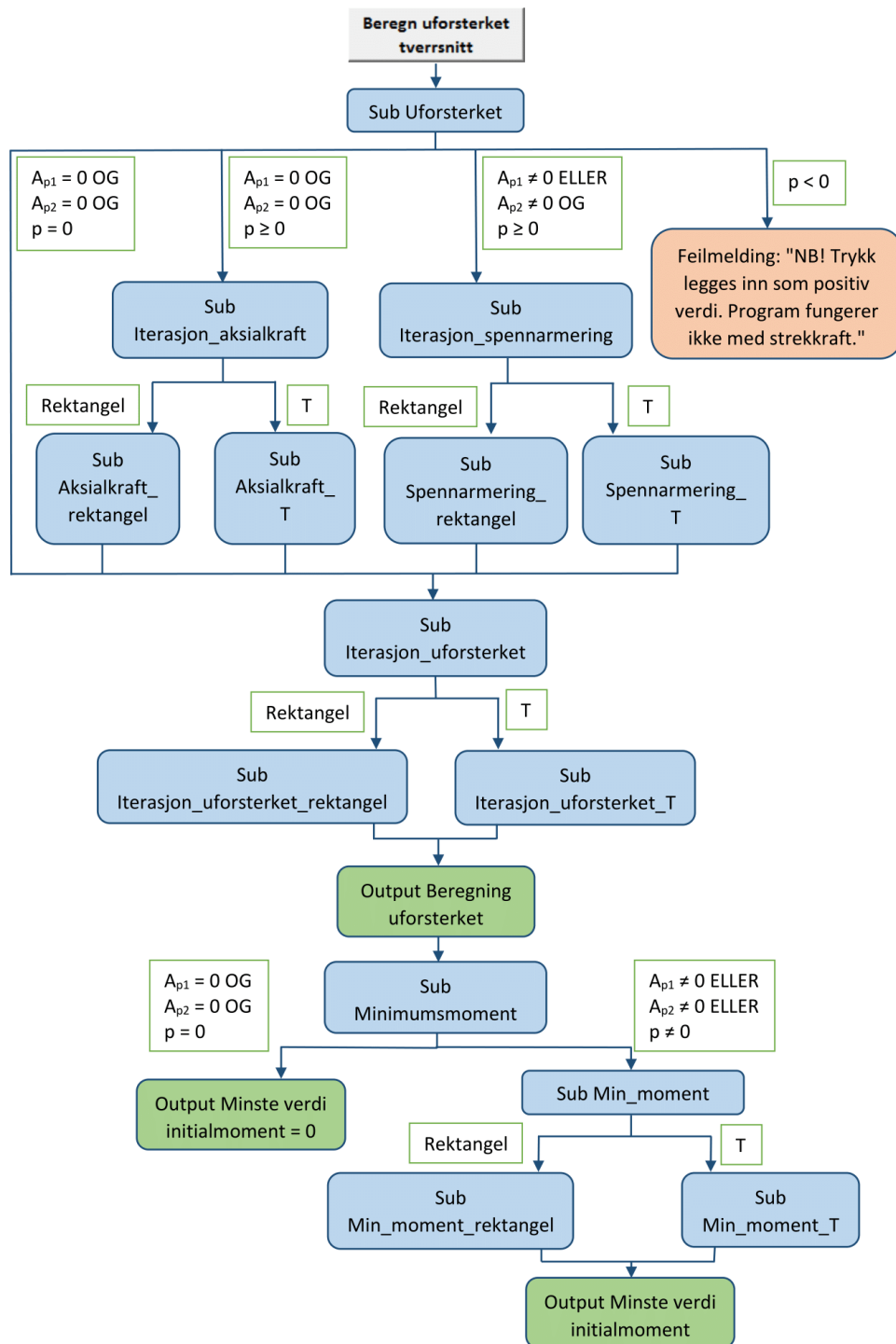
I de påfølgende sidene er det laget flytskjema som beskriver hvordan beregningsknappene i input-arket i Excel fungerer. Øverst i hvert flytskjema vises den aktuelle knappen som brukeren trykker på i Excel, deretter følger mulige eventualiteter, aktuelle suber, feilmeldinger og output. Blå bokser betyr suber, grønne bokser er output som skrives fra VBA til Excel, røde bokser er feilmeldinger som gir brukeren informasjon og hvite bokser med grønn kant er betingelser som styrer mulige utfall. Flytskjemaene står i samme rekkefølge som beregningsgangen brukeren følger i Excel.

Figur 39: Moduler.



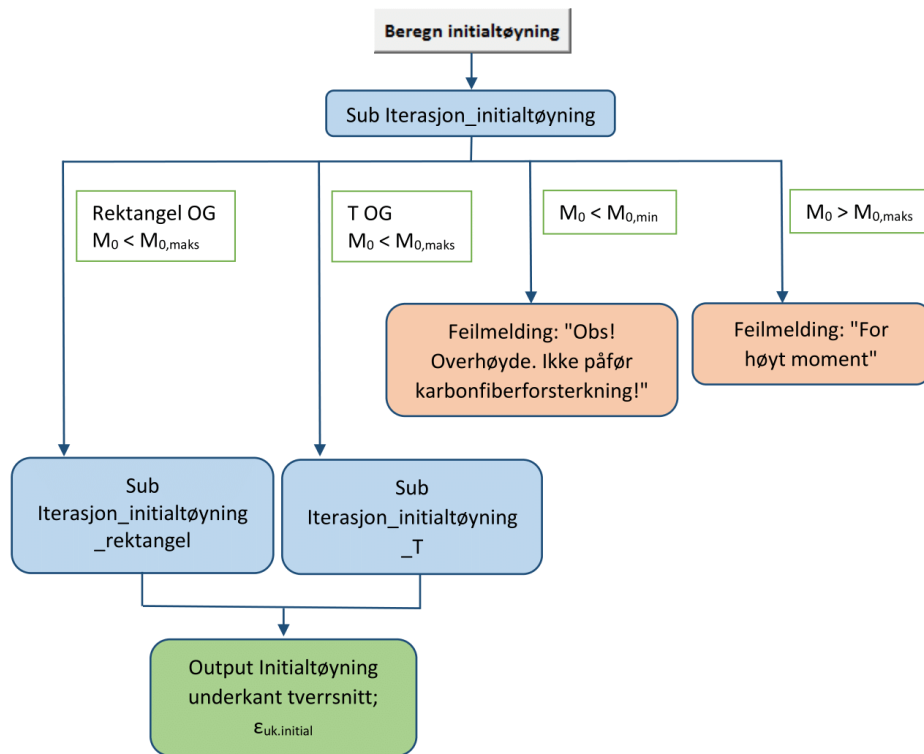
Figur 40: Modul og sub-prosedyre



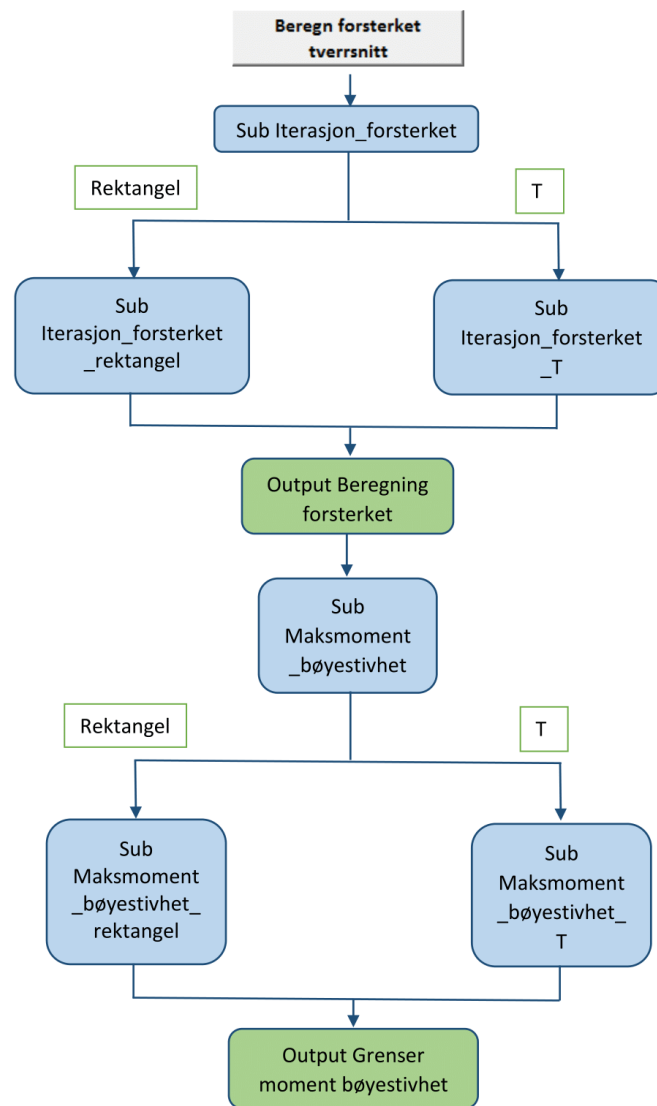


Figur 41: Beregning av uforsterket tverrsnitt

### 3 ConLam - Beregningsprogram

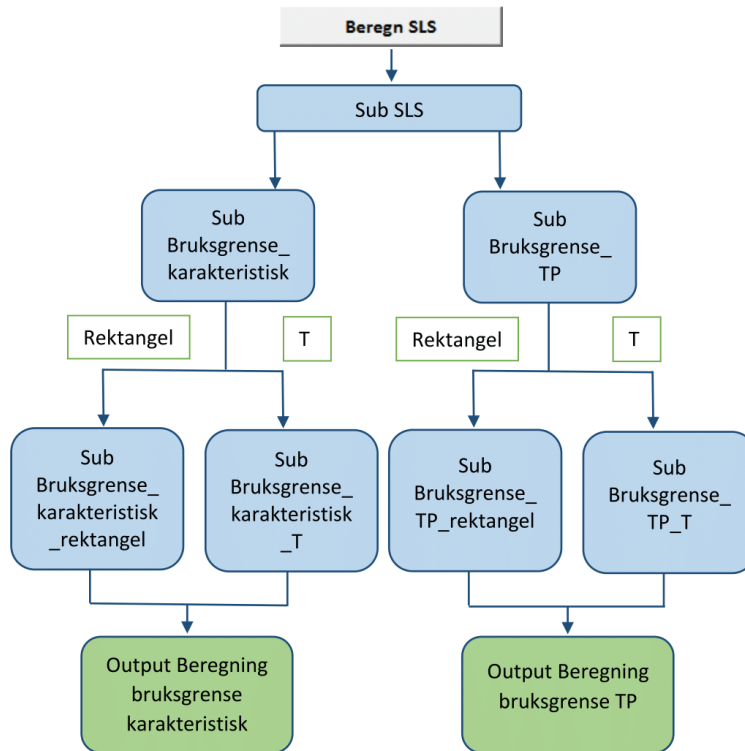


Figur 42: Beregning av tøyning i underkant tverrsnitt ved påføring av forsterkningsmateriale

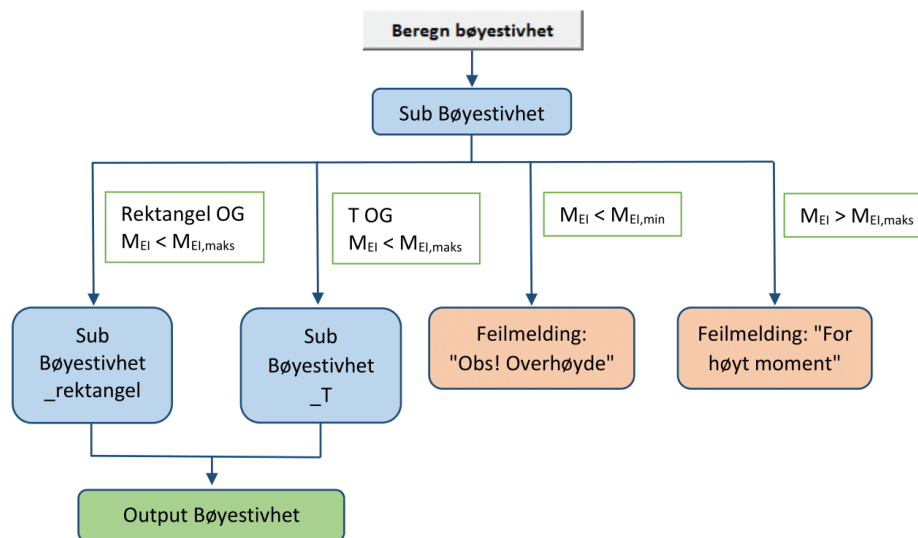


Figur 43: Beregning av forsterket tverrsnitt

### 3 ConLam - Beregningsprogram



Figur 44: Beregning av karakteristisk og tilnærmet permanent momentkapasitet (SLS)



Figur 45: Beregning av bøystivhet for forsterket tverrsnitt

Subene det vises til i flytskjemaene i Figur 41 til Figur 45 kommuniserer med hverandre på følgende måte:

```
Call Iterasjon_uforsterket
```

Utklippet er hentet fra slutten av suben «Spennarmering\_rektangel», og viser hvordan suben «Iterasjon\_uforsterket» starter automatisk når den forrige er ferdig. Dette eksempelet er betingelsesløst, og er illustrert i Figur 41 ved en blå pil mellom de aktuelle subene uten noen hvit «betingelsesboks» mellom. I tilfeller hvor det er flere mulige utfall er koden skrevet i en if-setning, som eksempelet fra Figur 43, der suben «Maksmoment\_bøystivhet» enten skal kalle opp «Maksmoment\_bøystivhet\_rektangel» eller «Maksmoment\_bøystivhet\_T»:

```

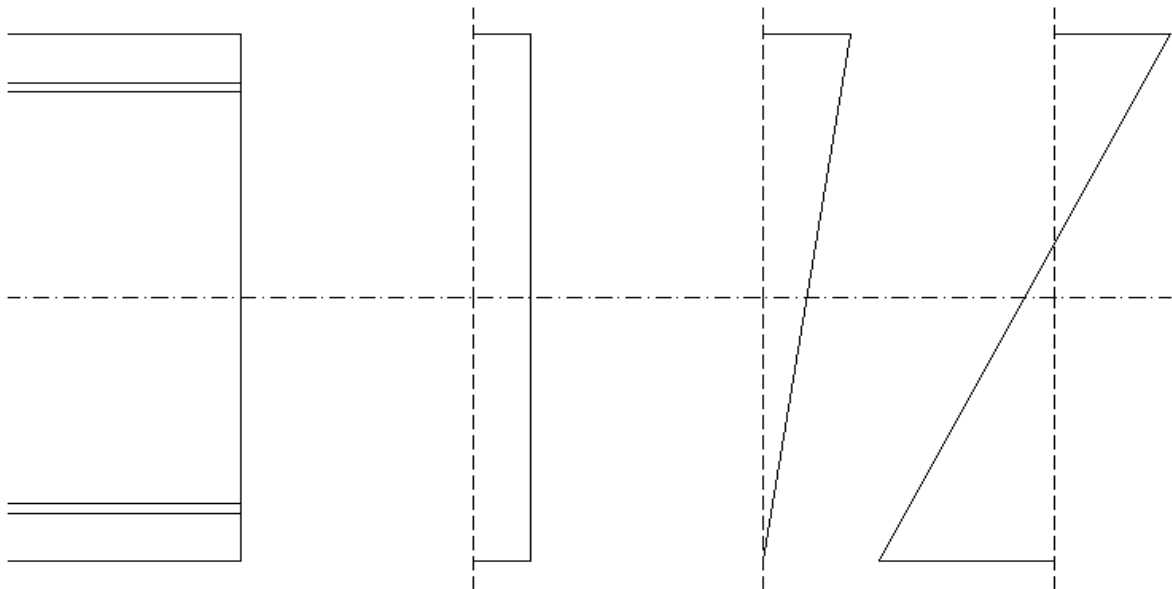
If Sheets("Input og resultater").Range("Tverrsnittstype") = "Rektangel" Then
    Call Maksmoment_bøystivhet_rektangel
ElseIf Sheets("Input og resultater").Range("Tverrsnittstype") = "T" Then
    Call Maksmoment_bøystivhet_T
End If
  
```

Det kontrolleres om det er «Rektangel» eller «T» som er valgt i nedtrekksmenyen i toppen av arket «Input og resultater» i Excel for å avgjøre hvilken sub som skal kalles opp.

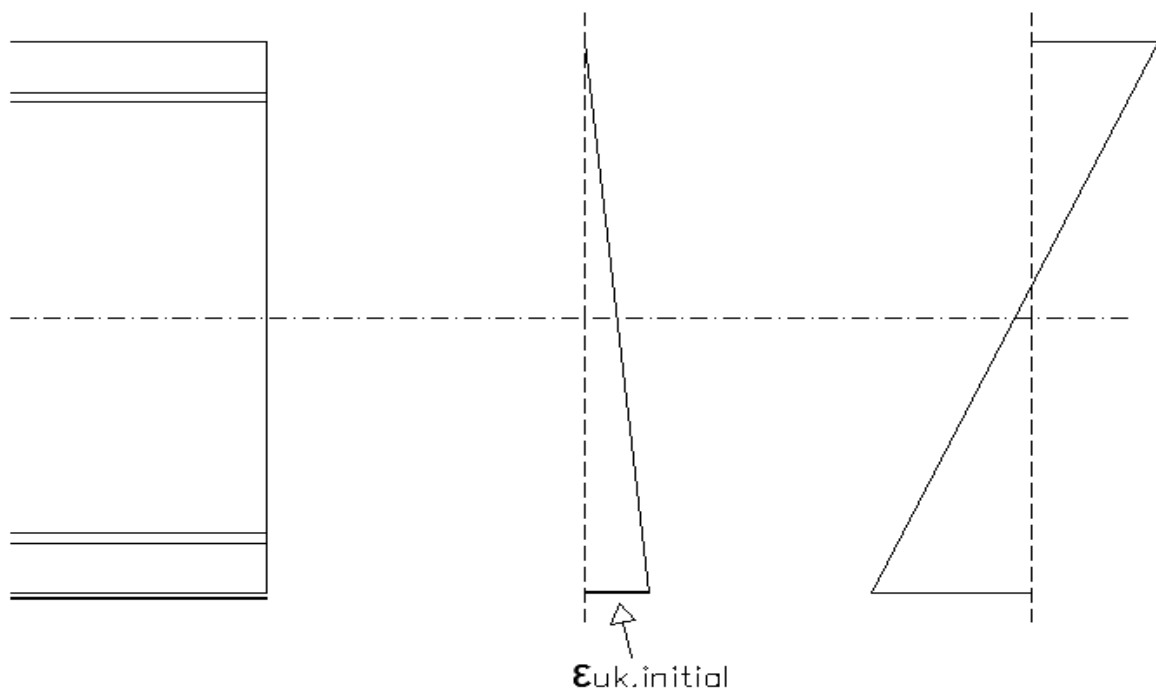
I utgangspunktet er beregningen av momentkapasiteten til uforsterket- og forsterket tverrsnitt relativt lik til tross for at flytskjemaene i Figur 41 og Figur 43, som viser beregningsgangen for de to tilfellene, ikke er særlig like. Årsaken til hovedforskjellen mellom disse er aksialkraft og tilhørende tøyninger. For et uforsterket tverrsnitt med ytre aksialkraft eller spennarmering beregnes først den rene aksialdeformasjonen (null krumning) fra den

### 3 ConLam - Beregningsprogram

påførte kraften for så å beregne det tilhørende momentet fra denne tilstanden. Deretter beregnes moment-krumningsforløpet fra den rene trykktøyningstilstanden frem til tilstanden hvor det er null tøyning i underkant tverrsnitt. Til slutt beregnes forløpet fra null tøyning i underkant tverrsnitt frem til bruddgrense for et av materialene. Beregningsgangen er illustrert i Figur 46. For det forsterkede tverrsnittet starter beregningen av moment-krumningsforløpet med en tøyning i underkant tverrsnitt som er beregnet fra et initialmoment, og går frem til bruddgrensetøyningen til ett av materialene oppnås. Dette er vist i Figur 47.



Figur 46: Beregningsgang for uforsterket tverrsnitt påkjent av aksialkraft



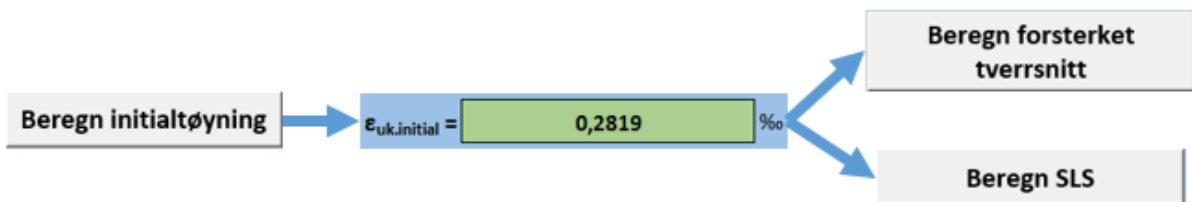
Figur 47: Beregningsgang for forsterket tverrsnitt

Figur 48 illustrerer sammenhengen mellom beregning av uforsterket momentkapasitet som vist i Figur 41, og beregning av initialtøyning i Figur 42. Første steget er å kjøre kapasitetsberegningen, deretter kommer minimums- og maksimumsverdi for initialmoment automatisk som output. Disse representerer grensene for et brukervalgt initialmoment som benyttes til å beregne den tilhørende krumningstilstanden og til slutt tøyningen i underkant tverrsnitt når karbonforsterkningen påføres.

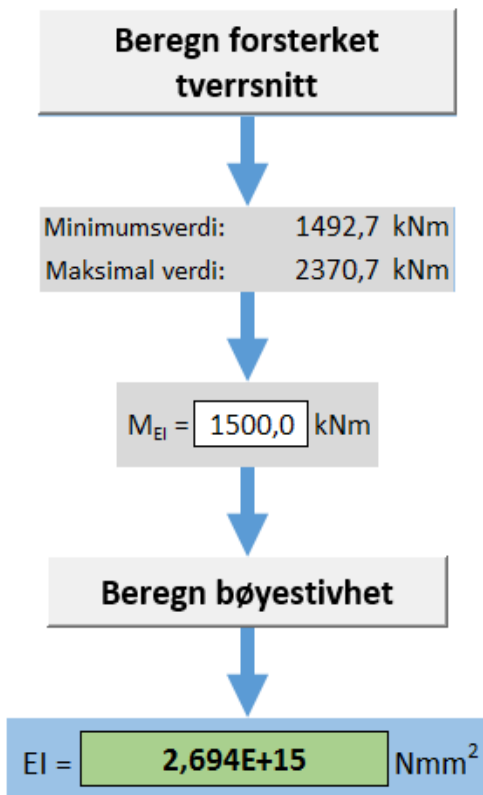


Figur 48: Sammenheng mellom Figur 41 og Figur 42

Den beregnede tøyningen i underkant tverrsnitt brukes videre som input ved beregning av forsterket tverrsnitt i brudd- og bruksgrensetilstanden, som vist i Figur 49.



Figur 49: Sammenheng mellom Figur 42 og Figur 43, samt Figur 42 og Figur 44



I slutten av beregningsgangen til forsterket tverrsnitt (vist i Figur 43) beregnes grensene for det brukervalgte bøyestivhetsmomentet. Disse verdiene informerer brukeren om hvilke grenser han/hun må holde seg innenfor når momentet skal testes inn. Når brukeren trykker på knappen «Beregn bøyestivhet» så beregnes bøyestivheten for det valgte momentet og aktuelt tverrsnitt, som vist i Figur 45. Denne gangen er vist i Figur 50.

Figur 50: Sammenheng mellom Figur 43 og Figur 45

### 3 ConLam - Beregningsprogram

#### 3.2.2 Beskrivelse av en sub-prosedyre

Herunder beskrives den sub-prosedyren som beregner moment-krumningsforløpet for en rektangulær CFRP-forsterket bjelke, suben i sin helhet finnes i vedlegg B. Denne beskrivelsen må sees i sammenheng med resten av rapporten for fullstendig forståelse av virkemåten til suben. En oppsummering av dette delkapittelet er illustrert ved flytskjema i Figur 60. Det gis kun en inngående beskrivelse av denne ene suben da hensikten er å gi en forståelse for programmets virkemåte, ikke programmets fullstendige oppbygning. Øvrige sub-prosedyrer for beregning av moment-krumningsforløp er i hovedsak bygget opp som den herunder beskrevne, med visse naturlige forskjeller. Programmet i sin helhet er vedlagt oppgaven dersom det er av interesse å bli bedre kjent med programmets fullstendige oppbygning.

Øverst i suben står koden «sub», en forkortelse for «subroutine», etterfulgt av det valgte navnet til suben:

```
Sub Iterasjon_forsterket_rektangel()
```

I starten av suben deklarerer alle variablene som blir brukt i beregningene. Det vil si at hver enkelt variabel angis en datatype som forteller VBA hvor mye minne som skal settes av til variabelen og hvilken type verdi den har, som tall, tekst eller logisk verdi. Dette gjøres i hovedsak for å effektivisere programmet og redusere minnebruken (Larsen 2009, 564). Her følger et eksempel på deklarerer hentet fra suben:

```
Dim n_lam As Integer
```

Variabelen n\_lam er angitt til å være datatypen Integer. Det vil si at den kan kun være et heltall fra -32 768 til 32 767, og tilordnes 2 bytes minne. Den aktuelle variabelen er antall lameller tverrsnittet er delt opp i, og inngår i en løkke som beregner blant annet tøyningen i de enkelte lamellene. Det faktum at denne variabelen er tilordnet datatypen Integer begrenser antall lameller til maksimalt 32 767. Datatypene kan medføre en viss unøyaktighet, og virker som en begrensning på variablene. Av denne grunn er det viktig å velge riktig datatype til de forskjellige variablene. Tabell 10 viser noen av datatypene som kan brukes i VBA.

Datatype	Rekkevidde/beskrivelse	Minnebruk [bytes]
Integer	Heltall, -32 768 til 32 767	2
Long (Long Integer)	Heltall, $-2,147 \cdot 10^9$ til $2,147 \cdot 10^9$	4
Boolean	Logiske verdier; sann (0) eller usann(-1)	2
Single	$-3,403 \cdot 10^{38}$ til $3,403 \cdot 10^{38}$	4
Double	$-1,798 \cdot 10^{308}$ til $1,798 \cdot 10^{308}$	8
Byte	Heltall, 0 til 255	1
String	Tekst	Antall siffer
Variant	Kan brukes til alt, men bruker mye minne	22 + antall siffer

Tabell 10: Eksempler på datatyper i VBA.



Etter at variablene er deklarerert hentes de aktuelle inputverdiene som skal brukes i suben fra Excel. En del av variablene får angitt verdier som i hovedsak er brukervalgt, som tverrsnittsgeometri og materialdata. Ett eksempel er der hvor antall lameller tas inn i suben:

```
'Antall lameller
n_lam = Sheets("Input og resultater").Range("Antall_lameller")
```

Over hver inputverdi og beregning er en kort beskrivelse av hva som hentes inn. Hensikten er å gi utviklere og spesielt interesserte brukere bedre oversikt og forståelse av suben. På neste linje gis variabelen `n_lam` verdien som står i cellen som heter *Antall\_lameller* i arket *Input og resultater* i Excel. Bakgrunnen for at cellene er definert ved navn er for å unngå henvisningsfeil dersom cellene blir flyttet.

Beregningene i suben foregår i all hovedsak i løkker. En av fordelene med beregning i løkker er at man kan gjøre de samme beregningene mange ganger, med en liten endring i hver løkke. Deretter kan man sette en begrensning som gjør at løkken stopper når en viss betingelse er oppnådd. I suben som beregner moment-krumningsforløpet til et CFRP-forsterket rektangulært tverrsnitt, er det benyttet fem «For-løkker» utenpå hverandre. I rekkefølge fra innerst til ytterst har løkkene variablene «j», «x», «m», «u» og «i», der sistnevnte løkke har en litt forskjellig virkemåte fra de andre. i-løkken kjøres et bestemt antall runder, mens de øvrige i praksis kjøres til betingelser oppfylles. Det at løkkene ligger utenpå hverandre vil si at for hver «u» beregnes «i» mange ganger, «u» beregnes mange ganger for hver «m», og så videre. Utklippet under viser hvordan i-løkken starter, hvilken verdi den skal starte og ende på.

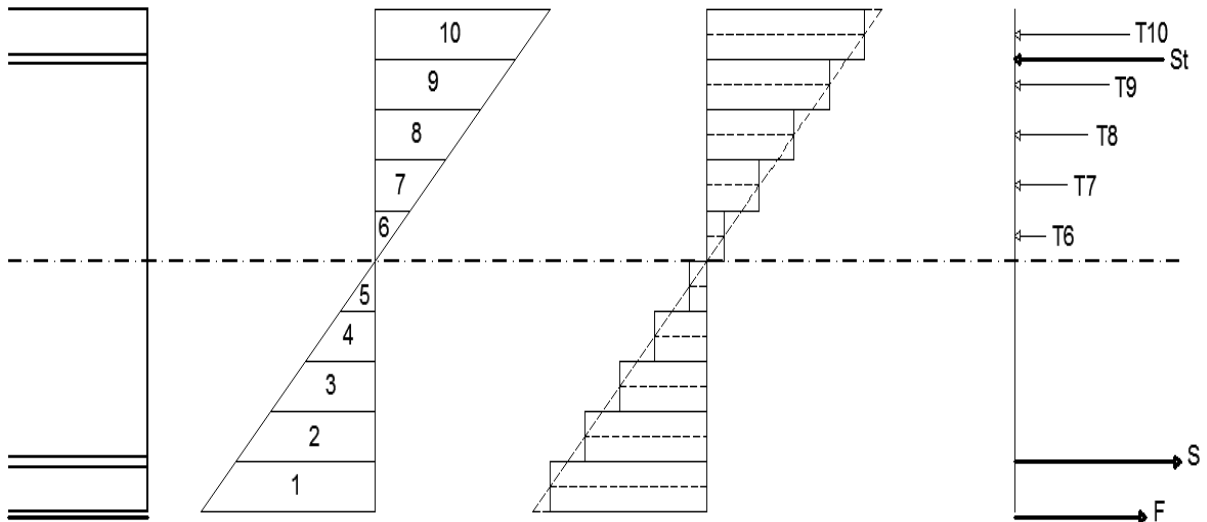
```
'Løkke for beregning av kraftbidrag til betong
For i = 1 To n_lam
```

Startverdien (1) er den nederste lamellen i tverrsnittet, og sluttverdien «`n_lam`» er både antall lameller og den øverste lamellen i tverrsnittet. Alt som skal beregnes innenfor i-løkken må stå mellom utklippet over og følgende kode:

```
Next i
```

Beregning av tøyning, spenning, kraft- og momentbidrag fra betong foregår i den ytterste løkken; «i». Brukeren velger selv hvor mange lameller tverrsnittshøyden skal deles opp i, dermed er lamellhøyden gitt implisitt av brukeren. Løkkene innenfor «i» gir tøyning i overkant og underkant tverrsnitt før «i» kjøres. Når  $\epsilon_{uk}$ ,  $\epsilon_{ok}$  og lamellhøyden er gitt, beregnes tøyningen i hver lamell ved trekantbetraktning. Tøyningen i den enkelte lamell beregnes i middelhøyden til lamellen, og antas konstant over lamellens høyde som vist i Figur 51. Dette er en forenkling av antagelsen om lineær tøyningfordeling, og en mulig feilkilde ved bruk av programmet. Det anbefales å kontrollere resultatet man får ved bruk av programmet på følgende måte; Etter man har fått resultatet endrer man antall lameller betydelig og kjører en ny beregning. Dersom resultatet er tilnærmet likt kan man konkludere med at inndelingen er tilstrekkelig fin.

### 3 ConLam - Beregningsprogram



Figur 51: Lamellmetoden – Her sammenfaller TP betong og N.A.

Den ytterste løkken starter med å beregne tøyningen i den nederste lamellen, deretter beregnes spenning, kraft- og momentbidrag for lameller med trykktøyning. Spenningen i den enkelte lamell beregnes på følgende måte:

```
'Lamellspenning
If ec2 < lamelltøyning < 0 Then
    lamellspenning = fcd * (1 - (1 - (lamelltøyning / ec2)) ^ n)
ElseIf lamelltøyning < ec2 Then
    lamellspenning = fcd
End If
```

Utklippet under viser hvordan kraftbidraget fra den enkelte lamell beregnes.

```
'Kraftbidrag fra lamell nummer i
If lamelltøyning < 0 Then
    T_i = lamellspenning * tv_b * lamellhøyde
ElseIf lamelltøyning > 0 Then
    T_i = 0
End If
```

Det antas i programmet at betongen kun har kapasitet ved trykktøyninger, ved strekktøyning settes kraftbidraget lik null. Dette er visualisert i illustrasjonen til høyre i Figur 51 der T6 til T10 er tatt med, mens T1 til T5 er utelatt. Når suben har kjørt beregningen av en lamell og går videre til neste ligger verdien av momentbidraget fra de forrige momentbidragene inne som «M\_b».

```
'Momentbidrag fra den enkelte lamell
M_i = (tpb - y) * T_i

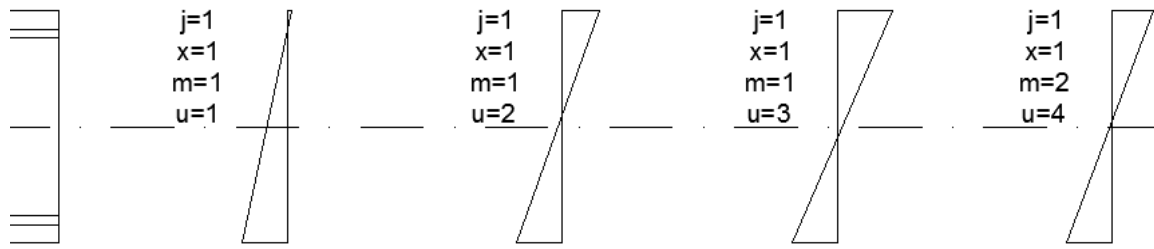
'Akkumulert momentbidrag fra betong
M_b = M_i + M_b
```

Akkumuleringen av momentbidragene blir gjort ved at verdien fra en lamell ( $M_i$ ) beregnes og legges til verdien fra de forrige ( $M_b$  på høyre side av likhetstegnet i den nederste formelen). Verdien som beregnes på venstre side av likhetstegnet ( $M_b$ ) skriver over verdien variabelen hadde på før beregningen. Slik fortsetter den ytterste løkken «i» til alle kraft- og momentbidragene for betongen er akkumulert.

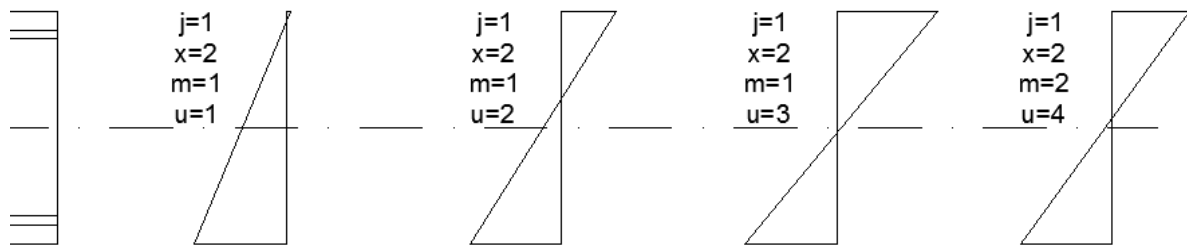
De øvrige løkkene «j», «x», «m» og «u» styrer iterasjonene som fører til det punktvis moment-krumningsforløpet til tverrsnittet. Figur 52 til Figur 55 er prinsippkisser av sammenhengen mellom løkkevariablenes verdier og tverrsnittets tøyninger. Fra venstre til høyre i hver figur er tøyningen i underkant tverrsnitt konstant, mens tøyningen i overkant itereres. Disse iterasjonene foregår i «m» og «u» og fungerer slik at innenfor en «m» er tøyningen i overkant enten økende eller reduserende. Om den er økende eller reduserende er styrt av om «m» er oddetall eller partall. Som vist i Figur 52 til Figur 55 i de tre første tøyningstilstandene, fra venstre mot høyre, er  $m=1$  (oddetall) og tøyningen i overkant stigende. I den fjerde tøyningstilstanden er  $m=2$  (partall) og tøyningen i overkant reduserende, men med en finere inndeling. Programmet søker med andre ord etter en løsning som ligger en plass mellom tøyningstilstand 2 og 3. For enkelhets skyld stopper eksempelet på første punkt etter at overkant tøyning har snudd en gang, mens i programmet vil «m» gå høyere og overkant tøyning vil snu flere ganger med finere inndeling hver gang, før en betingelse tilfredsstilles. Innenfor en u-løkke foretas selve beregningene, og det er «u» som utfører økning eller reduksjon av tøyningen i overkant tverrsnitt, mens det er «m» som styrer hvordan «u» skal gjøre dette.

Det som foregår i løkkene med variabelnavnene «j» og «x» er analogt med det som foregår i «m» og «u», men omhandler tøyning i underkant tverrsnitt istedenfor overkant. Som nevnt er tøyningen i underkant konstant innenfor en figur, men den itererer fra Figur 52 til Figur 55. j-løkken styrer om tøyningen i underkant skal være økende eller synkende, samt at tøyningsstegene skal ha finere inndeling når «j» øker. Som vist i Figur 52 til Figur 54 så øker tøyning i underkant tverrsnitt, mens i Figur 55 reduseres tøyningen med en finere inndeling. Det er «x» som utfører selve beregningene og tøyningsstegene, og «j» som styrer dette.

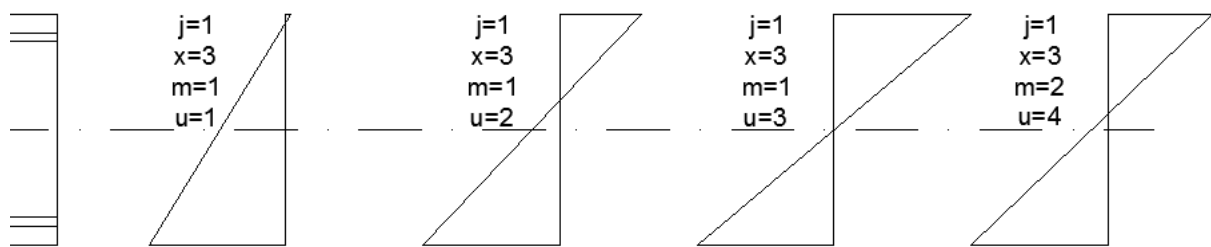
### 3 ConLam - Beregningsprogram



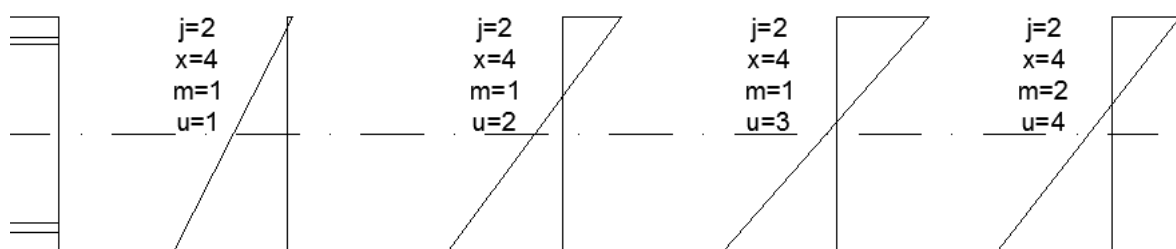
Figur 52: Første iterasjon.



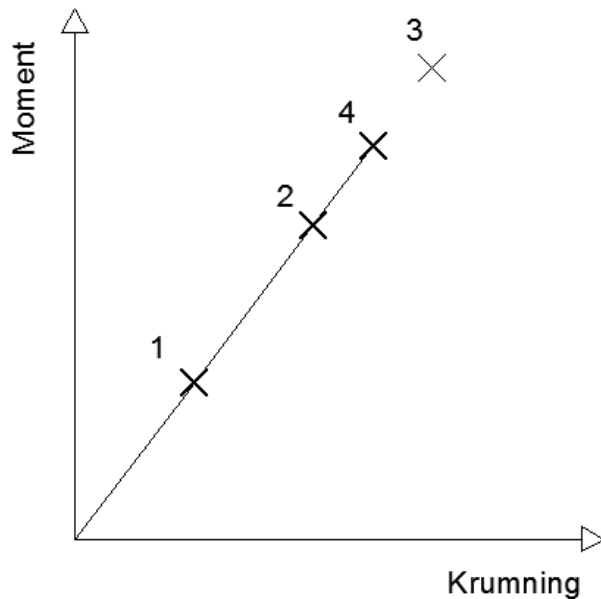
Figur 53: Andre iterasjon, tøyning i underkant øker.



Figur 54: Tredje iterasjon, tøyningensgrense overstiges.



Figur 55: Fjerde iterasjon, tøyning i underkant reduseres, stopper på tøyningensgrense.



Figur 56: Moment-krumningsdiagram.

Eksempelet fra Figur 52 til Figur 55 gir en moment-krumningskurve med tre punkt, ett punkt fra hvert av Figur 52, Figur 53 og Figur 55. Det er siste tøyningstilstand som blir plottet i kurven fordi det er den eneste tilstanden som oppfylder betingelsen om likevekt av krefter. Grafen tilhørende Figur 52 til Figur 55 er illustrert i Figur 56. Grunnen til at Figur 54 ikke ville gitt et punkt på kurven er den samme grunnen for at tøyningen i underkant reduseres fra Figur 54 til Figur 55; tøyningsgrensen til ett av materialene har blitt passert og momentkapasiteten som denne tøyningstilstanden gir er ikke reell. I Figur 56 er denne tatt med som et svakt kryss

(øverste punktet), men i programmet vil den ikke vises i kurven. Dette kan sees i Tabell 9 i form av rader uten verdier for moment og krumning. Dette bildet viser bakgrunnsberegningene for kurven til forsterket tverrsnitt i programmet.

Metoden som brukes for å endre retning på tøyninger fra økende til synkende (og omvendt) i programmet innenfor u-løkken er som følger:

```
'Betongtøyning i overkant tverrsnitt
If u = 1 And m = 1 Then
  ok_tøyning = ok_initialtøyning
Else
  ok_tøyning = ok_tøyning + (ok_tøyningdiff * ((-1) ^ (m - 1)))
End If
```

For første runde ( $u=1$  og  $m=1$ ) settes tøyningen i overkant lik en veldig liten verdi; «ok\_initialtøyning». For de øvrige rundene i u-løkken er tøyningen i overkant lik tøyningen i forrige runde, pluss et tillegg «ok\_tøyningdiff». Sistnevnte variabel multipliseres med  $((-1) ^ (m-1))$ , det er dette som styrer om tøyningdifferansen som tillegges verdien fra forrige runde i «u» er positiv eller negativ. For et oddetall gir dette et positivt fortegn, og for partall et negativt. Tilsvarende metode benyttes for å styre tøyninger i underkant tverrsnitt:

```
'Tøyning i underkant tverrsnitt
If j = 1 And x = 1 Then
  uk_tøyning = uk_initialtøyning
Else
  uk_tøyning = uk_tøyning + (uk_tøyningdiff * ((-1) ^ (j - 1)))
End If
```

I tillegg til å endre retning styrer j- og m-løkken hvordan tøyningdifferansen skal reduseres for hver runde slik at tøyningstilstanden itereres mot betingelsen om likevekt av krefter.

### 3 ConLam - Beregningsprogram

Som vist under, vil tøyningdifferansen i overkant tverrsnitt reduseres med en faktor på 5 for hver runde i m-løkken.

```
'Tøyningdifferanse overkant tverrsnitt
ok_tøyningdiff = ok_tøyning_diff * ((1 / 5) ^ (m - 1))
```

«ok\_tøyning\_diff» er definert før alle løkkene, og er grunnet dette en konstant verdi. Det er dog «ok\_tøyningdiff» som er den tøyningdifferansen som brukes i beregningene av tøyning i overkant tverrsnitt i hver runde av «u». Tilsvarende fungerer inndelingen av tøyningdifferansen i underkant tverrsnitt:

```
'Tøyningdifferanse på stegene i u.k. betong
uk_tøyningdiff = uk_tøyning_diff * ((1 / 2) ^ (j - 1))
```

Det som styrer når u- og m-løkken skal stoppe er kraftlikevekt i bjelkens lengderetning. Betongens kraftbidrag blir, som beskrevet tidligere, akkumulert i i-løkken. For å beregne kraftbidragene fra slakkarmering i trykk og strekk, spennarmering og fiberforsterkning beregnes tøyningene i materialene først. Eksempelet under viser hvordan tøyningen i nederste laget av slakkarmering i strekk beregnes ved trekantbetraktning:

```
'Tøyning strekkarmering 1
If As1 = 0 Then
  as1_tøyning = Empty
Else
  as1_tøyning = ((ok_tøyning - uk_tøyning) / tv_h) * (tv_h - d1) + uk_tøyning
End If
```

Den tilhørende kraften (S) beregnes ved å multiplisere tøyningen (gitt av if-setningen over) med tilhørende areal og E-modul. Dersom tøyningen har passert flytegrensen inkluderes fastning ved trekantbetraktning av spenning-tøyningsskurven til materialet. For at programmet skal være mest mulig fleksibelt i bruk er det tatt hensyn til at slakkarmering, som er tiltenkt å ligge i strekksone, kan havne i trykksone ettersom trykksonehøyden varierer. På samme måte er det tatt hensyn til at slakkarmering i trykk kan havne i strekksone og oppleve strekktøyninger og –krefter. Det er tøyningen som definerer om det er trykk (negativt) eller strekk (positivt), deretter tas dette inn i følgende if-setning for beregning av kraftbidrag:

```
'Kraft strekkarmering 1
If as1_tøyning < fyd / Es1 And as1_tøyning > -fyd / Es1 Then
  S1 = as1_tøyning * Es1 * As1
ElseIf as1_tøyning > fyd / Es1 Then
  S1 = (fyd + ((as1_tøyning - (fyd / Es1)) * Es2)) * As1
ElseIf as1_tøyning < -fyd / Es1 Then
  S1 = -((fyd + ((Abs(as1_tøyning) - (fyd / Es1)) * Es2)) * As1)
End If
```

Tøyningene og kreftene i de øvrige slakkarmeringslagene i trykk og strekk beregnes tilsvarende. Spennarmering betraktes nesten likt som tradisjonell slakkarmering ved beregning av tøyninger, med den forskjellen at spennarmeringen har en initiell tøyning før

krumningen starter, som følge av oppspenning. I VBA er tøyningen til det nederste laget med spennarmering beskrevet som:

```
'Tøyning spennarmering 1
If Ap1 = 0 Then
    ap1_tøyning = Empty
Else
    ap1_tøyning = ep0 + (((ok_tøyning - uk_tøyning) / tv_h) * (tv_h - dpl)) + uk_tøyning)
End If
```

Variabelen «ep0» er den brukerdefinerte inputverdien på oppspenningstøyning inkludert tap. Den tilhørende kraften fra det samme spennarmeringslaget beregnes i en if-setning som tar hensyn til om tøyningen ligger over eller under flytegrensen:

```
'Kraft spennarmering 1
If ap1_tøyning < fpd / Ep1 Then
    Sp1 = ap1_tøyning * Ep1 * Ap1
Else
    Sp1 = (fpd + ((ap1_tøyning - (fpd / Ep1)) * Ep2)) * Ap1
End If
```

Fastningen inkluderes som en trekantbetraktning av spenningen i andre ledd i if-setningen. I motsetning til slakkarmeringen antas det at spennarmeringen aldri kan få trykktøyninger og dermed ingen kraftbidrag i trykk.

Beregningsprogrammet forutsetter at forsterkningsmaterialet har en lineærelastisk oppførsel, og er i så måte det enkleste materialet å beskrive. Følgende beregning utføres i suben for å bestemme tøyningen til forsterkningsmaterialet:

```
'Tøyning karbonfiberforsterkning
If Af = 0 Then
    f_tøyning = Empty
Else
    f_tøyning = uk_tøyning - uk_initialtøyning
End If
```

Det forutsettes full heft mellom betong og forsterkningsmaterialet slik at det følger tøyningen i underkant tverrsnitt gjennom hele krumningsforløpet. Variabelen «uk\_initialtøyning» er en konstant verdi innenfor løkkene i suben. Denne verdien angir tøyningen i underkant tverrsnitt når forsterkningsmaterialet påføres.

Det at CFRP-forsterkningen ligger på undersiden av tverrsnittet og bygger tverrsnittet nedover gjør at tøyningene i forsterkningslaget er marginalt større enn underkant tverrsnitt ved

### 3 ConLam - Beregningsprogram

krumning. Forsterkningslaget bygger dog ikke mer enn noen få millimeter nedover, dermed er denne effekten antatt neglisjerbar og sett bort fra i programmet.

Den lineærelastiske oppførselen beskrives på følgende måte i beregningen av kraftbidraget fra forsterkningsmaterialet:

```
'Kraft karbonfiberforsterkning  
F = f_tøyning * Ef * Af
```

Etter at alle tøyninger og kraftbidrag fra de forskjellige materialene er beregnet summeres de først materialvis:

```
S = S1 + S2 + S3 + S4  
St = St1 + St2 + St3 + St4  
Sp = Sp1 + Sp2
```

Variabelen «S» er det totale kraftbidraget fra alle lagene av slakkarmering i strekk, «St» fra slakkarmering i trykk og «Sp» fra spennarmeringslagene. Til slutt summeres alle kreftene som virker i tverrsnittet:

```
'Sum  
sum = S + T + St + Sp + F - p
```

For et vanlig tilfelle der de respektive materialene ligger på tiltenkt side av trykksonehøyden er «S», «Sp» og «F» positive verdier og «T», «St» og «p» negative verdier. Variabelen «p» er en konstant trykkraft som brukeren kan velge å legge inn ved dimensjonering av tverrsnitt.

I første runde i m- og u-løkken er tøyningen i underkant tverrsnitt betydelig større i strekk relativt til trykktøyningen i overkant tverrsnitt. Dette medfører at summen av krefter starter med en høy positiv verdi når m=1 og u=1, deretter reduseres summen gradvis ettersom trykktøyningen i overkant øker i takt med u-løkkens runder. Som beskrevet tidligere i dette delkapittelet er det m-løkken som styrer om tøyningen i overkant tverrsnitt skal økes eller reduseres. Innenfor m=1 vil u-løkken kjøre (samtidig som summen av krefter reduseres) inntil summen passerer null. Denne betingelsen er styrt av verdien av «m» som enten partall eller oddetall, og er beskrevet i suben som:

```
'u-løkken stoppes når kravet tilfredsstilles  
If m Mod 2 <> 0 And sum < 0 Then 'm oddetall  
Exit For  
ElseIf m Mod 2 = 0 And sum > 0 Then 'm partall  
Exit For  
ElseIf 0.1 > sum And sum > -0.1 Then  
Exit For  
End If
```

Mod-operatoren i VBA beregner resten i et divisjonsstykke. For et gitt tilfelle m=8 gir m Mod 2 = 0 fordi 8 deles opp i to nøyaktig fire ganger med null i rest: 8=2+2+2+2+0. For m = 9 gir m Mod 2 = 1 fordi 9=2+2+2+2+1. Dette brukes til å definere om variabelen m er et partall eller oddetall; m Mod 2 = 0 er ekvivalent med «m er et partall» og m Mod 2 <> 0 er ekvivalent med

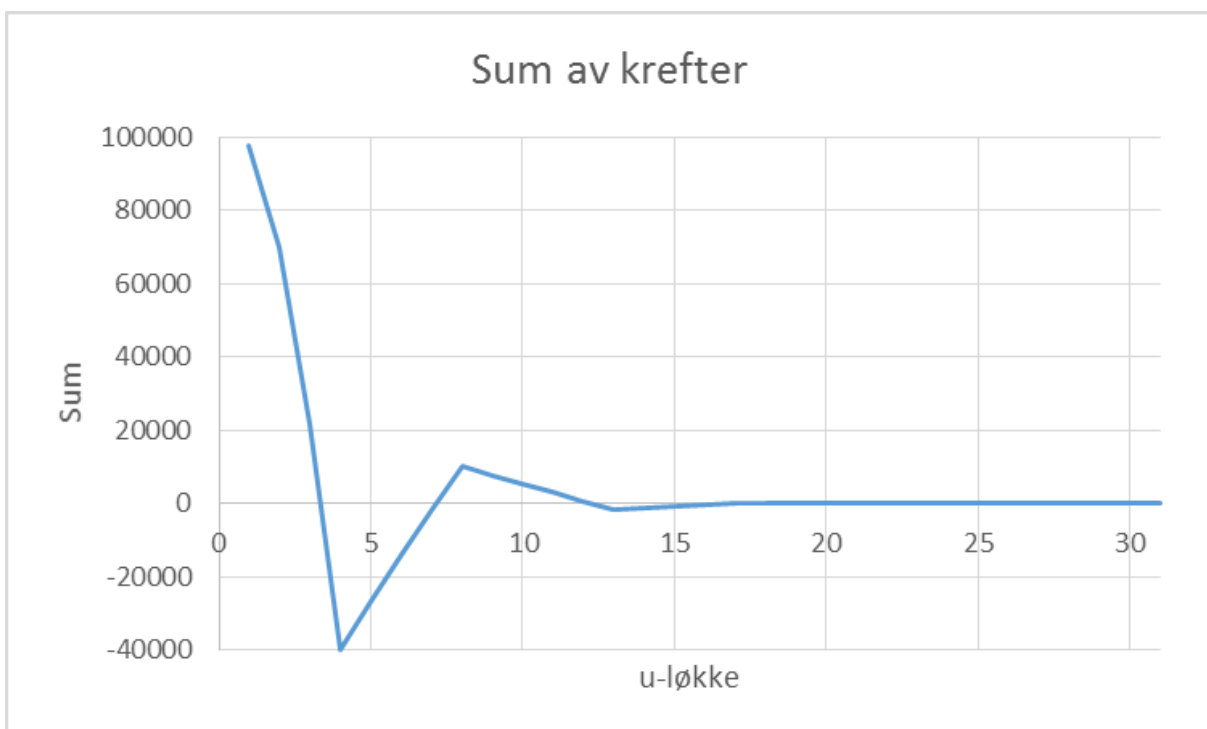


«m er et oddetall» (<> betyr ulik i VBA). If-setningen over gjør at u-løkken stopper på første negative verdi av summen av krefter når «m» er et oddetall, og første positive verdi når «m» er et partall.

Betingelsen for når m-løkken skal stoppe er som følger:

```
If 0.1 > sum And sum > -0.1 Then
    Exit For
End If
```

Betingelsen gjør at m-løkken skal stoppe når summen av krefter ligger mellom -0,1 N og +0,1 N. Samme betingelse står også i u-løkken (se over), men det er kun for effektivisering av programmet slik at man unngår å kjøre flere runder i u-løkken der betingelsen allerede er oppfylt.



Figur 57: Sum av krefter

Figur 57 viser hvordan summen av krefter konvergerer mot null for økende antall runder i u-løkken. Det aktuelle eksempelet stopper på  $m=9$ ,  $u=31$  og  $sum = -0,039$  N, som er første verdi innenfor grensen;  $sum \in <-0.1 \text{ N}, 0.1 \text{ N}>$ . Retningen har endret seg 8 ganger, og tøyingsstegene i overkant tverrsnitt reduseres hver gang «m» øker.

Momentet tilhørende en spesifikk krumningstilstand beregnes innenfor x-løkken, etter at kravet om likevekt av krefter er tilfredsstilt. Kraftarmene som svarer til de forskjellige kreftene

### 3 ConLam - Beregningsprogram

(beregnet i u-løkken) beregnes fra arealsenter av betongtverrsnittet til arealsenteret til den enkelte kraft:

```
'Strekkarmeringens arm 1 'Trykkarmeringens arm 1 'Spennarmeringens arm 1
ys1 = tpb - (tv_h - d1) yt1 = (tv_h - tpb) - dt1 yp1 = tpb - (tv_h - dp1)
'Strekkarmeringens arm 2 'Trykkarmeringens arm 2 'Spennarmeringens arm 2
ys2 = tpb - (tv_h - d2) yt2 = (tv_h - tpb) - dt2 yp2 = tpb - (tv_h - dp2)
'Strekkarmeringens arm 3 'Trykkarmeringens arm 3 'Forsterkning arm
ys3 = tpb - (tv_h - d3) yt3 = (tv_h - tpb) - dt3 yf = tpb
'Strekkarmeringens arm 4 'Trykkarmeringens arm 4
ys4 = tpb - (tv_h - d4) yt4 = (tv_h - tpb) - dt4
```

Momentet er en summering av kraft\*arm fra de forskjellige kraftbidragene med tilhørende kraftarmer, i tillegg til det akkumulerte momentbidraget fra betongen «M\_b» beregnet i i-løkken. Hvert ledd i momentberegningen skal gi positivt bidrag til momentet uavhengig av om eksempelvis slakkarmering i strekk havner i trykksonen, da blir både kraft og arm negativt og resultatet positivt. Fortegnene til trykkarmeringsleddene er negative i formelen, fordi kraften er negativ mens armen er positiv. Momentet deles på 1 000 000 for omregning fra Nmm til kNm. Utregningen av momentet er vist under:

```
'Moment
moment = ((S1 * ys1) + (S2 * ys2) + (S3 * ys3) + (S4 * ys4)
          - (St1 * yt1) - (St2 * yt2) - (St3 * yt3) - (St4 * yt4)
          + (Sp1 * yp1) + (Sp2 * yp2) + (F * yf) + M_b) * (1 / 1000000)
```

Krumningen beregnes ved trekantbetraktning av tøyninger og tverrsnittshøyde som vist under:

```
'Krumning
krumning = (uk_tøyning - ok_tøyning) / tv_h
```

Relevante beregnede verdier fra suben «Iterasjon\_forsterket\_rektangel()» skrives inn i celler i arket «Beregning forsterket» i Excel. Et eksempel på «output» fra suben følger:

```
Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 1) = moment
```

Momentverdien beregnes en gang for hverrunde i x-løkken og skrives ut i kolonne 1, rad x+1. Det er dog kun verdier som er beregnet fra tøyningstilstander som befinner seg innenfor materialenes tøyningsgrenser som er aktuelle som «output». Følgende if-setning sørger for at dette ivaretas:

```
'Output
If ok_tøyning > (ecu2 - 0.000001) And as1_tøyning < (eud + 0.000001)
  And ap1_tøyning < (epud + 0.000001) And f_tøyning < (e_f + 0.000001) Then
```

Innenfor denne if-setningen følger alle variablene som plottes i Excel, deriblant momenteksempelet over.

Som beskrevet tidligere i dette delkapittelet styrer j- og x-løkken tøyningene i underkant tverrsnitt, der «j» styrer det som skjer i «x», og sistnevnte utfører beregningene. Innenfor hvert tøyningstrinn i underkant tverrsnitt i «x» beregnes likevekt av krefter i «m» og «u», deretter beregnes moment, og verdiene plottes i Excel. For å sørge for at suben beregner tilstrekkelig nært opp mot tøyningsgrensene til de forskjellige materialene så itererer tøyningen i underkant tverrsnitt opp mot den tøyningsgrensen som passerer først. For j=1 øker tøyningen i underkant i takt med økende «x». Når en av tøyningsgrensene passerer økes «j» til to, og tøyningene reduseres igjen (med mindre tøyningsteg). Ettersom flere tøyningsgrenser kan passerer på ett tøyningsteg når tøyningen økes, kreves det at alle tøyningsgrensene må passerer når tøyningen reduseres igjen. Som for m- og u-løkken så brukes Mod-operatoren i x- og j-løkken til å styre når de sistnevnte løkkene skal stoppe. Betingelsene er formet i en if-setning i slutten av x-løkken:

```
If j Mod 2 <> 0 And ok_tøyning < ecu2 Then 'j oddetall
  Exit For
  ElseIf j Mod 2 <> 0 And as1_tøyning > eud Then 'j oddetall
  Exit For
  ElseIf j Mod 2 <> 0 And ap1_tøyning > epud Then 'j oddetall
  Exit For
  ElseIf j Mod 2 <> 0 And f_tøyning > e_f Then 'j oddetall
  Exit For
  ElseIf j Mod 2 = 0 And ok_tøyning > ecu2 And as1_tøyning < eud
  And ap1_tøyning < epud And f_tøyning < e_f Then 'j partall
  Exit For
  ElseIf ok_tøyning > ecu2 And as1_tøyning < eud And ap1_tøyning < epud
  And (e_f + 0.000001) > f_tøyning And f_tøyning > (e_f - 0.000001) Then
  Exit For
End If
```

For alle oddetall av variabelen «j» økes tøyningen i underkant tverrsnitt, og x-løkken stopper når en (eller flere) av grensene passerer. For alle partall av «j» reduseres tøyningen, og x-løkken stopper når tøyningene har passert alle tøyningsgrensene. Den siste betingelsen i if-setningen over, stopper x-løkken dersom tøyningen i forsterkningsmaterialet treffer innenfor en bestemt nøyaktighet, samtidig som ingen av de andre tøyningsgrensene er passert. Dette er for å effektivisere programmet slik at man unngår å kjøre flere iterasjoner dersom betingelsen oppfylles.

If-setningen i slutten av den innerste løkken «j» gjør at iterasjonene stoppes når ønsket tøyningnøyaktighet er oppnådd:

### 3 ConLam - Beregningsprogram

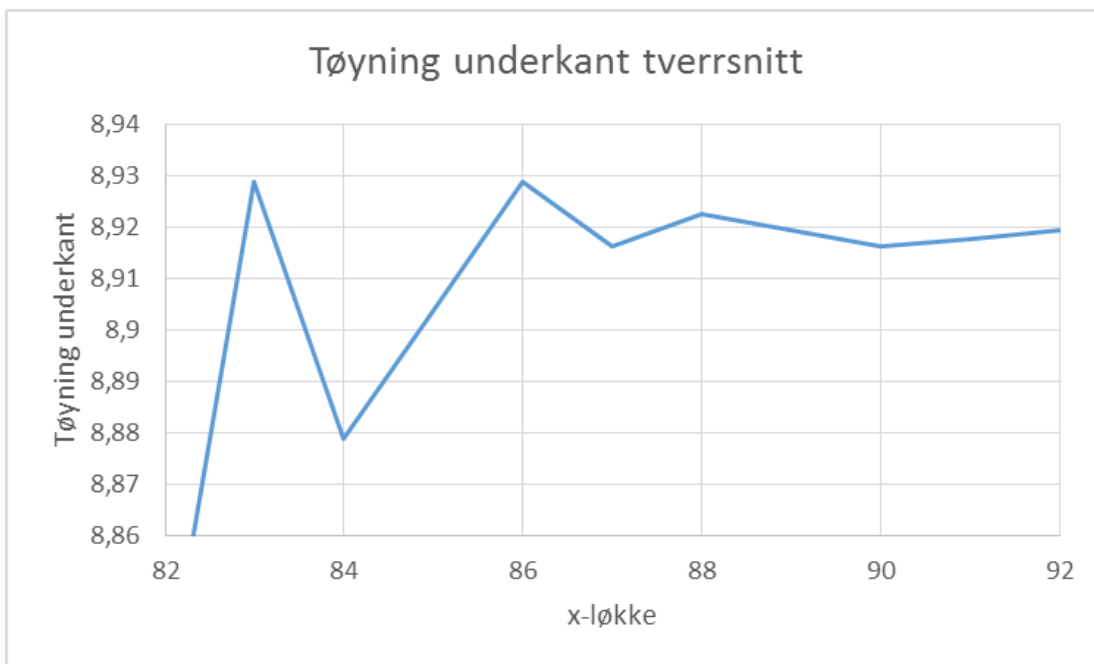
```
If (ecu2 - 0.000001) < ok_tøyning And ok_tøyning < (ecu2 + 0.000001)
  And as1_tøyning < eud And ap1_tøyning < epud And f_tøyning < e_f Then
  Exit For
ElseIf (eud + 0.00001) > as1_tøyning And as1_tøyning > (eud - 0.00001)
  And ok_tøyning > ecu2 And ap1_tøyning < epud And f_tøyning < e_f Then
  Exit For
ElseIf (epud + 0.00001) > ap1_tøyning And ap1_tøyning > (epud - 0.00001)
  And ok_tøyning > ecu2 And as1_tøyning < eud And f_tøyning < e_f Then
  Exit For
ElseIf (e_f + 0.000001) > f_tøyning And f_tøyning > (e_f - 0.000001)
  And ok_tøyning > ecu2 And as1_tøyning < eud And ap1_tøyning < epud Then
  Exit For
End If
```

Betingelsene stopper j-løkken når nøyaktigheten for ett enkelt material er oppnådd samtidig som ingen av tøyningsgrensene for de andre materialene er oversteget. Nøyaktigheten for slakkarmering og spennarmering er satt til tøyningsgrensen  $\pm 0,01$  ‰, og tøyningsgrensen  $\pm 0,001$  ‰ for overkant betongtverrsnitt og forsterkningsmateriale.

Figur 58 og Figur 59 viser hvordan tøyningen i underkant tverrsnitt itererer mot en grense. For det aktuelle tilfellet er det betongtøyningen i overkant tverrsnitt som utgjør den kritiske grensen. For hvert punkt i grafen har løkkene «m» og «u» funnet likevekt av krefter, deretter kontrolleres tøyningsgrensene til hvert material som beskrevet over. Eksempelet i Figur 58 og Figur 59 stoppet ved en betongtøyning i overkant på 3,5006 ‰ (stukning),  $x=92$  og  $j=7$ . Tøyningen i underkant har da snudd seks ganger.



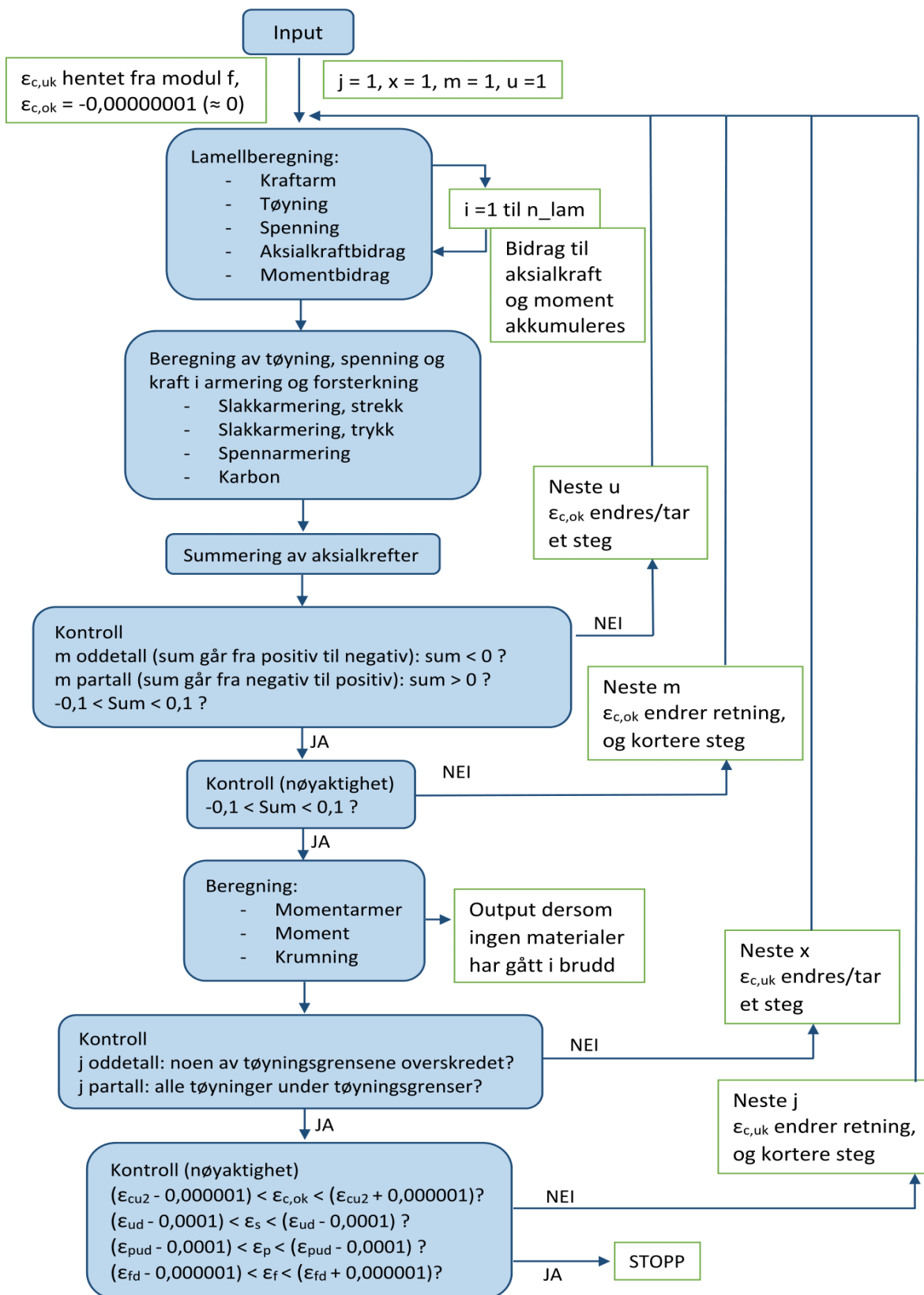
Figur 58: Tøyning underkant tverrsnitt



Figur 59: Nærbilde av Figur 58

Figur 60 viser flytskjema for suben «Iterasjon\_forsterket\_rektangel», og oppsummerer det som er beskrevet i dette kapitlet. Med ordene «Input» og «output» menes kommunikasjonen mellom suben og Excel. Verdier hentes fra Excel i starten av suben og brukes som «input» til beregningene. Relevante beregnede verdier skrives fra suben tilbake til Excel som «output» i slutten av suben.

### 3 ConLam - Beregningsprogram

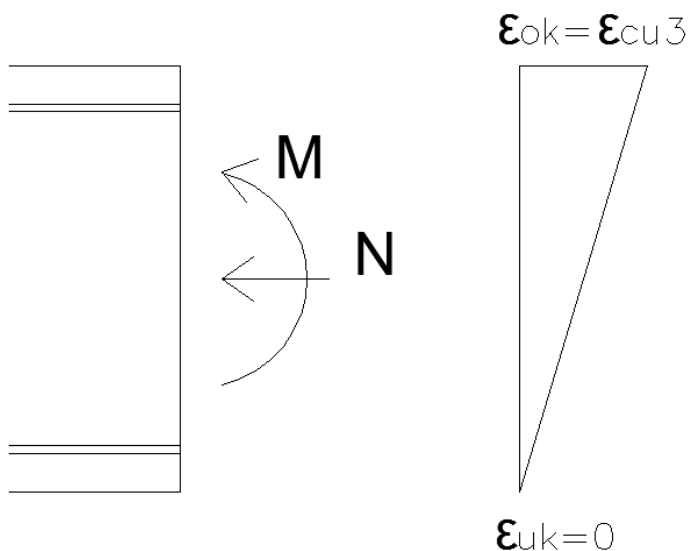


Figur 60: Flytskjema over sub «Iterasjon\_forsterket\_rektangel».

### 3.3 Begrensninger

En av utfordringene ved å utvikle et beregningsprogram for kapasitetsberegning er å ivareta brukervennligheten samtidig som man ønsker mest mulig fleksibilitet, to aspekter som gjerne går på bekostning av hverandre. Det finnes et utall forskjellige tverrsnittsformer, armeringsmengder, materialtyper og -kvaliteter, kombinasjoner av samtidig virkende laster og mulige forsterkningsmetoder for betongbjelker. Et program utviklet i løpet av en masteroppgave kan ikke inkludere alle mulige eventualiteter av tverrsnittsforsterkning. ConLam er forsøkt utviklet som et enkelt og oversiktlig program med et relativt bredt spekter av brukerkontrollerte tilpasninger, men det har sine begrensninger.

Som beskrevet i kapittel 2.5 er strekkapasiteten til betongen neglisjert i ConLam. Dette gjelder også i bruksgrensetilstanden ved beregning av momentkapasitet med spenningsgrenser i materialene og beregning av bøyestivhet for forsterket tverrsnitt. I henhold til EC2 punkt 7.1 (2) bør tverrsnittene forutsettes å være uopprissede (med visse vilkår) ved beregning av nedbøyning og spenninger i bruksgrensetilstanden. Ved forsterkning av eldre konstruksjoner er det gjerne usikkert hvilke belastninger konstruksjonen har vært utsatt for, og dermed også i hvilken grad tverrsnittet er opprisset. På grunn av dette er det valgt å beregne konservativt, og se bort fra strekkapasiteten til betongen.



Figur 61: Grensetilfelle av tøyningstilstand for trykkbelastet tverrsnitt.

ConLam er ikke laget for å beregne strekkbelastede tverrsnitt, kun trykkraft i kombinasjon med bøyning eller ren bøyning. Det er valgt utviklet slik med bakgrunn i antatt aktuelle bruksområder der trykkrefter gjerne er tilstedeværende, som for bruer. Programmet er videre begrenset til trykkraft i kombinasjon med bøyning, ikke trykkraft alene. ConLam gir dog resultater ned mot rent trykk, men dersom man får trykktøyning i både over- og underkant tverrsnitt ved moment-

kapasitetsberegninger så skal resultatet forkastes. Nedre grense for ConLam er vist i Figur 61, med null tøyning på en side når bruddtøyning oppnås på motsatt side.

Ved bruk av ConLam forutsettes det at ingen av materialene i tverrsnittet har blitt belastet på en slik måte at de har blitt påført varige deformasjoner. Med andre ord, at hverken slakkarmeringen eller spennarmeringen har blitt utsatt for tøyninger over flytegrensen/0,1%-grensen. Slakkarmering i tverrsnitt uten aksialkraft starter med null tøyning når tverrsnittet har null krumning, dermed gir armeringen et kraftbidrag så fort tverrsnittet utsettes for en liten krumning. Dersom slakkarmeringen har vært utsatt for varige strekkdeformasjoner vil

### 3 ConLam - Beregningsprogram

det gi et trykkbidrag ved null krumning for så å gå mot null ved en liten krumning, og deretter gi strekkbidrag for videre krumningsforløp.

Beregningsprogrammet er videre begrenset til å beregne T-tverrsnitt og rektangulære tverrsnitt. For T-tverrsnitt tillates både konstante og varierende tykkelser på steg og flens, dermed dekkes mange aktuelle betongbjelker. T-tverrsnittet med variable tykkelser er dog begrenset i form av at steget må være tykkere i toppen enn i bunnen, og flensen må være tykkere innerst mot flensen enn ute ved kanten.

For di ConLam er et tverrsnittsprogram kan det ikke utføre nedbøyningsberegninger. Det kan dog beregne bøyestivhet for forsterket tverrsnitt slik at brukeren selv har mulighet til å beregne nedbøyning ved en enkel håndberegning. Tilsvarende begrensning gjelder for det brukervalgte initialmomentet som tverrsnittet er belastet med ved påføring av forsterkning; brukeren må selv beregne dette momentet ut fra lasten som virker på bjelken ved enkel håndberegning. Det beregnes kun bøyestivhet for forsterket tverrsnitt, ikke for uforsterket.

Programmet beregner kun for brudd- og bruksgrensetilstanden som beskrevet i denne oppgaven. Det beregner ikke ulykkestilstand som brann og støtbelastninger, eller jordskjelv. CFRP-forsterkningen svekker ikke konstruksjonens motstand mot brann. Et tverrsnitt som har tilstrekkelig lastbærende kapasitet ved brann før forsterkning, vil ha tilsvarende eller bedre kapasitet etter forsterkning. Bedre kapasitet kan oppnås ved bruk av brannbeskyttelse av CFRP-forsterkningen (Thorenfeldt et al. 2006, 3).

Beregningsmetoden som programmet baserer seg på gir et estimat av momentkapasiteten, som beskrevet i kapittel 2.5. Dette medfører en viss begrensning i nøyaktigheten til resultatene programmet gir. Inndeling av tverrsnittet i lameller, materialmodeller som beregner spenning ut fra beregnet tøyning, og alle forutsetningene beskrevet i kapittel 2.5 er tilnærminger til virkeligheten som medfører avvik mellom beregnet og faktisk momentkapasitet. Lamellmetoden gir et mer nøyaktig resultat sammenlignet med spenningsblokk. De øvrige forutsetningene beskrevet i kapittel 2.5 kan antas å være så gode at de gir tilstrekkelig nøyaktige resultater fordi de er velutprøvde og standardiserte. Variablene som brukes i programmet medfører også en viss unøyaktighet. Som beskrevet i kapittel 3.2.2 så angis variablene datatyper, og de forskjellige datatypene kan kun lagre et begrenset antall gjeldende siffer. Variablene i programmet blir derfor avrundet til den nøyaktigheten datatypen tillater i alle beregningene de inngår. Datatypen som er mest benyttet er «double», og kan lagre 15 gjeldende siffer. Deklareringen kan være en mulig feilkilde i programmet grunnet sin unøyaktighet. I tillegg setter datatypene øvre og nedre grense for verdien variablene kan ha, også beskrevet i kapittel 3.2.2. Disse grensene virker begrensende på programmet og kan medføre feil. Datatypene angitt for variablene i programmet er valgt på grunnlag av gjentatt testing underveis i utviklingen samt rasjonelle resonnement.

Programmet er begrenset til bjelker; ikke skiver, plater, søyler eller andre konstruksjonsdeler. Det forutsettes at brukere av ConLam har god konstruksjonsforståelse og inngående



kunnskaper om dimensjonering. Brukeren bør vite forskjellen på skiver og bjelker, og på grunnlag av sine kunnskaper kunne velge en fornuftig grense i forholdet mellom lengde og høyde på elementet for å verifisere at det er en bjelke. Det vil si at bøyedeformasjoner er dominerende, og skjærdeformasjoner kan neglisjeres.

ConLam beregner kun tverrsnitt utsatt for bøyning eller bøyning i kombinasjon med trykkraft. Det dekker ikke skjærkrefter eller torsjonskrefter, uforsterket eller forsterket. Ei heller rissviddeberegninger kan utføres i programmet, da lasthistorikken til et gammelt konstruksjonselement gjerne er usikker. Når man i tillegg forsterker elementet og belaster det ytterligere inkluderes flere usikre variabler som kompliserer beregningene. Programmet tar ikke hensyn til virkningen av kryp eller svinn i beregningene, men brukeren kan benytte en selvvalgt E-modul som kan inkludere krypeffekten ved beregning av bøyestivhet. For beregning av krypjustert E-modul kan formelen i EC2 7.4.3 (5) benyttes, som vist under.

$$E_{c,\text{eff}} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)} \longrightarrow \text{Selvvalgt E-modul, } E'_c = \boxed{\phantom{000000}} \text{ N/mm}^2$$

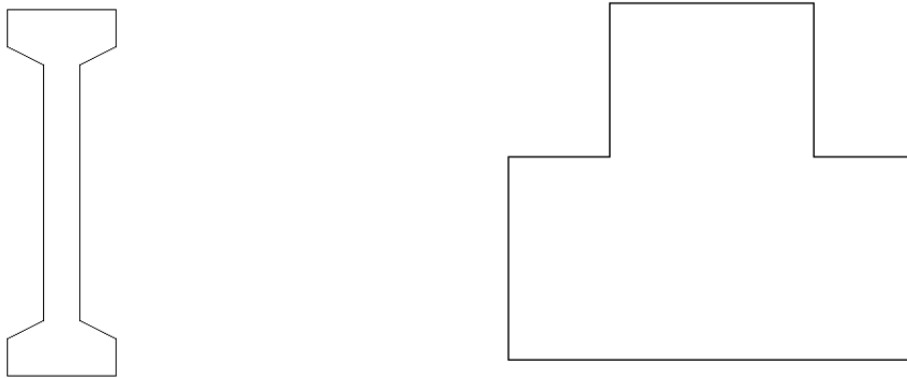
ConLam er heller ikke laget for å beregne forankringslengder eller heft for CFRP-forsterkning, da det er et tverrsnittsprogram.

Brukeren kan velge betongfastheter fra og med C12/15 til og med C90/105 i programmet. Utover det går det an å åpne de låste cellene med passordet angitt i kapittel 3.1.1 og skrive inn en ikke-standardisert betongfasthet dersom det skulle være nødvendig. I følge (Thorenfeldt et al. 2006, 3) kan det være fare for avrivning/brudd i overdekningen som følge av skjærspenninger mellom forsterkning og betong ved lav betongfasthet, uten å angi noen nedre grense.

#### 3.4 Videreutvikling og forbedring

ConLam er ikke et ferdig utviklet beregningsprogram for karbonfiberforsterkning av betongkonstruksjoner. Programmet har en del begrensninger som beskrevet i kapittel 3.3, det er heller ikke et fullstendig bjelkedimensjoneringsprogram for betongbjelker med karbonfiberforsterkning. Hvilke forbedringer og forandringer som er mulige og ønskelige diskuteres herunder.

En relativt enkel måte å utvide brukermulighetene i programmet er å legge inn flere tverrsnittsformer. Figur 62 viser eksempler på tverrsnittsformer som er relativt vanlige i bruk, og som med fordel kan legges inn i ConLam. Lamellmetoden som programmet baserer seg på er veldig fleksibel med hensyn på tverrsnittsformer, og det er ikke særlig arbeidskrevende å legge til flere tverrsnittsformer. Mye kan kopieres fra relevante nåværende suber inn i nye suber tilhørende de nye tverrsnittsformene. Programmet blir ikke mindre brukervennlig med utvidede valgmuligheter av geometrisk utforming da det kun inkluderer noen ekstra valg i rullegardinen i toppen av input-arket.



Figur 62: I-bjelke og dobbel L-bjelke.

Hvis man ikke har mulighet til å måle nedbøyning på den fysiske bjelken før forsterkning, kan det være interessant å kunne beregne bøyestivheten til det uforsterkede tverrsnittet. Det vil gi mer utfyllende informasjon om kapasitetsøkningen ved forsterkning, samt at det utvider mulighetene for å bruke programmet til dimensjonering av betongbjelker uten forsterkning. Ved å gi brukeren mer informasjon økes kompleksiteten i programmet marginalt, men med et ryddig og intuitivt oppsett skal ikke denne utvidelsen ha noe å si for brukervennligheten. Det er relativt lite arbeidskrevende å inkludere bøyestivhet for uforsterket tverrsnitt da mye kan kopieres fra tilsvarende suber for forsterket tverrsnitt, med noen naturlige endringer.

Det bør kjøres mer testing og validering av programmet før det tas i bruk som dimensjoneringsprogram. Det er testet kontinuerlig i utviklingsfasen, i tillegg til de dokumenterte testene vist i kapittel 4. Ytterligere testing kan avdekke svakheter, feil, mangler og potensielle utviklingsaspekter ved programmet. Testing er noe tidkrevende, men avgjørende for programmets reliabilitet.

Dersom man trenger mye ekstra kapasitet, og det ikke kan oppnås med CFRP-forsterkning alene, så kan det være mulig å legge på forskjellige typer fiberforsterkning på samme bjelke. Ved å jekke opp en bjelke og påføre en forsterkningstype med stor bruddtøyning og lavere E-modul (som glassfiber), deretter belaste bjelken for så å påføre en annen forsterkningstype med mindre bruddtøyning og høyere E-modul (som karbonfiber) utenpå det andre laget. Denne metoden vil gi større momentkapasitet og bøyestivhet enn ved CFRP-forsterkning alene, men det er usikkert som det er praktisk mulig. Det fordrer blant annet at materialene er kompatible og lar seg lime til hverandre tilsvarende to lag av samme material. I tillegg er det en arbeidskrevende prosess å montere forsterkning i flere trinn, men det kan være kostbesparende i enkelte tilfeller. Det vil kreve grundig utredning og testing før det eventuelt monteres i en bærende konstruksjon. Dersom denne metoden blir aktuell i fremtiden, bør programmet utvides til å inkludere dette. Heller ikke denne utvidelsen er særlig arbeidskrevende å legge inn i programmet, den medfører enkelte endringer i subene som omhandler forsterket tverrsnitt samt noe endring i input-arket.

For at ConLam skal fungere som et mer fullstendig bjelkedimensjoneringsprogram for CFRP-forsterkede bjelker, bør det utvides til å inkludere heft mellom forsterkning og betong, samt brann og eventuelt jordskjelv. Det kan vurderes ytterligere inkludering av kryp, samt inkludering av svinn i beregningene i bruksgrensetilstanden. I tillegg bør det kunne utføre skjærkapasitetsberegninger, og eventuelt beregning av torsjonskapasitet. Videre kan programmet utvides til søyler, skiver og plater. Det er varierende grad av arbeidsmengde, kompleksitet og relevans i de nevnte mulige utvidelsene. Programmet er først og fremst et bjelkedimensjoneringsprogram basert på lamellmetoden, dermed kan det være fornuftig å rette fokus på de utvidelsene som kan basere seg på det.

Programmet bør generelt sett kontinuerlig videreutvikles og tilpasses endringer i regler og retningslinjer. Det bør tilstrebes å bevare eller forbedre brukervennligheten i programmet etter hvert som det utvikles. Enkelte valgmuligheter (som type CFRP-forsterkning) kan gjerne standardiseres, men samtidig bør fleksibiliteten i programmet bevares. Alle endringer i programmet bør testes grundig.

Det kan vurderes å eksportere hele programmet fra Excel til et egenutviklet format for et ryddigere og penere grensesnitt. En endring som vil være omfattende og arbeidskrevende, men det vil gi programmet et mer profesjonelt utseende. I tillegg unngår man utfordringer knyttet opp mot rettigheter ved bruk av programvare levert av Microsoft ved eventuelt salg av programvaren ConLam.

### 4 Testing og diskusjon

#### 4.1 Generelt

For å verifisere ConLams pålitelighet har kontroll og testing vært en vesentlig del av arbeidet. Dette kontrollarbeidet har vært viktig både fortløpende under prosessen med oppbygningen av programmet, og etter programmet var ferdigstilt.

Underveis i prosessen har programmet blitt testet og sammenlignet med litteratur fra blant annet Sørensen (2010), ACI (2008), Täljsten, Blanksvärd, og Sas (2011), Thorenfeldt et al. (2006), samt nyeste versjon av Sika Carbodur beregningsprogram, og beregningsprogram utviklet av Bakkebø og Larssen (2015) i parallelt masterarbeid ved NTNU. Denne testingen har ført til korrigeringer av programmet underveis.

Etter ferdigstilling av første versjon av ConLam er det valgt å kontrollere og teste programmet opp mot teori og eksempler fra Sørensen (2010) og ACI (2008) da denne litteraturen dekker det meste av det programmet omhandler, samt at det er utført kontrollberegninger opp mot beregningsprogrammene til Sika, og Bakkebø og Larssen (2015). Det er denne testingen som blir presentert videre i dette kapitlet, samt i vedlegg C. Det er utført 11 ulike hovedtester, der noen inneholder flere deltester. Utvalget av tester er valgt for å dekke beregninger av ulike tverrsnitt som kan utføres av ConLam. Test 1 til 5 omhandler beregning på uforsterket, armerte betongtverrsnitt, mens test 6 til 10 inkluderer utenpåliggende fiberforsterkning. Test 1 til 8 er knyttet opp mot beregninger i bruddgrensetilstand, mens test 9 og 10 utfører kontroll av beregninger i bruksgrensetilstand. Test 11 er kontroll av ulike CFRP-forsterkede tverrsnitt og grensetilstander opp mot Sika Carbodur beregningsprogram.

I noen av testresultatene er de sammenlignede verdiene oppgitt med ulikt antall desimaler. Dette er gjort fordi eksemplene brukt til sammenligning har oppgitt verdier med ulikt antall gjeldende siffer sammenlignet med resultat i ConLam. Det er likevel valgt å oppgi avvikene med likt antall desimaler som den verdien med flest gjeldende siffer.

#### 4.2 Test 1: Rektangulært tverrsnitt – slakkarmering i strekk

Den første testen er utført for å kontrollere beregninger av rektangulære tverrsnitt med slakkarmering i strekk. Det er utført tre ulike deltester; under-, normal- og overarmert tverrsnitt. Resultatene fra beregninger i ConLam er sammenlignet med håndberegninger basert på teori og eksempler fra kapittel 4.2 i Sørensen (2010, 27-54). Håndberegningene er utført i Mathcad 15.0. Resultatene fra de ulike beregningene og tilhørende avvik er presentert i Tabell 11, Tabell 12 og Tabell 13. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i slakkarmering [‰]	11,62	11,42	-0,20	-1,7
Momentkapasitet [kNm]	85,0	86,6	+1,6	+1,9

Tabell 11: Test 1-1 – Resultat, underarmert tverrsnitt.

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i slakkarmering [‰]	5,57	5,59	+0,02	+0,4
Momentkapasitet [kNm]	132,0	132,3	+0,3	+0,2

Tabell 12: Test 1-2 – Resultat, normalarmert tverrsnitt.

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i slakkarmering [‰]	1,86	1,88	+0,02	+1,1
Momentkapasitet [kNm]	190,2	189,4	-0,8	-0,4

Tabell 13: Test 1-3 – Resultat, overarmert tverrsnitt.

Resultat fra testene viser generelt små avvik mellom håndberegning og beregninger utført i ConLam. Avvikene som er tilstede, blir likevel noe større ved større tøyninger i tverrsnittet. I håndberegningen knyttet til disse testene er det benyttet trykkspenningsblokk for betongen, samt ingen fastning i materialmodellen for slakkarmeringen. Dette skiller seg fra det teoretiske grunnlaget til ConLam, og medfører avvik i resultater. For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 1 i vedlegg C.

## 4 Testing og diskusjon

### 4.3 Test 2: Rektangulært tverrsnitt – slakkarmering i strekk og trykk

Test 2 er i likhet med test 1 utført for å kontrollere beregninger av rektangulære tverrsnitt med slakkarmering, men i denne testen er trykkarmering inkludert. Verdier fra beregninger i ConLam er sammenlignet med beregninger fra eksempel 4.6 i Sørensen (2010, 48-50), og resultat med tilhørende avvik er presentert i Tabell 14. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	<b>Sørensen (2010) eksempel 4.6</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i strekkarmering [%]	5	5,02	+0,02	+0,4
Tøyning i trykkarmering [%]	2,2	2,22	+0,02	+0,9
Momentkapasitet [kNm]	190	190,8	+0,8	+0,4

Tabell 14: Test 2 – Resultat, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.

Det teoretiske grunnlaget for håndberegningene i denne testen er det samme som for test 1, og det er også her små avvik i resultatene fra ConLam og håndberegninger. For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 2 i vedlegg C.

#### 4.4 Test 3: T-tverrsnitt – slakkarmering i strekk

Test 3 er en kontroll av beregninger for T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk. Beregninger av momentkapasitet til tverrsnittet utført i ConLam har blitt sammenlignet med eksempel 4.7 i Sørensen (2010, 53), samt at resultater for momentkapasitet og materialtøyninger er sammenlignet med beregning av samme tverrsnitt i beregningsprogram til Bakkebø og Larssen (2015). Resultat er presentert i Tabell 15 og Tabell 16. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	<b>Sørensen (2010) eksempel 4.7</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Momentkapasitet [kNm]	511	593,8 (Uten fastning: 553,1)	+82,8 (+42,1)	+16,2 (+8,2)

Tabell 15: Test 3 – Resultat, sammenligning med beregningseksempel i Sørensen (2010).

	<b>Beregningsprogram Bakkebø og Larssen</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i slakkarmering [‰]	28,0	30,01 (Uten fastning: 30,01) (Uten fastning og endret grensetøyning: 28,00)	+2,01 (+2,01) (0,00)	+7,2 (+7,2) (0,0)
Tøyning i betong [‰]	2,77	3,12 (Uten fastning: 2,94) (Uten fastning og endret grensetøyning: 2,79)	+0,35 (+0,17) (+0,02)	+12,6 (+6,1) (+0,7)
Momentkapasitet [kNm]	552,9	593,8 (Uten fastning: 553,1) (Uten fastning og endret grensetøyning: 552,9)	+40,9 (+0,2) (0,0)	+7,2 (0,0) (0,0)

Tabell 16: Test 3 – Resultat, sammenligning med beregningsprogram, Bakkebø og Larssen (2015).

Teorien bak eksempelet i Sørensen (2010, 53) er betydelig forenklet, og legger til grunn en antagelse om konstant betongtrykkspenning i hele flensen (og kun flensen), slik at trykkresultanten virker midt i flensen. Momentkapasiteten blir videre regnet ut ved å regne momentlikevekt om treffpunktet til trykkresultanten. I denne testen er tykkelse på flensen 150,0 mm. Sammenlignet gir beregninger i ConLam en trykksonehøyde på 66,0 mm. Dette faktum, sammen med at ConLam benytter materialmodell med fastning for slakkarmeringen gir forklaring på det store avviket i momentkapasitet. Man ser ut fra verdiene i Tabell 15 at beregninger i ConLam uten fastning på armeringen gir mindre avvik.

#### 4 Testing og diskusjon

Når det gjelder beregningsprogrammet til Bakkebø og Larssen, så egner dette seg best til beregning av CFRP-forsterket tverrsnitt. På grunn av tøyningsgrense i CFRP kan man ikke kjøre dette uforsterkede tverrsnittet opp til brudd i armeringen, slik som i ConLam. Dette bidrar derfor til avvikende verdier i testingen, sammen med at det i programmet til Bakkebø og Larssen blir benyttet trykkspenningsblokk-beregning på betongen og armeringsstål uten fastning. For å kunne verifisere påliteligheten til beregningene utført i ConLam på denne type tverrsnitt er det derfor utført forsøk uten fastning i armeringen, samt forsøk med 28 % grensetøyning for stålet i tillegg til ingen fastning i armeringen. For det siste forsøket ble det tilnærmet ingen avvik sammenlignet med programmet til Bakkebø og Larssen.

Testen viser to ting; tallene i Tabell 16 (og til dels Tabell 15) verifiserer at beregningene utført i ConLam er pålitelige. Dernest viser den at man oppnår betraktelig bedre kapasitet ved beregning i ConLam i forhold til den forenklede håndberegningemetoden, noe som er kost- og tidsbesparende, samt miljøvennlig.

For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 3 i vedlegg C.



#### 4.5 Test 4: Rektangulært tverrsnitt – spennarmering, og slakkarmering i strekk og trykk

Test 4 er inndelt i to deltester. Test 4-1 er en kontroll av rektangulært tverrsnitt med spennarmering, mens test 4-2 i tillegg inkluderer slakkarmering i strekk og trykk. Beregningene i ConLam er sammenlignet med eksempel 7.1 i Sørensen (2010, 267-268). Testresultatene er presentert i Tabell 17 og Tabell 18. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	<b>Sørensen (2010) eksempel 7.1</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	2,42	-1,08	-30,9
Tøyning i spennarmering [‰]	13,09	10,02	-3,07	-23,5
Momentkapasitet [kNm]	1456	1496,5	+40,5	+2,8

Tabell 17: Test 4-1 – Resultat, kun spennarmering.

	<b>Sørensen (2010) eksempel 7.1</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	2,42	-1,08	-30,9
Tøyning i spennarmering [‰]	13,09	10,02	-3,07	-23,5
Momentkapasitet [kNm]	1539	1586,0	+47,0	+3,1

Tabell 18: Test 4-2 – Resultat, spennarmering og slakkarmering i strekk og trykk.

Materialtøyninger fra eksempel 7.1 er ikke oppgitt, men beregnet med utgangspunkt i angitt tverrsnittsgeometri og trykksonehøyde. I ConLam er spennarmeringens bruddgrense satt til 10 ‰. Denne grensen ser ut til å være oversteget i eksempel 7.1, og det er derfor vanskelig å sammenligne testresultatene. Av den grunn er det i tillegg utført beregninger på samme tverrsnitt hvor bruddgrensen er økt til 30 ‰ i ConLam. Dette ga verdier som kunne sammenlignes, og benyttes til å verifisere påliteligheten til resultatene fra ConLam. Disse resultatene er presentert i Tabell 19 og Tabell 20. Eksempel 7.1 benytter trykkspenningsblokk på betongen og ingen fastning på spennarmeringen, noe som mest sannsynlig er årsaken til de små avvikene i test 4.

#### 4 Testing og diskusjon

	<b>Sørensen (2010) eksempel 7.1</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0,0	0,0
Tøyning i spennarmering [‰]	13,09	13,03	-0,06	-0,5
Momentkapasitet [kNm]	1456	1472,0	+16,0	+1,1

Tabell 19: Test 4-1 – Resultat, kun spennarmering, bruddgrensen på 30 ‰.

	<b>Sørensen (2010) eksempel 7.1</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0,0	0,0
Tøyning i spennarmering [‰]	13,09	13,03	-0,06	-0,5
Momentkapasitet [kNm]	1539	1563,1	+24,1	+1,6

Tabell 20: Test 4-2 – Resultat, spennarmering og slakkarmering i strekk og trykk, bruddgrense 30 ‰.

I Tabell 17 og Tabell 18, hvor det er benyttet 10 ‰ tøyningsgrense i ConLam, får tverrsnittet en høyere momentkapasitet sammenlignet med Tabell 19 og Tabell 20, hvor det benyttes 30 ‰ tøyningsgrense. Når tøyningsgrensen til spennarmeringen økes så reduseres den tilhørende E-modulen, fordi bruddspenningsgrensen forblir den samme. I de sistnevnte tabellene er det trykkbrudd i betongen ved 13,03 ‰ tøyning i spennarmeringen, noe som medfører lavere spenning i spennarmeringen og dertil lavere momentbidrag, sammenlignet med tilfellet for Tabell 17 og Tabell 18. Det er ikke vedlagt detaljert informasjon fra Tabell 19 og Tabell 20 da bakgrunnen for disse resultatene anses for tilstrekkelig belyst.

For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 4 i vedlegg C.

#### 4.6 Test 5: Rektangulært tverrsnitt – slakkarmering i strekk og trykk, med normalkraft

Denne testen er utført for å kontrollere beregninger av rektangulære tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk, med moment-normalkraft-interaksjon (M-N-interaksjon). Beregninger i ConLam blir her sammenlignet med verdier fra eksempel 4.13 i Sørensen (2010, 90-94). Tøyningstilstand med rent trykk i tverrsnittet er utelatt, da ConLam ikke er ment til å beregne rent trykkbelastede konstruksjonsdeler, som beskrevet i kapittel 3.3. Testen består av fire deltester med varierende M-N-interaksjon. I ConLam testes aksialkraften inn som input, mens i eksempelet er den beregnet. Dermed er det gitt at det ikke er noe avvik i normalkraft. Resultatene er presentert i Tabell 21, Tabell 22, Tabell 23 og Tabell 24. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	<b>Sørensen (2010) eksempel 4.13</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0	0,0
Tøyning i trykkarmering [‰]	3,15	3,15	0	0,0
Tøyning i strekkarmering [‰]	0,35	0,32	-0,03	-8,6
Normalkraft [kN]	2374	2374	0	0,0
Momentkapasitet [kNm]	151	144,9	-6,1	-4,0

Tabell 21: Test 5-1 – Resultat, trykkbrudd i betong.

	<b>Sørensen (2010) eksempel 4.13</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0	0,0
Tøyning i trykkarmering [‰]	2,87	2,86	-0,01	-0,3
Tøyning i strekkarmering [‰]	2,17	2,25	+0,08	+3,7
Normalkraft [kN]	906	906	0	0,0
Momentkapasitet [kNm]	305	303,6	-1,4	-0,5

Tabell 22: Test 5-2 – Resultat, trykkbrudd i betong og flytning i strekkarmering.

#### 4 Testing og diskusjon

	<b>Sørensen (2010) eksempel 4.13</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0	0,0
Tøyning i trykkarmering [‰]	2,56	2,55	-0,01	-0,4
Tøyning i strekkarmering [‰]	5,0	5,04	+0,04	0,8
Normalkraft [kN]	605	605	0	0,0
Momentkapasitet [kNm]	290	290,3	+0,3	+0,1

Tabell 23: Test 5-3 – Resultat, trykkbrudd i betong og dobbel flytetøyning i strekkarmering (normalarmert).

	<b>Sørensen (2010) eksempel 4.13</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0	0,0
Tøyning i trykkarmering [‰]	1,444	1,49	0,046	+3,2
Tøyning i strekkarmering [‰]	15	14,61	-0,39	-2,6
Normalkraft [kN]	63	63	0	0,0
Momentkapasitet [kNm]	218	225,1	+7,1	+3,3

Tabell 24: Test 5-4 – Resultat, trykkbrudd i betong og stor tøyning i strekkarmering.

Eksempel 4.13 i Sørensen (2010) er basert på teori med trykkspenningsblokk for betongen, samt ingen fastning av slakkarmering. Avvik mellom eksempel og ConLam er små, og dette verifiserer at ConLam fungerer for konstruksjonsdeler utsatt for ytre aksialkraft kombinert med moment. Ut fra denne testen kan det se ut som at ConLam gir større kapasitet ved lite normalkraft, og mindre kapasitet ved større normalkraft sammenlignet med eksempelet. Dette kommer i hovedsak av forskjell i materialmodell for utregning av betongspenninger. For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 5 i vedlegg C.

#### 4.7 Test 6: Rektangulært tverrsnitt – slakkarmering i strekk og FRP-forsterkning

Dette er den første testen som inkluderer utenpåliggende fiberforsterkning. Testen er benyttet til å kontrollere beregningene i ConLam knyttet til rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk og FRP-forsterkning. Testen har sammenlignet eksempel i kapittel 15.3 i ACI (2008, 43-47) og beregninger fra ConLam. E-modulen til fiberforsterkningen i dette eksempelet er på kun 37 000 MPa. Det er ikke angitt å være karbonfiber, noe det sannsynligvis ikke er da karbonfiber generelt sett har betydelig høyere E-modul. Til tross for dette anses testen som relevant fordi fibermaterialets spenning-tøyningsrelasjon beregnes lineært (i likhet med karbonfiber) i både eksempelet og i ConLam. Resultat fra testen er presentert i Tabell 25. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	Eksempel fra ACI	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet ULS uforsterket [kNm]	396,3	406,0	+9,7	+2,4
Initialtøyning [‰]	0,61	0,61	0	0,0
Tøyning i betong [‰]	2,63	2,58	-0,05	-1,9
Tøyning i strekkarmering [‰]	8,3	8,33	+0,03	+0,4
Tøyning i forsterkning [‰]	9,0	9,0	0	0,0
Momentkapasitet ULS forsterket [kNm]	510,3	512,4	+2,1	+0,4

Tabell 25: Test 6 – Resultat.

Sikkerhetsfaktorer, materialegenskaper og tøyningsgrenser er i denne testen justert for å kunne sammenlignes med de amerikanske verdiene fra eksempelet. Det er likevel noe usikkerhet knyttet til materialmodeller benyttet i denne testen. Karakteristisk og dimensjonerende fasthet for betong er satt til 34,5 MPa og sikkerhetsfaktorene er satt til 1,0. Armeringen er gitt en flytegrense på 476 MPa, uten fastning. Testen gir minimale avvik mellom de ulike beregningene, noe som kan være med på å verifisere at ConLam fungerer for denne type tverrsnitt med utenpåliggende forsterkning. For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 6 i vedlegg C.

## 4 Testing og diskusjon

### 4.8 Test 7: T-tverrsnitt – spennarmering og FRP-forsterkning

Test 7 er blitt gjennomført i den hensikt å kontrollere beregning av T-tverrsnitt med spennarmering og utenpåliggende fiberforsterkning i ConLam. Testen er en sammenligning mellom eksempel i kapittel 15.5 i ACI (2008, 52-57) og beregninger i ConLam. I dette eksempelet har også forsterkningsmaterialet en E-modul på 37 000 MPa, som i sammenligningseksempelet i test 6, altså er det mest sannsynlig ikke karbonfiber. Testen anses likevel som relevant, av samme grunn som for test 6. Resultater fra test 7 er presentert i Tabell 26. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	<b>Eksempel fra ACI</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Momentkapasitet ULS uforsterket [kNm]	501,6	504,2	+2,6	+0,5
Initialtøyning [‰]	-0,03	-0,03	0,00	0,0
Tøyning i betong [‰]	0,91	0,93	+0,02	+2,2
Tøyning i spennarmering [‰]	16,05	15,85	-0,2	-1,2
Tøyning i forsterkning [‰]	11,3	11,30	0,0	0,0
Momentkapasitet ULS forsterket [kNm]	661,7	658,6	-3,1	-0,5

Tabell 26: Test 7 – Resultat.

Sikkerhetsfaktorer, materialeegenskaper og tøyningsgrenser er i denne testen justert for å kunne sammenlignes med de amerikanske verdiene fra eksempelet. Det er likevel noe usikkerhet knyttet til materialmodeller benyttet i denne testen. Karakteristisk og dimensjonerende fasthet for betong er satt til 27,6 MPa og sikkerhetsfaktorene er satt til 1,0. Karakteristisk og dimensjonerende flytegrense (0,1%-grense) til spennarmeringen er satt til 1586 MPa. Fra denne verdien er det angitt en fastning på spennarmeringen opp til 16 ‰ tøyning og 1831 MPa spenning. Test 7 gir også minimale avvik mellom de ulike beregningene, noe som kan være med på å verifisere at ConLam fungerer for spennarmerte T-tverrsnitt med utenpåliggende forsterkning. For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 7 i vedlegg C.

#### 4.9 Test 8: T-tverrsnitt – slakkarmering i strekk og CFRP-forsterkning

Test 8 søker å kontrollere ConLam sine beregninger av T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og utenpåliggende CFRP-forsterkning. Testen er i første omgang en sammenligning mellom beregninger i ConLam og håndberegninger i Mathcad basert på teori fra Sørensen (2010, 52-53). Videre er ConLams resultater sammenlignet med resultater fra beregningsprogrammet til Bakkebø og Larssen (2015). Resultater og sammenligning er presentert i Tabell 27 og Tabell 28. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet ULS uforsterket [kNm]	507,1	532,0 (Uten fastning: 519,4)	+24,9 (+12,3)	+4,9 (+2,4)
Tøyning i CFRP [%]	5,0	5,0	0,0	0,0
Momentkapasitet ULS forsterket [kNm]	608,5	612,6 (Uten fastning: 609,7)	+4,1 (+1,2)	+0,7 (+0,2)
Økning av momentkapasitet ULS med CFRP [kNm]	101,4	80,6 (Uten fastning: 90,3)	-20,8 (-11,1)	-20,5 (-10,9)

Tabell 27: Test 8 – Resultat, sammenligning med beregningseksempel i Sørensen (2010).

	Beregningsprogram Bakkebø og Larssen	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet ULS uforsterket [kNm]	519,4	532,0 (Uten fastning: 519,4)	+12,6 (0,0)	+2,4 (0,0)
Tøyning i CFRP [%]	5,0	5,0	0,0	0,0
Momentkapasitet ULS forsterket [kNm]	609,7	612,6 (Uten fastning: 609,7)	+2,9 (0,0)	+0,5 (0,0)
Økning av momentkapasitet ULS med CFRP [kNm]	90,3	80,6 (Uten fastning: 90,3)	-9,7 (0,0)	-10,7 (0,0)

Tabell 28: Test 8 – Resultat, sammenligning med beregningsprogram, Bakkebø og Larssen.

#### 4 Testing og diskusjon

Teorien som er benyttet fra Sørensen (2010) er den samme som er benyttet i test 3, og er en forenklet metode for å beregne momentkapasitet for T-tverrsnitt. Som nevnt tidligere legger man her til grunn en antagelse om konstant betongtrykkspenning i hele flensen (og kun flensen), slik at trykkresultanten virker midt i flensen. Det er av denne grunn forsøkt å konstruere et eksempel i ConLam som gir trykkzone i tilnærmet hele flensen, for bedre å kunne sammenligne verdier med håndberegninger. I tilfeller hvor trykksonen blir veldig liten, noe som er vanlig for store flenstverrsnitt, eller hvor trykksonen forflytter seg ned i steget, vil avvikene bli større enn denne testen viser. Håndberegninger inkluderer ikke fastning i materialmodellen for armeringsstål. Det er forsøkt å endre materialmodell for stålet i ConLam ved å fjerne fastningen, noe som ga mindre avvik enn ved beregning med fastning.

Beregningsprogrammet til Bakkebø og Larssen benytter trykkspenningsblokk ved beregning av betongbidraget, samt ingen fastning i slakkarmeringen. Ved forsøk på å fjerne fastningen i armeringsstålet i ConLam ga resultatene ingen avvik sammenlignet med Bakkebø og Larssen. For dette tilfelle ser det altså ut som materialmodellen til betongen ikke har noen betydning for kapasiteten til tverrsnittet. Det understrekes at dette er tilfeldig, og vil ikke gjelde for alle typer tverrsnitt og materialvalg.

Disse resultatene er med på å verifisere ConLams pålitelighet ved beregning av T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og utenpåliggende CFRP-forsterkning. For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 8 i vedlegg C.



#### 4.10 Test 9: T-tverrsnitt – slakkarmering i strekk og CFRP-forsterkning, spenningsbegrensning i bruksgrensetilstand

Denne testen er konstruert med den hensikt å verifisere ConLams reliabilitet ved beregning av momentkapasitet i bruksgrensetilstand for T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og utenpåliggende CFRP-forsterkning. For å oppnå dette er det gjennomført en sammenligning mellom et håndberegningseksempel basert på teori fra Sørensen (2010, 52-53) og beregninger i ConLam. I denne testen er det bevisst konstruert en sammensetning av geometri og materialegenskaper som gjør at spenningsbegrensningen i slakkarmering blir utslagsgivende, og her er kravet for karakteristisk- og tilnærmet permanent lastkombinasjon likt;  $0,8 \cdot f_{yk}$ . Grunnen til at betongspenningene ikke sammenlignes er at de ikke er sammenlignbare, dette fordi eksempelet baserer seg på konstant betongtrykkspenning over hele flensen. ConLam kontrollerer spenningen i ytterste lamell, og gir av den grunn betydelig høyere spenning og dertil lavere kapasitet. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	Eksempel	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet SLS forsterket [kNm]	200,3	211,3	+11,0	+5,5

Tabell 29: Test 9 – Resultat

Resultat i Tabell 29 viser et lite avvik. Det kommer av at bakgrunnsteori for håndberegning benytter en betydelig forenklet metode, som beskrevet i test 3 og 8, samt ingen fastning i slakkarmeringen. For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 9 i vedlegg C.

## 4 Testing og diskusjon

### 4.11 Test 10: Bøyestivhet for CFRP-forsterket tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk

Test 10 søker å kontrollere beregninger av bøyestivhet i ConLam. Testen er delt i to, slik at den dekker både rektangulært- og T-tverrsnitt. Begge tverrsnittene har slakkarmering i strekk og trykk, samt utenpåliggende CFRP-forsterkning. For å sammenligne resultater er det utført håndberegningseksempel i Mathcad basert på teori hentet fra Sørensen (2010, 137-140). Resultat fra begge testene er presentert i Tabell 30. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Bøyestivhet for rektangulært tverrsnitt [Nmm <sup>2</sup> ]	$3,625 \cdot 10^{13}$	$3,639 \cdot 10^{13}$	$+0,014 \cdot 10^{13}$	+0,4
Bøyestivhet for T-tverrsnitt [Nmm <sup>2</sup> ]	$6,991 \cdot 10^{13}$	$7,008 \cdot 10^{13}$	$+0,017 \cdot 10^{13}$	+0,2

Tabell 30: Test 10-1 og 10-2 – Resultat

Håndberegningen baserer seg på trykkspenningsblokk i betongbidraget, samt at arealet til betongtrykksonen blir redusert med tverrsnittsarealet til trykkarmeringen. Dette er ikke tilfelle i ConLam, og er derfor med på å skape det lille avviket i resultatene. I ConLam benyttes en bi-lineær spenning-tøyningssammenheng for betong i beregninger av bøyestivhet, denne er beskrevet i kapittel 2.2.2. Prosentvis er avviket omtrent 0,4 % for rektangulært tverrsnitt, og 0,2 % for T-tverrsnitt. For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 10 i vedlegg C.

#### 4.12 Test 11: Sika Carbodur beregningsprogram versus ConLam

Test 11 er en kontroll opp mot beregninger utført med Sika Carbodur beregningsprogram (2014). Sikas program, og ulikheter sammenlignet med ConLam, er kort beskrevet i kapittel 2.4. For å kontrollere forskjellige tilfeller i ConLam opp mot beregninger i dette programmet er det valgt å utføre 6 ulike deltester med forsterkning:

Test 11-1: Kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk.

Test 11-2: Kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.

Test 11-3: Kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk.

Test 11-4: Kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.

Test 11-5: Kapasitetsberegning i SLS (T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk).

Test 11-6: Kapasitetsberegning i ULS, dekkestripe med slakkarmering i strekk og trykk.

Resultatene fra de ulike beregningene og tilhørende avvik er presentert i Tabell 31, Tabell 32, Tabell 33, Tabell 34, Tabell 35 og Tabell 36. Det er kun momentkapasitet som gjelder for uforsterket tverrsnitt, de øvrige resultatene gjelder for forsterket tverrsnitt. Utfyllende beskrivelse av testen finnes i vedlegg C.

	Sika	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	465,14	467,42	+2,28	+0,5
Momentkapasitet forsterket [kNm]	610,65	609,85	-0,80	-0,1
Tøyning i betong [%]	3,50	3,50	0,00	0,0
Tøyning i strekkarmering lag 1 [%]	2,81	2,80	-0,01	-0,4
Tøyning i strekkarmering lag 2 [%]	2,12	2,12	0,00	0,0
Tøyning i CFRP-forsterkning [%]	3,12	3,11	-0,01	-0,3

Tabell 31: Test 11-1 – Resultat, kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk.

#### 4 Testing og diskusjon

	<b>Sika</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	495,57	500,93	+5,36	+1,1
Momentkapasitet forsterket [kNm]	602,59	603,60	+1,01	+0,2
Tøyning i betong [‰]	3,50	3,50	0,00	0,0
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	5,16	5,09	-0,07	-1,4
Tøyning i strekkarmering lag 2 [‰]	4,21	4,15	-0,06	-1,4
Tøyning i trykkarmering lag 1 [‰]	2,73	2,72	-0,01	-0,4
Tøyning i CFRP-forsterkning [‰]	5,69	5,61	-0,08	-1,4

Tabell 32: Test 11-2 – Resultat, kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.

	<b>Sika</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	1068,48	1110,61	+42,13	+3,9
Momentkapasitet forsterket [kNm]	1453,00	1466,58	+13,58	+0,9
Tøyning i betong [‰]	2,35	2,39	+0,04	+1,7
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	7,75	7,75	0,00	0,0
Tøyning i strekkarmering lag 2 [‰]	6,88	6,88	0,00	0,0
Tøyning i CFRP-forsterkning [‰]	8,00	8,00	0,00	0,0

Tabell 33: Test 11-3 – Resultat, kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk.

	Sika	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	502,12	521,12	+19,00	+3,8
Momentkapasitet forsterket [kNm]	762,81	768,88	+6,07	+0,8
Tøyning i betong [‰]	2,83	2,88	+0,05	+1,8
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	7,40	7,39	-0,01	-0,1
Tøyning i strekkarmering lag 2 [‰]	5,80	5,80	0,00	0,0
Tøyning i trykkarmering lag 1 [‰]	1,87	1,89	+0,02	+1,1
Tøyning i CFRP-forsterkning [‰]	8,00	8,00	0,00	0,0

Tabell 34: Test 11-4 – Resultat, kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.

	Sika	ConLam	Avvik	Avvik i %
<b>SLS, karakteristisk</b>				
Momentkapasitet forsterket [kNm]	455,55	453,88	-1,67	-0,4
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	1,88	1,87	-0,01	-0,5
Spenning i strekkarmering lag 1 [MPa]	375,42	374,13	-1,29	-0,3
Betongspenning [MPa]	15,00	15,00	0,00	0,0
<b>SLS, tilnærmet permanent</b>				
Momentkapasitet, forsterket [kNm]	474,91	325,56	-149,35	-31,4
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	2,00	1,36	-0,64	-32,0
Spenning i strekkarmering lag 1 [MPa]	399,98	271,87	-128,11	-32,0
Betongspenning [MPa]	10,55	11,25	+0,70	+6,6

Tabell 35: Test 11-5 – Resultat, kapasitetsberegning i SLS (T-tverrsnitt, slakkarmering i strekk og trykk).

#### 4 Testing og diskusjon

	Sika	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	100,38	103,27	+2,89	+2,9
Momentkapasitet forsterket [kNm]	150,19	151,24	+1,05	+0,7
Tøyning i betong [‰]	2,27	2,30	+0,03	+1,3
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	6,61	6,61	0,00	0,0
Tøyning i trykkarmering lag 1 [‰]	0,26	0,27	+0,01	+3,8
Tøyning i CFRP-forsterkning [‰]	8,00	8,00	0,00	0,0

Tabell 36: Test 11-6 – Resultat, kapasitetsberegning i ULS, dekkstripe med slakkarmering i strekk og trykk.

Som beskrevet i kapittel 2.4 benytter Sika samme materialmodell for betongbidraget som ConLam, parabel-rektangulær spenning-tøyningssammenheng, men de inkluderer ikke fastning i materialmodell for armeringen.

Test 11-1 viser små avvik mellom programmene. Kapasitet i uforsterket tverrsnitt er noe høyere i ConLam, mens den er litt lavere i forsterket tverrsnitt sammenlignet med Sika. Begge disse avvikene tilskrives fastningen i armeringsstålet. Ved betongbrudd i uforsterket tverrsnitt er tøyningene i armeringen større enn ved betongbrudd i forsterket tverrsnitt. Differansen i armeringsbidraget til momentkapasiteten i ConLam og Sika vil da bli større i uforsterket tilstand. Grunnen til at kapasiteten blir litt mindre i forsterket tilstand i ConLam, er at tverrsnittet i Sika får marginalt større krumning på grunn av fravær av fastning i stålet. Den økte krumningen medfører en økt tøyning i forsterkningsmaterialet som gir et større bidrag til kapasiteten sammenlignet med bidraget fra fastning i armeringen i ConLam. Forsterkningen har lengre arm til arealsenteret enn slakkarmeringen, derfor gir en marginalt større tøyning i forsterkningsmaterialet større momentkapasitet.

Resultatet med større differanse i kapasitet i uforsterket tverrsnitt sammenlignet med forsterket går igjen i alle testene. Grunnen til dette er altså at armeringsstålet får noe mindre tøyninger i forsterket tilstand, og fastningen i ConLam gjør seg da mindre gjeldende. Man ser av resultatene at materialtøyningene ikke avviker mye i de to programmene.

I test 11-5 er det store forskjeller i resultatene for tilnærmet permanent lasttilstand. Det benyttes samme grenseverdier for betong, armering og forsterkning i de to programmene, på henholdsvis  $0,45 \cdot f_{ck}$ ,  $0,8 \cdot f_{yk}$  og 8 ‰ tøyning i CFRP-forsterkningen ( $\epsilon_f$ ). Spenningsbegrensingene for betong og armering er, som beskrevet i kapittel 2.2.6, i henhold til EC2 7.2. Tøyningsgrensen til CFRP-forsterkningen er satt med bakgrunn i Sikas standardverdi i deres beregningsprogram. Forskjellen i programmene ligger i at Sika inkluderer kryp ved bruk av en

forenklet krypmodell for den tilnærmet permanente lastkombinasjonen. Dette fører til større tøyninger i tverrsnittet i Sikas beregninger, som videre fører til at spenningene i armeringen blir begrensende for kapasiteten. I ConLam er det betongspenningene som blir begrensende. Dette gir da mye større kapasitet i Sikas beregningsprogram, sammenlignet med ConLam. Uten å ta hensyn til kryp vil alltid tilnærmet permanent kapasitet bli lik eller mindre enn karakteristisk kapasitet, da grensen til betongspenningen er strengere i tilnærmet permanent ( $0,45 \cdot f_{ck}$ ) sammenlignet med karakteristisk ( $0,6 \cdot f_{ck}$ ). På bakgrunn av dette stiller forfatterne av denne rapporten seg noe undrende til resultatene fra Sikas program når det gjelder kapasitetsberegning av tilnærmet permanent lastkombinasjon.

Når det gjelder avvikene i kapasiteten for karakteristisk lasttilstand tilskrives disse forskjellen i bruk av fastning/ikke fastning i armeringsstålet. Her er det små tøyninger i armeringen, noe som gir større kapasitet i Sika, som beskrevet over.

For mer detaljert presentasjon av beregninger og resultater, se test 11 i vedlegg C.

## 4 Testing og diskusjon

### 4.13 Oppsummering

Testene viser i all hovedsak at resultatene fra ConLam ligger nært opp mot eksemplene de er testet mot, og er i så måte med på å verifisere programmets virkemåte. Prosentvis avvik fra alle testverdiene, inkludert de verdiene som står i parentes, presenteres i Tabell 37. Tallet angir antall testverdier som ligger innenfor det aktuelle prosentvise området.

0-1 [%]	1-2 [%]	2-5 [%]	5-10 [%]	> 10 [%]
70	15	16	8	12

Tabell 37: Oppsummering testavvik.

Verdiene som avviker med mer enn 10 % kommer fra test 3, 4-1 og 4-2, 8 og 11-5. I test 3 og 8 er avviket et resultat av at testeksemplene er forenklete og dermed unøyaktige. I test 4-1 og 4-2 benyttes først forskjellige grensetøyninger i ConLam og testeksempelet, noe som går utover gyldigheten til testen. Testene er deretter gjentatt i Tabell 19 og Tabell 20 med sammenlignbare grensetøyninger, noe som gir betydelig mindre avvik. Avvikene som fremkommer i test 11-5 kommer av at Sika Carbodur beregningsprogram inkluderer kryp i beregningene, noe ConLam ikke gjør for dette tilfellet.

Verdiene som avviker i området 5-10 % kommer fra test 3,5,9 og 11-5. I test 3 er fire av avvikene et resultat av at programmet til Bakkebø og Larssen (2015) kun kan benytte en tøyningsgrense på 28 ‰ for slakkarmeringen (se kapittel 4.4), til forskjell fra ConLam som bruker 30 ‰. I tillegg er det et avvik som kommer av at testeksempelet benytter en forenklet og unøyaktig metode. Dette går utover gyldigheten til testen, derfor er testen gjentatt med 28 ‰ tøyningsgrense i ConLam. Avviket i test 5 er et lite tøyningsavvik på 0,03 ‰, men på grunn av at verdiene er små i utgangspunktet (0,35 ‰ og 0,32 ‰) blir det prosentvis høyt. Test 9 er basert på samme forenklete eksempel som test 3 og 8, og får grunnet dette et noe høyt avvik. Avviket i test 11-5, som ligger i området 5-10 %, har samme årsak som avvikene høyere enn 10 % i samme test.

Generelt er det flere årsaker til at avvik forekommer. I flertallet av testeksemplene nyttes en forskjellig materialmodell for betong sammenlignet med ConLam. Videre benytter ConLam en materialmodell for armering og spennarmering som inkluderer fastning i stålet, noe som gir en høyere kapasitet sammenlignet med de fleste testeksemplene. Dette gir dog en noe uventet effekt; kapasitetsøkningen ved forsterkning er generelt mindre ved beregning i ConLam sammenlignet med Sika Carbodur beregningsprogram eller håndberegning med spenningsblokk. Dette vises i test 8 og 11, der uforsterket momentkapasitet beregnet i ConLam generelt er noe høyere enn de sammenlignede verdiene. Dette er forklart på side 104 i kapittel 4.12.

Unøyaktighet grunnet deklarerer kan ikke utelukkes. Alle testene er utført med en inndeling av tverrsnittet i 500 lameller. Det antas at denne inndelingen er så fin at unøyaktighet grunnet antall lameller blir utelukket. Denne antagelsen er gjort på grunnlag av observasjoner gjort under utviklingen av programmet, der unøyaktighet grunnet lamellinndeling forekom ved inndeling av tverrsnitt i færre enn 10 lameller.



## 5 Konklusjon

I denne oppgaven er det utviklet et beregningsprogram for karbonfiberforsterkning av betongbjelker som baserer seg på en beregningsmetode kalt lamellmetoden. Derav oppstod programmets navn; ConLam. Det er et tverrsnittsprogram som kan utføre kapasitetsberegninger på betongbjelker med slakkarmering i strekk og trykk, spennarmering, samt karbonfiberforsterkning. ConLam kan beregne momentkapasitet for uforsterket- og forsterket tverrsnitt i bruddgrensetilstand, samt bøyestivhet og momentkapasitet for karakteristisk- og tilnærmet permanent lastkombinasjon i bruksgrensetilstand.

Det er utført testing av de nevnte kapasitetene programmet kan beregne, opp mot relevante eksempler og teori i faglitteratur, samt Sika Carbodur beregningsprogram. Testene viste lite avvik, noe som verifiserer ConLams reliabilitet. I tillegg fremkommer det av testene at programmet i mange tilfeller beregner mindre konservativt og dermed gir bedre kapasitet, særlig for uforsterket tverrsnitt. ConLam baserer seg på lamellmetoden som er mer nøyaktig, og benytter materialmodeller som ligger nærmere virkeligheten, sammenlignet med testeksemplene. Bedre kapasitetsutnyttelse betyr besparelser ved montering i form av kostnad, tid og miljø.

Da bruken av karbonfiberforsterkning på betongkonstruksjoner forventes å øke i Norge, er dette et relevant tema innenfor konstruksjonsteknikk. Dette fører også til at et beregningsprogram til dimensjonering av denne typen konstruksjoner er aktuelt innenfor fagområdet. Til forskjell fra Sika sitt beregningsprogram for karbonfiberforsterkning, kan ConLam utføre beregninger av karbonfiberforsterkning av spennarmerte, samt trykkpåkjennte tverrsnitt. I tillegg er ConLam mer fleksibelt i bruk med hensyn på materialvalg, samtidig som brukervennligheten er bevart. Sikas beregningsprogram omhandler dog flere aspekter ved CFRP-forsterkning av betongkonstruksjoner enn ConLam. Det anbefales at ConLam videreutvikles i tråd med de nevnte aspektene i kapittel 3.4, enten ved NTNU, eller av forfatterne selv.

## 6 Referanser

- ACI, American Concrete Institute. 2008. *440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Vol. 1. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- Adhikary, Bimal Babu, og Hiroshi Mutsuyoshi. 2006. "Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques." *Construction and Building Materials* 20 (6):366-373. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.024>.
- Bakis, C., L. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. Davalos, J. Lesko, A. Machida, S. Rizkalla, og T. Triantafillou. 2002. "Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review." *Journal of Composites for Construction* 6 (2):73-87. doi: [doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73)).
- Bakkebø, Nicolas, og Sondre Larssen. 2015. *Betongkonstruksjoner med med pålimt karbonfiberforsterkning*, Master Thesis at Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.
- Busel, John P. 2012. "American Composites Manufacturers Association - Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites Rebar." Hentet 15.02.2015. [http://www.dot.state.fl.us/statematerialsoffice/structural/meetings/crrb/4\\_frprepar.pdf](http://www.dot.state.fl.us/statematerialsoffice/structural/meetings/crrb/4_frprepar.pdf).
- FIB, Fédération Internationale Du Béton. 2001. "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures." *Bulletin* 14:138.
- Ghobarah, A., M. Ghorbel, og S. Chidiac. 2002. "Upgrading Torsional Resistance of Reinforced Concrete Beams Using Fiber-Reinforced Polymer." *Journal of Composites for Construction* 6 (4):257-263. doi: [doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:4\(257\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:4(257)).
- Ghobarah, Ahmed, og A. Said. 2002. "Shear strengthening of beam-column joints." *Engineering Structures* 24 (7):881-888. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00026-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00026-3).
- Karayannis, Chris G., og George M. Sirkelis. 2008. "Strengthening and rehabilitation of RC beam-column joints using carbon-FRP jacketing and epoxy resin injection." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 37 (5):769-790. doi: [10.1002/eqe.785](https://doi.org/10.1002/eqe.785).
- Larsen, Ronald W. 2009. *Engineering with Excel*. Upper Saddle River, N.J.: Pearson/Prentice Hall.
- Mohammad, Dr. Khalaf Ibrahim , og Dr. Bayar Jaafar Al-Sulayfani. 2013. "Torsional Strengthening of RC Beams with CFRP Wrap." *Tikrit Journal of Engineering Sciences* 20 (3):1-9.
- Mukherjee, Abhijit, og Mangesh Joshi. 2005. "FRPC reinforced concrete beam-column joints under cyclic excitation." *Composite Structures* 70 (2):185-199. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.08.022>.
- Nawy, Edward G. 2008. *Concrete construction engineering handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Newhook, John, og Dagmar Svecova. 2007. *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers [computer File]*: ISIS Canada.
- Nilimaa, Jonny 2015. *Concrete Bridges - Improved Load Capacity*, Doctoral Thesis at Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

- Nordhus, Ørjan Sundnes, Eivind Steinnes, og Thomas Simpson. 2011. "Fiberarmerte betongkonstruksjoner: Prøving av bjelker og plater av selvkomprimerende duktil fiberbetong." *Masteroppgave* NTNU.
- Pendhari, Sandeep S., Tarun Kant, og Yogesh M. Desai. 2008. "Application of polymer composites in civil construction: A general review." *Composite Structures* 84 (2):114-124. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.06.007>.
- S&P. 2014a. "Technical Data Sheet - S&P C-Sheet 240." Hentet 14.05.2015. [http://www.reinforcement.ch/fileadmin/redakteur/pdf-en/frp/tech\\_datasheets/TD\\_S\\_P\\_C-Sheet\\_240\\_e.pdf](http://www.reinforcement.ch/fileadmin/redakteur/pdf-en/frp/tech_datasheets/TD_S_P_C-Sheet_240_e.pdf).
- S&P. 2014b. "Technical Data Sheet - S&P C-Sheet 640." Hentet 13.05.2015. [http://www.reinforcement.ch/fileadmin/redakteur/pdf-en/frp/tech\\_datasheets/TD\\_S\\_P\\_C-Sheet\\_640\\_e.pdf](http://www.reinforcement.ch/fileadmin/redakteur/pdf-en/frp/tech_datasheets/TD_S_P_C-Sheet_640_e.pdf).
- S&P. 2014c. "Technical Data Sheet - S&P Laminates CFK." Hentet 13.05.2015. [http://www.reinforcement.ch/fileadmin/redakteur/pdf/frp/tech\\_datenblaetter/TDS\\_CFK\\_Laminates\\_VER11-14.pdf](http://www.reinforcement.ch/fileadmin/redakteur/pdf/frp/tech_datenblaetter/TDS_CFK_Laminates_VER11-14.pdf).
- Salom, P., J. Gergely, og D. Young. 2004. "Torsional Strengthening of Spandrel Beams with Fiber-Reinforced Polymer Laminates." *Journal of Composites for Construction* 8 (2):157-162. doi: [doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:2\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:2(157)).
- Sika. 2014a. "Structural Strengthening with Sika Systems for Contractors." Hentet 15.02.2015. [http://www.sika.com/dms/getdocument.get/2db286c5-5b82-3964-a4a9-7e2c333ec0b1/Structural%20Strenghtening\\_Contractors.pdf](http://www.sika.com/dms/getdocument.get/2db286c5-5b82-3964-a4a9-7e2c333ec0b1/Structural%20Strenghtening_Contractors.pdf).
- Sika. 2014b. "Structural Strengthening with Sika Systems for Owners of Buildings and Civil Engineering Structures." Hentet. <http://www.sika.com/dms/getdocument.get/733b5768-9cd8-3336-97e9-dc62627335f4/Structural%20Strenghtening%20for%20Owners.pdf>.
- Sika Norge. 2006. "Produktdatablad - Sika Carbodur Bånd." Hentet 14.05.2015. [http://nor.sika.com/dms/getdocument.get/d5839437-a543-39cc-8dd9-93cd3d808eb3/PDB\\_Sika\\_CarboDur\\_Baand.pdf](http://nor.sika.com/dms/getdocument.get/d5839437-a543-39cc-8dd9-93cd3d808eb3/PDB_Sika_CarboDur_Baand.pdf).
- Sika Norge. 2014. "BRUKERVEILEDNING - Sika® Carbodur® beregningsprogram." Hentet 20.01.2015. <http://nor.sika.com/dms/getdocument.get/81414da8-9f3d-3cd7-bf36-fe1319ae7c06/User%20Guide%20Sika%20Carbodur.pdf>.
- Sika USA. 2011. "Product Data Sheet - SikaWrap Hex 230C." Hentet 14.05.2015. <http://usa.sika.com/dms/getdocument.get/dd54f7ca-a59a-3714-8b01-96bdc377fd41/pds-cpd-SikaWrapHex230C-us.pdf>.
- Sika USA. 2014. "Product Data Sheet - SikaWrap Hex 103C." Hentet 14.05.2015. <http://usa.sika.com/dms/getdocument.get/7d13f6ee-15cd-3e1e-be59-52d710acb33b/pds-cpd-SikaWrap103C-us.pdf>.
- Sto Norge. 2006. "Forsterkning av bærende konstruksjoner med StoFRP System." Hentet 2. februar 2015. [http://sto.no/media/documents/broschyre\\_no/kolfiberfoerstaerkning\\_3/Forsterkning\\_av\\_brende\\_konstruksjoner\\_-\\_NO.pdf](http://sto.no/media/documents/broschyre_no/kolfiberfoerstaerkning_3/Forsterkning_av_brende_konstruksjoner_-_NO.pdf).
- Sørensen, Svein I. 2010. *Betongkonstruksjoner: beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Trondheim: Tapir akademisk forl.
- Teng, J. G., J. F. Chen, S. T. Smith, og L. Lam. 2003. "Behaviour and strength of FRP-strengthened RC structures: a state-of-the-art review." *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings* 156: 51-62. Hentet. <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/stbu.2003.156.1.51>.

## 6 Referanser

- Thorenfeldt, Erik, Bjørn Täljsten, Jon Rødsætre, og Tor K. Sandaker. 2006. *Forsterkning av betongkonstruksjoner*. Vol. nr. 36. Oslo: Norsk Betongforening.
- Thorenfeldt, Erik, og Jan Arve Øverli. 2006. "Rapport nr. 13 - Forsterkning av betongsøyler med karbonfibervev " *Statens vegvesen, Vegdirektoratet* 82-91228-18-3.
- Täljsten, Bjørn. 2003. *FRP Strengthening of existing concrete structures: design guidelines*. Luleå: Luleå University of Technology.
- Täljsten, Bjørn, Thomas Blanksvärd, og Gabriel Sas. 2011. *Handbok för dimensionering och utförande i samband med förstärkning av betongkonstruksjoner med pålimmade fiberkompositer*: Luleå Tekniska Universitet.
- Vetlesen, Jon. 2009. "Karbonfiberforsterkning av betongkonstruksjoner." *Masteroppgave* NTNU.
- Zilch, Konrad, Roland Niedermeier, og Wolfgang Finckh. 2014. *Strengthening of Concrete Structures with Adhesively Bonded Reinforcement, BetonKalender*. Berlin, Germany: Ernst & Sohn.

### Standarder

- NS-EN 1990:2002+NA:2008. Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner.
- NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008. Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner. Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger.

## 7 Vedlegg

- A. E-post
- B. Sub-prosedyre for forsterket tverrsnitt
- C. Testresultat



# Vedlegg A

E-post







tir 17.02.2015 13:20

Blanksvärd, Thomas <thomas.blanksvard@skanska.se>

**SV: SV: Håndbok FRP**

Til espenran

Hej

Det kommer en uppdatering av Eurocode 2, där vi håller på att jobba fram dimensioneringsföreskrifter, denna kommer till stora delar byggas på tyskarnas sätt att dimensionera (eftersom att detta var en DIN standard redan). Jag skulle nog rekommendera att du bygger ditt program på vår bok (det bästa hade varit att bygga på den kommande revideringen av Eurokod 2 men denna är inte publicerad ännu. Att bygga den på ACI hade också varit en klok idé. Fib 14 ska du inte använda, den är för gammal.

Väl mött // Thomas

1



# Vedlegg B

Sub-prosedyre for forsterket tverrsnitt



```
Sub Iterasjon_forsterket_rektangel()
```

```
ThisWorkbook.Activate
```

```
'Deklarering
```

```
Dim d1 As Double
```

```
Dim d2 As Double
```

```
Dim d3 As Double
```

```
Dim d4 As Double
```

```
Dim dt1 As Double
```

```
Dim dt2 As Double
```

```
Dim dt3 As Double
```

```
Dim dt4 As Double
```

```
Dim dp1 As Double
```

```
Dim dp2 As Double
```

```
Dim tpb As Double
```

```
Dim ys1 As Double
```

```
Dim ys2 As Double
```

```
Dim ys3 As Double
```

```
Dim ys4 As Double
```

```
Dim yt1 As Double
```

```
Dim yt2 As Double
```

```
Dim yt3 As Double
```

```
Dim yt4 As Double
```

```
Dim yp1 As Double
```

```
Dim yp2 As Double
```

```
Dim yf As Double
```

```
Dim As1 As Double
```

```
Dim As2 As Double
```

```
Dim As3 As Double
```

```
Dim As4 As Double
```

```
Dim Ast1 As Double
```

```
Dim Ast2 As Double
```

```
Dim Ast3 As Double
```

```
Dim Ast4 As Double
```

```
Dim Ap1 As Double
```

```
Dim Ap2 As Double
```

```
Dim Af As Double
```

## Vedlegg B

Dim tv\_h As Double

Dim tv\_b As Double

Dim trykksonehøyde As Double

Dim lamellhøyde As Double

Dim y As Double

Dim n As Double

Dim ec2 As Double

Dim ecu2 As Double

Dim ep0 As Double

Dim eud As Double

Dim epud As Double

Dim e\_f As Double

Dim ok\_initialtøyning As Double

Dim uk\_initialtøyning As Double

Dim uk\_tøyning As Double

Dim ok\_tøyning As Double

Dim lamelltøyning As Double

Dim ok\_tøynings\_diff As Double

Dim uk\_tøynings\_diff As Double

Dim uk\_tøyningsdiff As Double

Dim ok\_tøyningsdiff As Double

Dim as1\_tøyning As Double

Dim as2\_tøyning As Double

Dim as3\_tøyning As Double

Dim as4\_tøyning As Double

Dim at1\_tøyning As Double

Dim at2\_tøyning As Double

Dim at3\_tøyning As Double

Dim at4\_tøyning As Double

Dim ap1\_tøyning As Double

Dim ap2\_tøyning As Double

Dim f\_tøyning As Double

```
Dim fcd As Double
Dim fyd As Double
Dim fpd As Double
Dim lamellspenning As Double
```

```
Dim Es1 As Double
Dim Es2 As Double
Dim Ep1 As Double
Dim Ep2 As Double
Dim Ef As Double
```

```
Dim n_lam As Integer
```

```
Dim p As Double
Dim T As Double
Dim T_i As Double
Dim S1 As Double
Dim S2 As Double
Dim S3 As Double
Dim S4 As Double
Dim St1 As Double
Dim St2 As Double
Dim St3 As Double
Dim St4 As Double
Dim Sp1 As Double
Dim Sp2 As Double
Dim S As Double
Dim St As Double
Dim Sp As Double
Dim F As Double
Dim sum As Double
```

```
Dim M_b As Double
Dim M_i As Double
Dim moment As Double
Dim krumning As Double
```

```
Dim i As Integer
Dim x As Long
Dim m As Long
Dim u As Long
Dim j As Long
```

## Vedlegg B

'Strekkarmeringsarm 1

d1 = Sheets("Input og resultater").Range("Strekkarm1")

'Strekkarmeringsarm 2

d2 = Sheets("Input og resultater").Range("Strekkarm2")

'Strekkarmeringsarm 3

d3 = Sheets("Input og resultater").Range("Strekkarm3")

'Strekkarmeringsarm 4

d4 = Sheets("Input og resultater").Range("Strekkarm4")

'Strekkarmeringsareal 1

As1 = Sheets("Input og resultater").Range("Strekkarmeringsareal1")

'Strekkarmeringsareal 2

As2 = Sheets("Input og resultater").Range("Strekkarmeringsareal2")

'Strekkarmeringsareal 3

As3 = Sheets("Input og resultater").Range("Strekkarmeringsareal3")

'Strekkarmeringsareal 4

As4 = Sheets("Input og resultater").Range("Strekkarmeringsareal4")

'Trykkarmeringsarm 1

dt1 = Sheets("Input og resultater").Range("Trykkarm1")

'Trykkarmeringsarm 2

dt2 = Sheets("Input og resultater").Range("Trykkarm2")

'Trykkarmeringsarm 3

dt3 = Sheets("Input og resultater").Range("Trykkarm3")

'Trykkarmeringsarm 4

dt4 = Sheets("Input og resultater").Range("Trykkarm4")

'Trykkarmeringsareal 1

Ast1 = Sheets("Input og resultater").Range("Trykkarmeringsareal1")

'Trykkarmeringsareal 2

Ast2 = Sheets("Input og resultater").Range("Trykkarmeringsareal2")

'Trykkarmeringsareal 3

Ast3 = Sheets("Input og resultater").Range("Trykkarmeringsareal3")

'Trykkarmeringsareal 4

Ast4 = Sheets("Input og resultater").Range("Trykkarmeringsareal4")

'Spennarmeringsarm 1

dp1 = Sheets("Input og resultater").Range("Spennarm1")

'Spennarmeringsarm 2

dp2 = Sheets("Input og resultater").Range("Spennarm2")



```
'Spennarmeringsareal 1
Ap1 = Sheets("Input og resultater").Range("Spennarmeringsareal1")
'Spennarmeringsareal 2
Ap2 = Sheets("Input og resultater").Range("Spennarmeringsareal2")

'Forsterkningsareal
Af = Sheets("Input og resultater").Range("Karbonareal")

'Tverrsnittshøyde
tv_h = Sheets("Input og resultater").Range("Tverrsnittshøyde")
'Tverrsnittsbredde
tv_b = Sheets("Input og resultater").Range("Tverrsnittsbredde")

'Eksponent gitt i tabell 3.1, NS-EN 1992-1-1
n = Sheets("Bakgrunnsberegninger").Range("n")
'Grensetøyning epsilon_c2
ec2 = -Sheets("Input og resultater").Range("Epsilon_c2") / 1000
'Bruddtøyning betong epsilon_cu2
ecu2 = -Sheets("Input og resultater").Range("Epsilon_cu2") / 1000
'Dimensjonerende bruddspenning
fcd = -Sheets("Input og resultater").Range("fcd")

'E-modul slakkarmering (før flytning)
Es1 = Sheets("Input og resultater").Range("Emodul_armering1")
'E-modul slakkarmering (etter flytning)
Es2 = Sheets("Input og resultater").Range("Emodul_armering2")
'Dimensjonerende flytespenning slakkarmering
fyd = Sheets("Input og resultater").Range("fyd")
'Bruddtøyning armeringsstål
eud = Sheets("Input og resultater").Range("Epsilon_ud") / 1000

'E-modul spennarmering (før flytning)
Ep1 = Sheets("Input og resultater").Range("Emodul_spennarmering1")
'E-modul spennarmering (etter flytning)
Ep2 = Sheets("Input og resultater").Range("Emodul_spennarmering2")
'Dimensjonerende flytespenning spennarmering
fpd = Sheets("Input og resultater").Range("fpd")
'Initialtøyning spennarmering
ep0 = Sheets("Input og resultater").Range
("Initialtøyning_spennarmering") / 1000
'Bruddtøyning spennstål
epud = Sheets("Input og resultater").Range("Epsilon_pud") / 1000
```

## Vedlegg B

```
'E-modul karbonforsterkning
Ef = Sheets("Input og resultater").Range("Emodul_f")
'Dimensjonerende tøyningsgrense karbon
e_f = Sheets("Input og resultater").Range("Epsilon_fd") / 1000

'Antall lameller
n_lam = Sheets("Input og resultater").Range("Antall_lameller")

'Aksialkraft
p = -Sheets("Input og resultater").Range("Aksialkraft") * 1000

'Initialtøyning o.k. betong
ok_initialtøyning = -0.00000001 'tilnærmet 0
'Utgangspunktet for tøyningdifferanse o.k. betong
ok_tøyning_diff = -0.0005
'Initialtøyning u.k. betong
uk_initialtøyning = (Sheets("Input og resultater").Range("Epsilon_uk_initial")) / 1000
'Tøyningdifferanse på stegene i u.k. betong
uk_tøyning_diff = 0.0001

'Tyngdepunkt betongtverrsnitt
tpb = tv_h / 2

'Lamellhøyde
lamellhøyde = tv_h / n_lam

x = 1

For j = 1 To 100000 'løkke som stoppes når nøyaktigheten i
bruddtøyning er +-0,00001

    'Tøyningdifferanse på stegene i u.k. betong
    uk_tøyning_diff = uk_tøyning_diff * ((1 / 2) ^ (j - 1)) 'Finere
    inndeling på stegene når j øker

For x = x To 100000 'løkke som stoppes når et av materialenes
grensetøyning overskrides
```

```

'Tøyning i underkant tverrsnitt
If j = 1 And x = 1 Then
    uk_tøyning = uk_initialtøyning
Else
    uk_tøyning = uk_tøyning + (uk_tøyningsdiff * ((-1) ^
    (j - 1)))
End If

u = 1 'denne må være definert for å nullstille u for hver x

For m = 1 To 100000 'løkke som stoppes når -0.1 < sum < 0.1

    For u = u To 100000 'løkke som stoppes når sum
        passerer grensen 0 (enten fra positiv eller negativ
        side)

            'Tøyningsdifferanse overkant tverrsnitt
            ok_tøyningsdiff = ok_tøynings_diff * ((1 / 5) ^
            (m - 1)) 'Finere inndeling på stegene når m øker

            'Betongtøyning i overkant tverrsnitt
            If u = 1 And m = 1 Then
                ok_tøyning = ok_initialtøyning
            Else
                ok_tøyning = ok_tøyning + (ok_tøyningsdiff *
                ((-1) ^ (m - 1)))
            End If

            'Trykksonehøyde
            trykksonehøyde = (tv_h / (Abs(ok_tøyning) +
            uk_tøyning)) * Abs(ok_tøyning)

            T = 0 'Nullstiller verdien fra sist loop
            M_b = 0 'Nullstiller verdien fra sist loop

            'Løkke for beregning av kraftbidrag til betong
            For i = 1 To n_lam

                'Kraftarm til hver lamell
                y = lamellhøyde * (i - 0.5)

```

## Vedlegg B

```
'Lamelltøyning
lamelltøyning = uk_tøyning + ((ok_tøyning -
uk_tøyning) / tv_h) * y

'Lamellspenning
If ec2 < lamelltøyning < 0 Then
    lamellspenning = fcd * (1 - (1 -
    (lamelltøyning / ec2)) ^ n)
    ElseIf lamelltøyning < ec2 Then
        lamellspenning = fcd
End If

'Kraftbidrag fra lamell nummer i
If lamelltøyning < 0 Then
    T_i = lamellspenning * tv_b *
    lamellhøyde
    ElseIf lamelltøyning > 0 Then
        T_i = 0
End If

'Akkumulert kraftbidrag fra betong
T = T_i + T

'Momentbidrag fra den enkelte lamell
M_i = (tpb - y) * T_i

'Akkumulert momentbidrag fra betong
M_b = M_i + M_b

Next i

'Tøyning strekkarmering 1
If As1 = 0 Then
    as1_tøyning = Empty
Else
    as1_tøyning = (((ok_tøyning - uk_tøyning) /
    tv_h) * (tv_h - d1)) + uk_tøyning
End If
```

```

'Tøyning strekkarmering 2
If As2 = 0 Then
  as2_tøyning = Empty
Else
  as2_tøyning = (((ok_tøyning - uk_tøyning) /
  tv_h) * (tv_h - d2)) + uk_tøyning
End If

'Tøyning strekkarmering 3
If As3 = 0 Then
  as3_tøyning = Empty
Else
  as3_tøyning = (((ok_tøyning - uk_tøyning) /
  tv_h) * (tv_h - d3)) + uk_tøyning
End If

'Tøyning strekkarmering 4
If As4 = 0 Then
  as4_tøyning = Empty
Else
  as4_tøyning = (((ok_tøyning - uk_tøyning) /
  tv_h) * (tv_h - d4)) + uk_tøyning
End If

'Kraft strekkarmering 1
If as1_tøyning < fyd / Es1 And as1_tøyning > -
fyd / Es1 Then
  S1 = as1_tøyning * Es1 * As1
ElseIf as1_tøyning > fyd / Es1 Then
  S1 = (fyd + ((as1_tøyning - (fyd / Es1)) *
  Es2)) * As1
ElseIf as1_tøyning < -fyd / Es1 Then
  S1 = -((fyd + ((Abs(as1_tøyning) - (fyd /
  Es1)) * Es2)) * As1)
End If

```

## Vedlegg B

```
'Kraft strekkarmering 2
If as2_tøyning < fyd / Es1 And as2_tøyning > -
fyd / Es1 Then
    S2 = as2_tøyning * Es1 * As2
    ElseIf as2_tøyning > fyd / Es1 Then
        S2 = (fyd + ((as2_tøyning - (fyd / Es1)) *
Es2)) * As2
    ElseIf as2_tøyning < -fyd / Es1 Then
        S2 = -((fyd + ((Abs(as2_tøyning) - (fyd /
Es1)) * Es2)) * As2)
End If

'Kraft strekkarmering 3
If as3_tøyning < fyd / Es1 And as3_tøyning > -
fyd / Es1 Then
    S3 = as3_tøyning * Es1 * As3
    ElseIf as3_tøyning > fyd / Es1 Then
        S3 = (fyd + ((as3_tøyning - (fyd / Es1)) *
Es2)) * As3
    ElseIf as3_tøyning < -fyd / Es1 Then
        S3 = -((fyd + ((Abs(as3_tøyning) - (fyd /
Es1)) * Es2)) * As3)
End If

'Kraft strekkarmering 4
If as4_tøyning < fyd / Es1 And as4_tøyning > -
fyd / Es1 Then
    S4 = as4_tøyning * Es1 * As4
    ElseIf as4_tøyning > fyd / Es1 Then
        S4 = (fyd + ((as4_tøyning - (fyd / Es1)) *
Es2)) * As4
    ElseIf as4_tøyning < -fyd / Es1 Then
        S4 = -((fyd + ((Abs(as4_tøyning) - (fyd /
Es1)) * Es2)) * As4)
End If
```

```

'Tøyning trykkarmering 1
If Ast1 = 0 Then
    at1_tøyning = Empty
Else
    at1_tøyning = (((ok_tøyning - uk_tøyning) /
    tv_h) * (tv_h - dt1)) + uk_tøyning
End If

'Tøyning trykkarmering 2
If Ast2 = 0 Then
    at2_tøyning = Empty
Else
    at2_tøyning = (((ok_tøyning - uk_tøyning) /
    tv_h) * (tv_h - dt2)) + uk_tøyning
End If

'Tøyning trykkarmering 3
If Ast3 = 0 Then
    at3_tøyning = Empty
Else
    at3_tøyning = (((ok_tøyning - uk_tøyning) /
    tv_h) * (tv_h - dt3)) + uk_tøyning
End If

'Tøyning trykkarmering 4
If Ast4 = 0 Then
    at4_tøyning = Empty
Else
    at4_tøyning = (((ok_tøyning - uk_tøyning) /
    tv_h) * (tv_h - dt4)) + uk_tøyning
End If

'Kraft trykkarmering 1
If at1_tøyning > -fyd / Es1 Then
    St1 = at1_tøyning * Es1 * Ast1
Else
    St1 = -(fyd + ((Abs(at1_tøyning) - (fyd /
    Es1)) * Es2)) * Ast1
End If

```

## Vedlegg B

```
'Kraft trykkarmering 2
If at2_tøyning > -fyd / Es1 Then
    St2 = at2_tøyning * Es1 * Ast2
Else
    St2 = -(fyd + ((Abs(at2_tøyning) - (fyd /
Es1)) * Es2)) * Ast2
End If

'Kraft trykkarmering 3
If at3_tøyning > -fyd / Es1 Then
    St3 = at3_tøyning * Es1 * Ast3
Else
    St3 = -(fyd + ((Abs(at3_tøyning) - (fyd /
Es1)) * Es2)) * Ast3
End If

'Kraft trykkarmering 4
If at4_tøyning > -fyd / Es1 Then
    St4 = at4_tøyning * Es1 * Ast4
Else
    St4 = -(fyd + ((Abs(at4_tøyning) - (fyd /
Es1)) * Es2)) * Ast4
End If

'Tøyning spennarmering 1
If Ap1 = 0 Then
    ap1_tøyning = Empty
Else
    ap1_tøyning = ep0 + (((ok_tøyning -
uk_tøyning) / tv_h) * (tv_h - dp1)) +
uk_tøyning)
End If

'Tøyning spennarmering 2
If Ap2 = 0 Then
    ap2_tøyning = Empty
Else
    ap2_tøyning = ep0 + (((ok_tøyning -
uk_tøyning) / tv_h) * (tv_h - dp2)) +
uk_tøyning)
End If
```



```

'Kraft spennarmering 1
If ap1_tøyning < fpd / Ep1 Then
    Sp1 = ap1_tøyning * Ep1 * Ap1
Else
    Sp1 = (fpd + ((ap1_tøyning - (fpd / Ep1)) *
    Ep2)) * Ap1
End If

'Kraft spennarmering 2
If ap2_tøyning < fpd / Ep1 Then
    Sp2 = ap2_tøyning * Ep1 * Ap2
Else
    Sp2 = (fpd + ((ap2_tøyning - (fpd / Ep1)) *
    Ep2)) * Ap2
End If

'Tøyning karbonfiberforsterkning
If Af = 0 Then
    f_tøyning = Empty
Else
    f_tøyning = uk_tøyning - uk_initialtøyning
End If

'Kraft karbonfiberforsterkning
F = f_tøyning * Ef * Af

S = S1 + S2 + S3 + S4
St = St1 + St2 + St3 + St4
Sp = Sp1 + Sp2

'Sum
sum = S + T + St + Sp + F - p

'u-løkken stoppes når kravet tilfredsstilles
If m Mod 2 <> 0 And sum < 0 Then 'm oddetall
    Exit For
ElseIf m Mod 2 = 0 And sum > 0 Then 'm partall
    Exit For
ElseIf 0.1 > sum And sum > -0.1 Then
    Exit For
End If

```

## Vedlegg B

```
Next u

If 0.1 > sum And sum > -0.1 Then
    Exit For
End If

u = u + 1

Next m

'Strekkarmeringens arm 1
ys1 = tpb - (tv_h - d1)
'Strekkarmeringens arm 2
ys2 = tpb - (tv_h - d2)
'Strekkarmeringens arm 3
ys3 = tpb - (tv_h - d3)
'Strekkarmeringens arm 4
ys4 = tpb - (tv_h - d4)
'Trykkarmeringens arm 1
yt1 = (tv_h - tpb) - dt1
'Trykkarmeringens arm 2
yt2 = (tv_h - tpb) - dt2
'Trykkarmeringens arm 3
yt3 = (tv_h - tpb) - dt3
'Trykkarmeringens arm 4
yt4 = (tv_h - tpb) - dt4
'Spennarmeringens arm 1
yp1 = tpb - (tv_h - dp1)
'Spennarmeringens arm 2
yp2 = tpb - (tv_h - dp2)
'Forsterkning arm
yf = tpb

'Moment
moment = ((S1 * ys1) + (S2 * ys2) + (S3 * ys3) + (S4 * ys4)
- (St1 * yt1) - (St2 * yt2) - (St3 * yt3) - (St4 * yt4) +
(Sp1 * yp1) + (Sp2 * yp2) + (F * yf) + M_b) * (1 / 1000000)

'Krumning
krumning = (uk_tøyning - ok_tøyning) / tv_h
```

'Output

```
If ok_tøyning > (ecu2 - 0.000001) And as1_tøyning < (eud +  
0.00001) And ap1_tøyning < (epud + 0.00001) And f_tøyning <  
(e_f + 0.000001) Then  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 1) = moment  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 2) =  
    krumning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 3) =  
    trykksonehøyde  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 4) =  
    uk_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 5) =  
    ok_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 6) =  
    as1_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 7) =  
    as2_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 8) =  
    as3_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 9) =  
    as4_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 10) =  
    at1_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 11) =  
    at2_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 12) =  
    at3_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 13) =  
    at4_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 14) =  
    ap1_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 15) =  
    ap2_tøyning  
    Sheets("Beregning forsterket").Cells(x + 1, 16) =  
    f_tøyning  
End If
```

## Vedlegg B

```
If j Mod 2 <> 0 And ok_tøyning < ecu2 Then 'j oddetall
  Exit For
  ElseIf j Mod 2 <> 0 And as1_tøyning > eud Then 'j
  oddetall
  Exit For
  ElseIf j Mod 2 <> 0 And ap1_tøyning > epud Then 'j
  oddetall
  Exit For
  ElseIf j Mod 2 <> 0 And f_tøyning > e_f Then 'j oddetall
  Exit For
  ElseIf j Mod 2 = 0 And ok_tøyning > ecu2 And as1_tøyning
  < eud And ap1_tøyning < epud And f_tøyning < e_f Then 'j
  partall
  Exit For
  ElseIf ok_tøyning > ecu2 And as1_tøyning < eud And
  ap1_tøyning < epud And (e_f + 0.000001) > f_tøyning And
  f_tøyning > (e_f - 0.000001) Then
  Exit For
End If

Next x

If (ecu2 - 0.000001) < ok_tøyning And ok_tøyning < (ecu2 + 0.000001)
And as1_tøyning < eud And ap1_tøyning < epud And f_tøyning < e_f
Then
  Exit For
  ElseIf (eud + 0.00001) > as1_tøyning And as1_tøyning > (eud -
  0.00001) And ok_tøyning > ecu2 And ap1_tøyning < epud And
  f_tøyning < e_f Then
  Exit For
  ElseIf (epud + 0.00001) > ap1_tøyning And ap1_tøyning > (epud -
  0.00001) And ok_tøyning > ecu2 And as1_tøyning < eud And
  f_tøyning < e_f Then
  Exit For
  ElseIf (e_f + 0.000001) > f_tøyning And f_tøyning > (e_f -
  0.000001) And ok_tøyning > ecu2 And as1_tøyning < eud And
  ap1_tøyning < epud Then
  Exit For
End If

x = x + 1
```

Next j

Call Maksmoment\_bøyestivhet

End Sub



# Vedlegg C

## Testresultat

<b>TEST 1: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK.....</b>	<b>1</b>
<b>TEST 2: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK .....</b>	<b>17</b>
<b>TEST 3: T-TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK .....</b>	<b>22</b>
<b>TEST 4: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SPENNARMERING, OG SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK .....</b>	<b>28</b>
<b>TEST 5: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK, MED NORMALKRAFT .....</b>	<b>37</b>
<b>TEST 6: REKTANGULÆRT TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG FRP-FORSTERKNING .....</b>	<b>55</b>
<b>TEST 7: T-TVERRSNITT – SPENNARMERING OG FRP-FORSTERKNING .....</b>	<b>62</b>
<b>TEST 8: T-TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG CFRP-FORSTERKNING.....</b>	<b>69</b>
<b>TEST 9: T-TVERRSNITT – SLAKKARMERING I STREKK OG CFRP-FORSTERKNING, SPENNINGSBEGRENSNING I BRUKSGRENSETILSTAND .....</b>	<b>78</b>
<b>TEST 10: BØYESTIVHET FOR CFRP-FORSTERKET TVERRSNITT MED SLAKKARMERING I STREKK OG TRYKK .....</b>	<b>86</b>
<b>TEST 11: SIKA CARBODUR BEREGNINGSPROGRAM VERSUS CONLAM .....</b>	<b>105</b>





## Test 1: Rektangulært tverrsnitt – slakkarmering i strekk

Kontroll er utført ved å sammenligne resultater fra ConLam med håndberegninger utført med trykkspenningsblokk. Håndberegningene er basert på teori og eksempler hentet fra Sørensen (2010), kapittel 4.2.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra ConLam i de påfølgende sidene.

### Test 1-1: Underarmert tverrsnitt

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i slakkarmering [‰]	11,62	11,42	-0,20	-1,7
Momentkapasitet [kNm]	85,0	86,6	+1,6	+1,9

### Test 1-2: Normalarmert tverrsnitt

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i slakkarmering [‰]	5,57	5,59	+0,02	+0,4
Momentkapasitet [kNm]	132,0	132,3	+0,3	+0,2

### Test 1-3: Overarmert tverrsnitt

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i slakkarmering [‰]	1,86	1,88	+0,02	+1,1
Momentkapasitet [kNm]	190,2	189,4	-0,8	-0,4

Sørensen, Svein I. 2010. *Betongkonstruksjoner: beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Trondheim: Tapir akademisk forl.

Vedlegg C

Test 1-1: Underarmert tverrsnitt



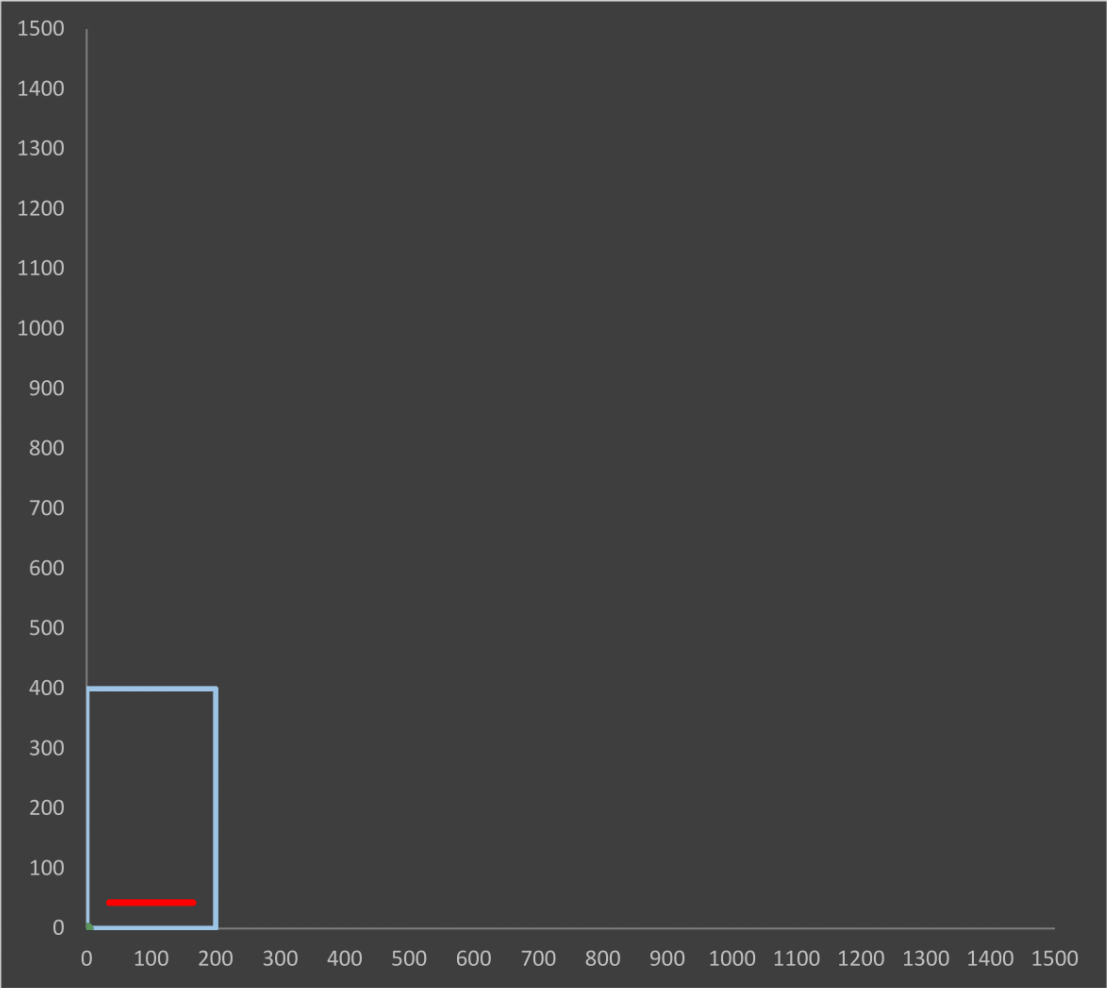
Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

**Rektangel**

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	200	mm
Høyde	400	mm

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 35$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} =$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

## Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	16	3	603,2	357
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

## Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

## Betong

Kvalitet **C35/45** $\gamma_c = 1,5$  $\alpha_{cc} = 0,85$  $f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup> $f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup> $f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup> $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰ $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰ $E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

## Armeringsstål

 $\gamma_s = 1,15$  $f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup> $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup> $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup> $E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup> $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup> $\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰ $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰ $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Vedlegg C

### Spennarmering

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{pk} = 1700 \text{ N/mm}^2$$
$$f_{p0,1k} = 1550 \text{ N/mm}^2$$
$$f_{pd} = 1347,8 \text{ N/mm}^2$$
$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = 1401,7 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = 195000 \text{ N/mm}^2$$
$$E_{p2} = 17458 \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning  
Dimensjonerende flytetøyning  
Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon_{pud} = 10,0 \%$$
$$\epsilon_{pd} = 6,91 \%$$
$$\epsilon'_{p0} = 6,30 \%$$

### Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = 500$  antall lameller

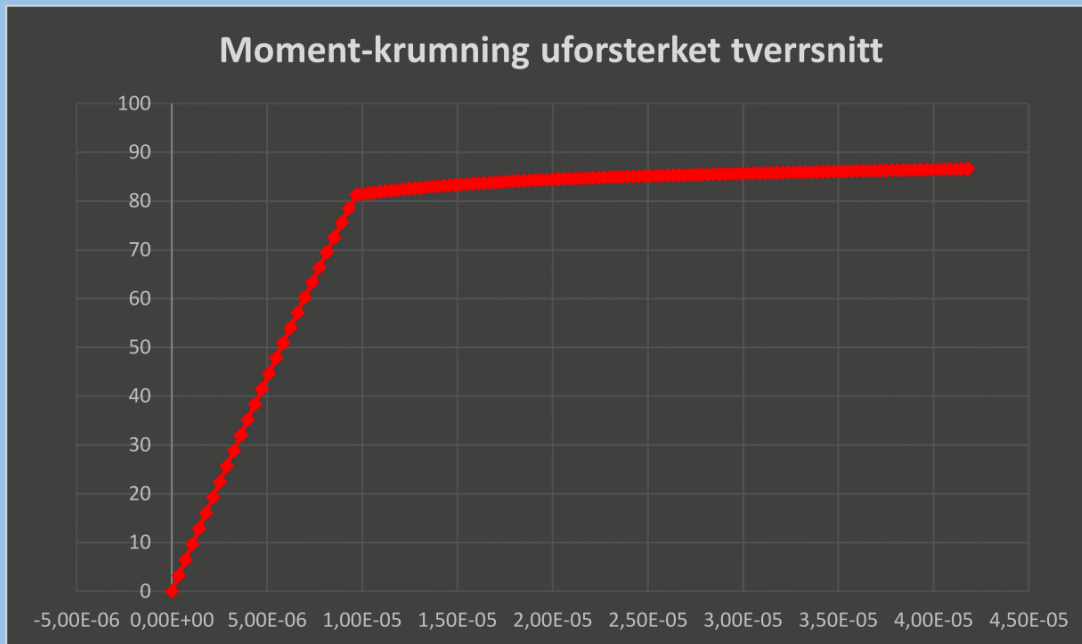
### Ytre aksialkraft

$$P = \text{ } \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

**Kapasitet ULS, uforsterket**

Moment	<b>86,6</b>	kNm
Krumning	4,180E-05	



**Tøyninger**

$\epsilon_{c,uk}$	13,22	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	11,42	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

# Kontroll av rektangulært, strekkarmert tverrsnitt

## Underarmert tverrsnitt

### Materialegenskaper

$$f_{ck} := 35\text{MPa} \quad \alpha_{cc} := 0.85 \quad \gamma_c := 1.5 \quad f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.83333\text{MPa}$$

$$f_{yk} := 500\text{MPa} \quad \gamma_s := 1.15 \quad f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.78261\text{MPa}$$

### Tverrsnittsgeometri

$$b := 200\text{mm} \quad h := 400\text{mm} \quad c_{nom} := 35\text{mm} \quad \emptyset := 16\text{mm} \quad n := 3$$

$$d := h - c_{nom} - \frac{\emptyset}{2} = 357\text{mm}$$

### 15 ‰ tøyning i armering ved trykkbrudd i betong

$$\epsilon_s := \frac{15}{1000} \quad \epsilon_c := \frac{3.5}{1000} \quad \alpha := \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_s} = 0.18919$$

$$A_{s,n\ddot{o}dvendig} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d \cdot \alpha}{f_{yd}} = 492.95589\text{mm}^2$$

$$A_{s,valgt} := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{\emptyset}{2}\right)^2 = 603.18579\text{mm}^2$$

$$\alpha_{valgt} := \frac{f_{yd} \cdot A_{s,valgt}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d} = 0.23149$$

$$\epsilon_{s,valgt} := \epsilon_c \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{valgt}} - 1\right) = 0.01162$$

$$M_{Rd} := 0.8 \cdot \alpha_{valgt} \cdot (1 - 0.4 \alpha_{valgt}) \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 = 85 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

Test 1-2: Normalarmert tverrsnitt

## ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	200	mm
Høyde	400	mm


## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{nom.strekk} = 35$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{nom.trykk} =$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{v.strekk} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{v.trykk} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\emptyset$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	16	5	1005,3	357
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\emptyset$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C35/45**

$\gamma_c = 1,5$

$\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰

$\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰



## Spennarmering

$$\gamma_s = 1,15$$

$f_{pk} =$	1700	N/mm <sup>2</sup>
$f_{p0,1k} =$	1550	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd} =$	1347,8	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s =$	1401,7	N/mm <sup>2</sup>

$E_{p1} =$	195000	N/mm <sup>2</sup>
$E_{p2} =$	17458	N/mm <sup>2</sup>

Dimensjonerende brudtøyning

$\epsilon_{pud} =$	10,0	%
--------------------	------	---

Dimensjonerende flytetøyning

$\epsilon_{pd} =$	6,91	%
-------------------	------	---

Oppspenningstøyning inkl. tap

$\epsilon'_{p0} =$	6,30	%
--------------------	------	---

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = 500$  antall lameller

## Ytre aksialkraft

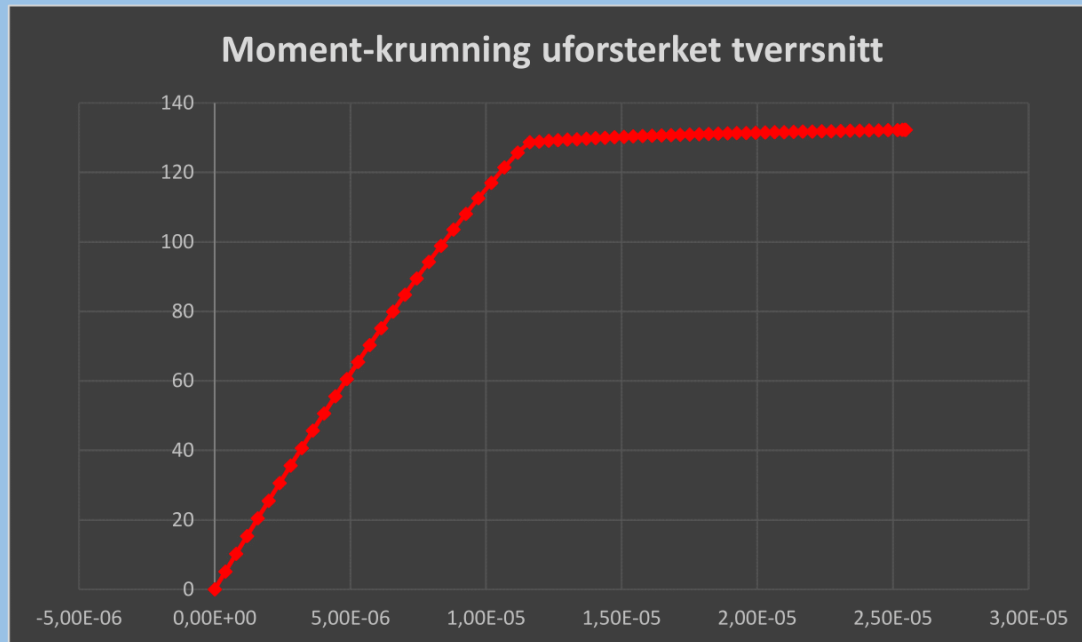
$$P = \text{[ ]} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	132,3	kNm
Krumning	2,547E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	6,69	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	5,59	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

# Kontroll av rektangulært, strekkarmert tverrsnitt

## Normalarmert tverrsnitt

### Materialegenskaper

$$f_{ck} := 35\text{MPa} \quad \alpha_{cc} := 0.85 \quad \gamma_c := 1.5 \quad f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.83333\text{MPa}$$

$$f_{yk} := 500\text{MPa} \quad \gamma_s := 1.15 \quad f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.78261\text{MPa}$$

### Tverrsnittsgeometri

$$b := 200\text{mm} \quad h := 400\text{mm} \quad c_{nom} := 35\text{mm} \quad \emptyset := 16\text{mm} \quad n := 5$$

$$d := h - c_{nom} - \frac{\emptyset}{2} = 357\text{mm}$$

### 5 ‰ tøyning i armering ved trykkbrudd i betong

$$\epsilon_s := \frac{5}{1000} \quad \epsilon_c := \frac{3.5}{1000} \quad \alpha := \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_s} = 0.41176$$

$$A_{s,n\ddot{o}dvendig} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d \cdot \alpha}{f_{yd}} = 1072.9\text{mm}^2$$

$$A_{s,valgt} := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{\emptyset}{2}\right)^2 = 1005.3\text{mm}^2$$

$$\alpha_{valgt} := \frac{f_{yd} \cdot A_{s,valgt}}{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d} = 0.38582$$

$$\epsilon_{s,valgt} := \epsilon_c \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{valgt}} - 1\right) = 0.00557$$

$$M_{Rd} := 0.8 \cdot \alpha_{valgt} \cdot (1 - 0.4 \alpha_{valgt}) \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 = 132 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

Test 1-3: Overarmert tversnitt

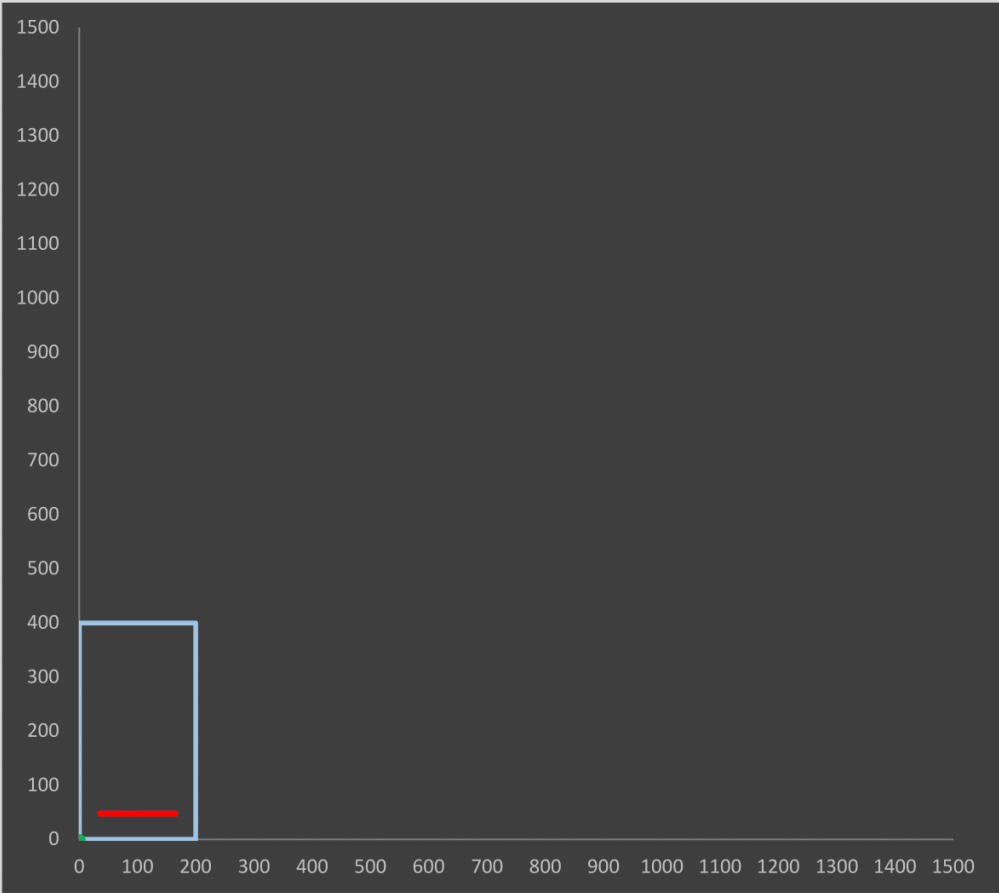
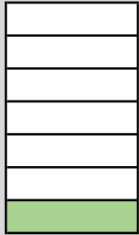
**ConLam**  
utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tversnittstype (rektangulært eller T-tversnitt): Rektangel

Fyll inn tversnittsmål:

**Rektangulært tversnitt**

Bredde	200	mm
Høyde	400	mm



Overdekning strekkarmering  $c_{nom.strekk} = 35$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{nom.trykk} =$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{v.strekk} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{v.trykk} =$  mm

**Slakkarmering**

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	25	4	1963,5	352,5
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

**Spennarmering**

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

**Betong**

Kvalitet **C35/45**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

**Armeringsstål**

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰  
 $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰  
 $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Vedlegg C

### Spennarmering

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{pk} = 1700 \text{ N/mm}^2$$
$$f_{p0,1k} = 1550 \text{ N/mm}^2$$
$$f_{pd} = 1347,8 \text{ N/mm}^2$$
$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = 1401,7 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = 195000 \text{ N/mm}^2$$
$$E_{p2} = 17458 \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning

$$\epsilon_{pud} = 10,0 \text{ ‰}$$

Dimensjonerende flytetøyning

$$\epsilon_{pd} = 6,91 \text{ ‰}$$

Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon'_{p0} = 6,30 \text{ ‰}$$

Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = 500$  antall lameller

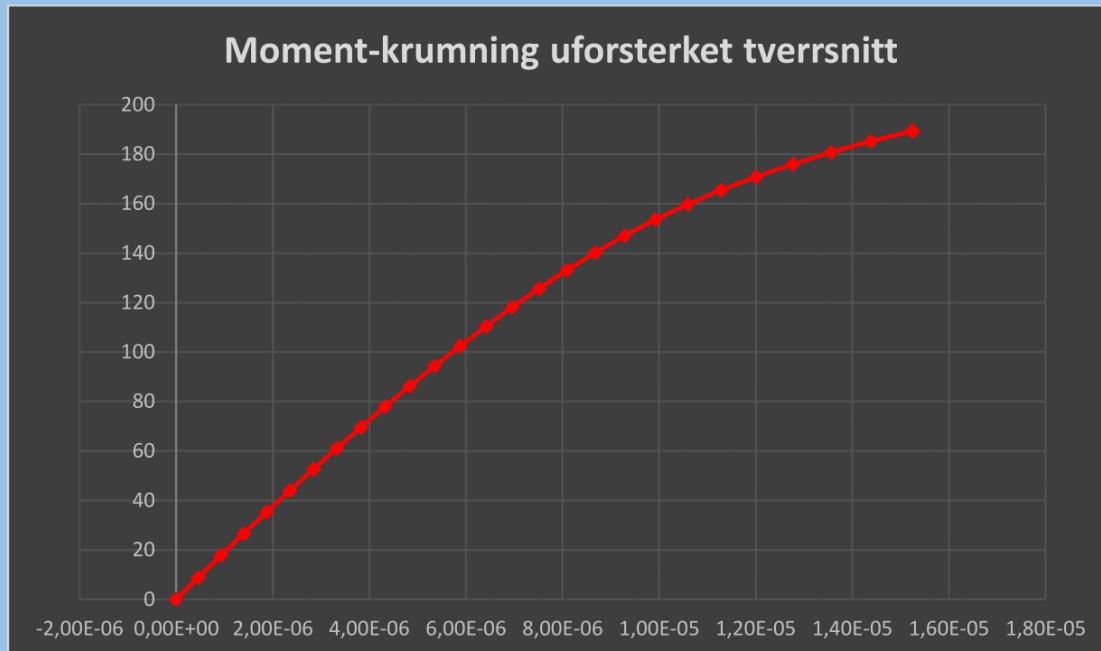
Ytre aksialkraft

$$P = \text{ } \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne testes inn med positiv verdi.

**Kapasitet ULS, uforsterket**

Moment	<b>189,4</b>	kNm
Krumning	1,525E-05	



**Tøyninger**

$\epsilon_{c,uk}$	2,60	%o	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%o	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	1,88	%o	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%o	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%o	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%o	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%o	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%o	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%o	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%o	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%o	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%o	Spennarmering, lag2

Brudd	
Ikke flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

\*Negativ verdi er stukning

# Kontroll av rektangulært, strekkarmert tverrsnitt

## Overarmert tverrsnitt

### Materialegenskaper

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa} \quad \alpha_{cc} := 0.85 \quad \gamma_c := 1.5 \quad f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.83333 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa} \quad \gamma_s := 1.15 \quad f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.78261 \cdot \text{MPa}$$

$$E_s := 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

### Tverrsnittsgeometri

$$b := 200 \text{ mm} \quad h := 400 \text{ mm} \quad c_{nom} := 35 \text{ mm} \quad \emptyset := 25 \text{ mm} \quad n := 4$$

$$d := h - c_{nom} - \frac{\emptyset}{2} = 352.5 \cdot \text{mm}$$

$$\epsilon_c := \frac{3.5}{1000} \quad \epsilon_{yd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 2.17391 \times 10^{-3}$$

$$\alpha_{bal} := \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_{yd}} = 0.61686$$

$$A_s := n \cdot \pi \cdot \left( \frac{\emptyset}{2} \right)^2 = 1963.5 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Større enn: } A_{s,bal} := \frac{0.8 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d \cdot \alpha_{bal}}{f_{yd}} = 1587 \cdot \text{mm}^2$$

guess:  $\alpha := 1$

Given

$$0.8 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d \cdot \alpha^2 + E_s \cdot A_s \cdot \epsilon_c \cdot \alpha - E_s \cdot A_s \cdot \epsilon_c = 0$$

$$\alpha := \text{Find}(\alpha) = 0.65298$$

$$\epsilon_{s, \text{valgt}} := \epsilon_c \cdot \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right) = 0.00186$$

$$M_{Rd} := 0.8 \cdot \alpha \cdot (1 - 0.4\alpha) \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2 = 190.2 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$



## Test 2: Rektangulært tverrsnitt – slakkarmering i strekk og trykk

Test 2 er en sammenligning mellom eksempel 4.6 i Sørensen (2010) side 48-50 og beregninger i ConLam.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra ConLam i de påfølgende sidene. Det nødvendige armeringsarealet fra eksempelet er lagt inn i ConLam for å kunne sammenligne momentkapasitet og tøyninger, derfor er ikke antall armeringsstenger lagt inn som et heltall.

### Test 2

	Sørensen (2010) eksempel 4.6	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i strekkarmering [‰]	5	5,02	+0,02	+0,4
Tøyning i trykkarmering [‰]	2,2	2,22	+0,02	+0,9
Momentkapasitet [kNm]	190	190,8	+0,8	+0,4

Sørensen, Svein I. 2010. *Betongkonstruksjoner: beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Trondheim: Tapir akademisk forl.

# ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

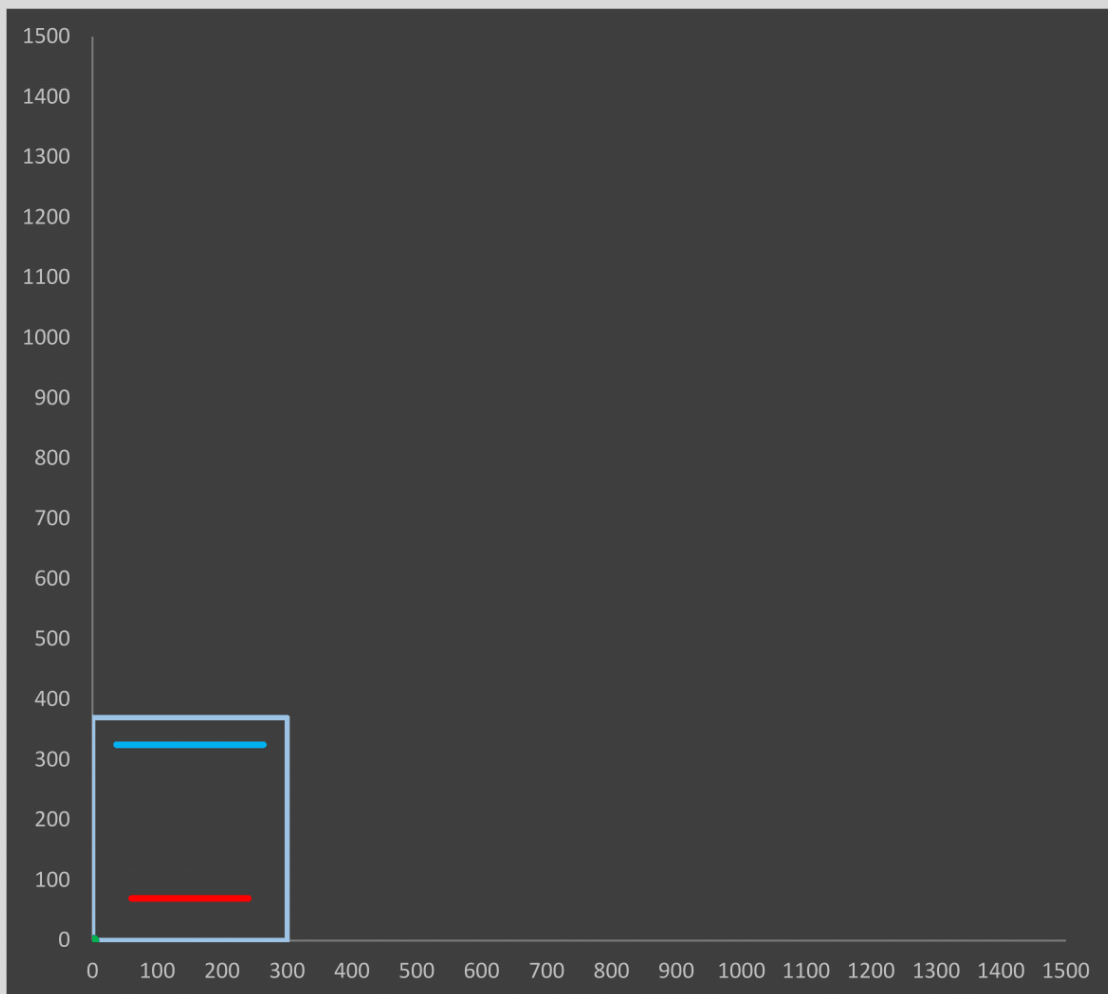
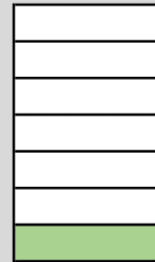
Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

### Rektangulært tverrsnitt

Bredde	300	mm
Høyde	370	mm



Overdekning strekkarmering  $c_{nom.strekk} = 60$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{nom.trykk} = 37$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{v.strekk} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{v.trykk} =$  mm

**Slakkarmering**

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]
Lag 1	20	5,541	1740,8	300
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	16	1,934	388,9	45
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

**Spennarmering**

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	n	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

**Betong**

Kvalitet **C35/45**

$\gamma_c = 1,5$

$\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰

$\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

**Armeringsstål**

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Vedlegg C

### Spennarmering

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$f_{pk} =$	<input type="text" value="1700"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{p0,1k} =$	<input type="text" value="1550"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd} =$	<input type="text" value="1347,8"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s =$	<input type="text" value="1401,7"/>	N/mm <sup>2</sup>

$E_{p1} =$	<input type="text" value="195000"/>	N/mm <sup>2</sup>
$E_{p2} =$	<input type="text" value="17458"/>	N/mm <sup>2</sup>

Dimensjonerende brudtøyning  
Dimensjonerende flytetøyning  
Oppspenningstøyning inkl. tap

$\epsilon_{pud} =$	<input type="text" value="10,0"/>	‰
$\epsilon_{pd} =$	<input type="text" value="6,91"/>	‰
$\epsilon'_{p0} =$	<input type="text" value="6,30"/>	‰

### Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

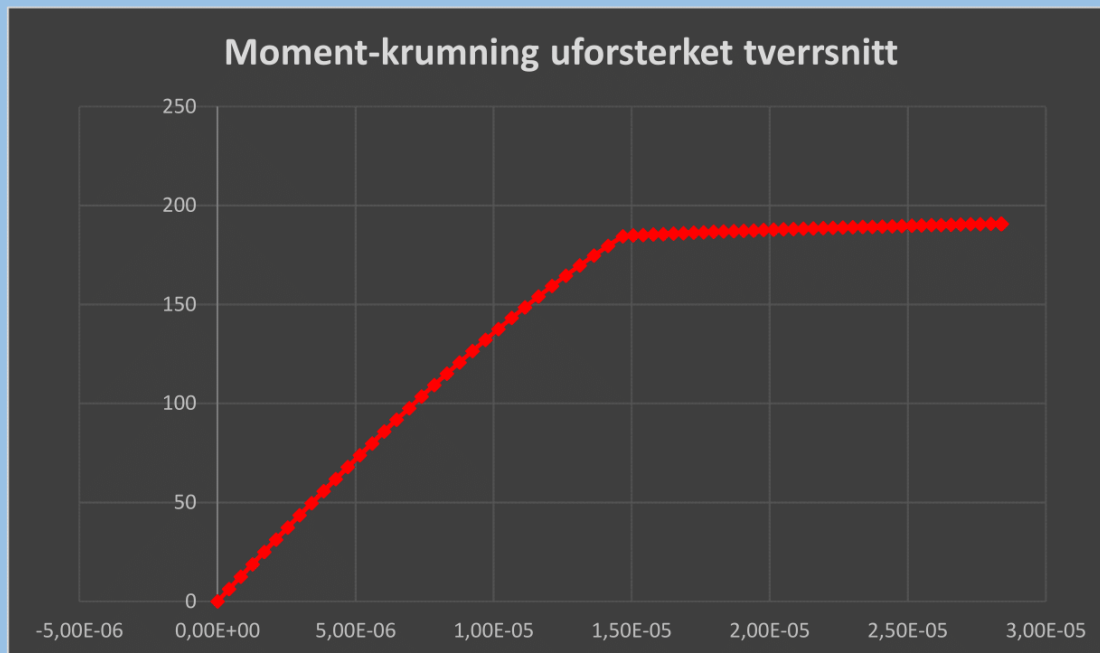
### Ytre aksialkraft

$$P = \boxed{\phantom{00000}} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne testes inn med positiv verdi.

**Kapasitet ULS, uforsterket**

Moment	<b>190,8</b>	kNm
Krumning	2,839E-05	



**Tøyninger**

$\epsilon_{c,uk}$	7,01	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	5,02	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-2,22	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

\*Negativ verdi er stukning

### Test 3: T-tverrsnitt – slakkarmering i strekk

Test 3 er en sammenligning mellom eksempel 4.7 i Sørensen (2010) side 53, beregninger fra beregningsprogram utviklet av Bakkebo og Larssen (2015) og beregninger i ConLam. Teorien som ligger til grunn for eksempel 4.7 i Sørensen (2010) er betydelig forenklet noe som kommer til uttrykk i resultatene fra denne testen. Teorien legger til grunn en antagelse om konstant betongtrykkspenning i hele flensen (og kun flensen), slik at trykkresultanten virker midt i flensen. ConLam-beregninger viser at trykksonen er på 66,0 mm, mens tykkelse på flensen er 150 mm.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra ConLam i de påfølgende sidene. Beregningsprogrammet til Bakkebo og Larssen egner seg best til beregning av CFRP-forsterket tverrsnitt, noe som blant annet fører til at man ikke kan kjøre dette uforsterkede tverrsnittet opp til brudd i armeringen, slik som i ConLam. Dette bidrar derfor til avvikende verdier i testingen, sammen med at det i programmet til Bakkebo og Larssen blir benyttet spenningsblokk-beregning på betongen og armeringsstål uten fastning. Det er under testingen utført forsøk hvor det er lagt inn 28 ‰ grensetøyning for stålet, samt ingen fastning.

## Test 3

	<b>Sørensen (2010) eksempel 4.7</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Momentkapasitet [kNm]	511	593,8 (Uten fastning: 553,1)	+82,8 (+42,1)	+16,2 (+8,2)

	<b>Beregningsprogram Bakkebø og Larssen</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i slakkarmering [‰]	28,0	30,01 (Uten fastning: 30,01) (Uten fastning og endret grensetøyning: 28,00)	+2,01 (+2,01) (0,00)	+7,2 (+7,2) (0,0)
Tøyning i betong [‰]	2,77	3,12 (Uten fastning: 2,94) (Uten fastning og endret grensetøyning: 2,79)	+0,35 (+0,17) (+0,02)	+12,6 (+6,1) (+0,7)
Momentkapasitet [kNm]	552,9	593,8 (Uten fastning: 553,1) (Uten fastning og endret grensetøyning: 552,9)	+40,9 (+0,2) (0,0)	+7,2 (0,0) (0,0)

Bakkebø, Nicolas, og Sondre Larssen. 2015. *Betongkonstruksjoner med med pålimt karbonfiberforsterkning*, Master Thesis at Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.

Sørensen, Svein I. 2010. *Betongkonstruksjoner: beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Trondheim: Tapir akademisk forl.

# ConLam

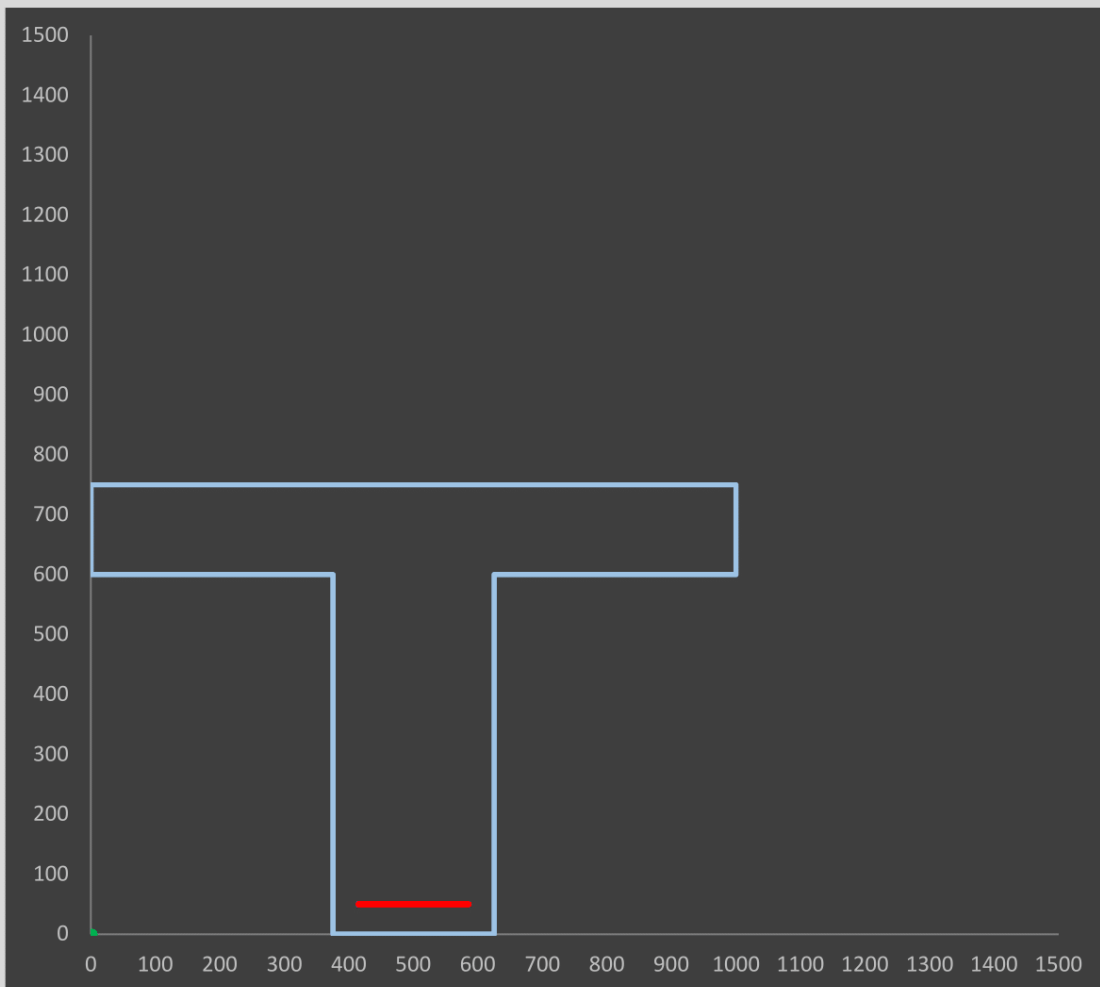
utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

Fyll inn tverrsnittsmål:


### T-tverrsnitt

Effektiv bredde flens	1000	mm
Tykkelse flens, ende	150	mm
Tykkelse flens, midt	150	mm
Bredde steg, bunn	250	mm
Bredde steg, topp	250	mm
Høyde steg	600	mm
Total høyde tverrsnitt	750	mm





Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 40$  mmOverdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} =$  mmFri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mmFri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

## Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]
Lag 1	20	6	1885,0	700
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

## Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	n	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

## Betong

Kvalitet **C30/37** $\gamma_c = 1,5$  $\alpha_{cc} = 0,85$  $f_{ck} = 30,0$  N/mm<sup>2</sup> $f_{cd} = 17,0$  N/mm<sup>2</sup> $f_{cm} = 38,0$  N/mm<sup>2</sup> $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰ $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰ $E_{cm} = 33000$  N/mm<sup>2</sup>Selvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 33000$  N/mm<sup>2</sup>

## Armeringsstål

 $\gamma_s = 1,15$  $f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup> $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup> $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup> $E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup> $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup> $\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰ $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰ $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Vedlegg C

### Spennarmering

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$f_{pk} =$	<input type="text" value="1700"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{p0,1k} =$	<input type="text" value="1550"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd} =$	<input type="text" value="1347,8"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s =$	<input type="text" value="1401,7"/>	N/mm <sup>2</sup>

$E_{p1} =$	<input type="text" value="195000"/>	N/mm <sup>2</sup>
$E_{p2} =$	<input type="text" value="17458"/>	N/mm <sup>2</sup>

Dimensjonerende brudtøyning  
Dimensjonerende flytetøyning  
Oppspenningstøyning inkl. tap

$\epsilon_{pud} =$	<input type="text" value="10,0"/>	%
$\epsilon_{pd} =$	<input type="text" value="6,91"/>	%
$\epsilon'_{p0} =$	<input type="text" value="6,30"/>	%

### Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet       $n = \boxed{500}$  antall lameller

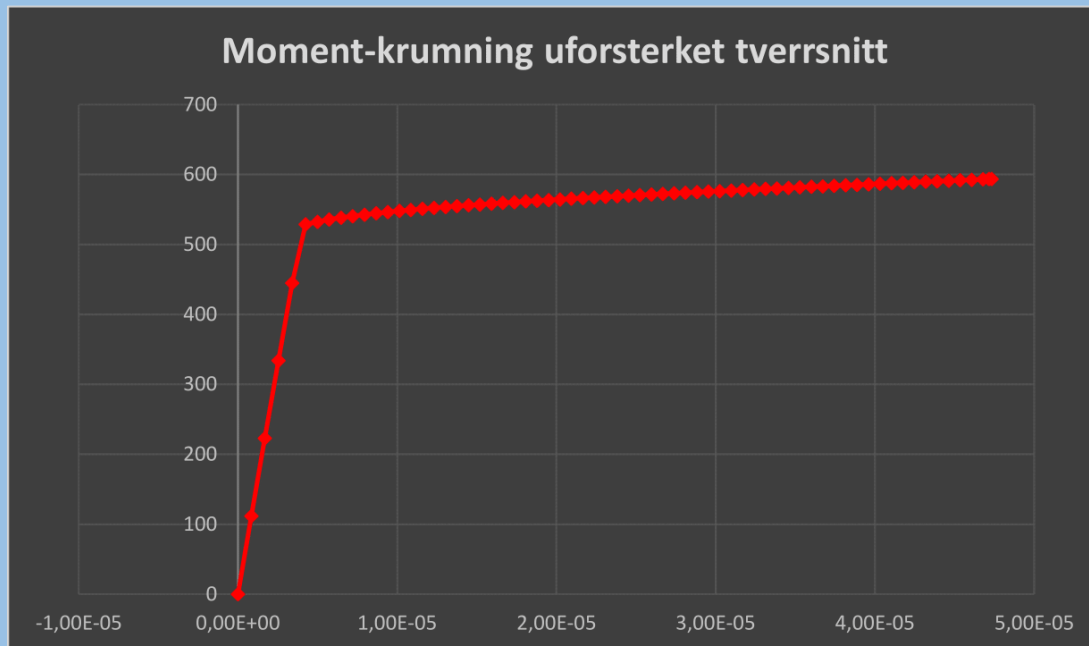
### Ytre aksialkraft

$$P = \boxed{\phantom{00000}} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

**Kapasitet ULS, uforsterket**

Moment	<b>593,8</b>	kNm
Krumning	4,733E-05	



**Tøyninger**

$\epsilon_{c,uk}$	32,38	%o	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,12	%o	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	30,01	%o	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%o	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%o	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%o	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%o	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%o	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%o	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%o	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%o	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%o	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Ikke brudd	
Flytning	Brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

## Test 4: Rektangulært tverrsnitt – spennarmering, og slakkarmering i strekk og trykk

Test 4-1 og 4-2 er en sammenligning mellom eksempel 7.1 i Sørensen (2010) side 267 - 268 og beregninger i ConLam.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra ConLam i de påfølgende sidene. Det nødvendige armeringsarealet fra eksempelet er lagt inn i ConLam for å kunne sammenligne momentkapasitet og tøyninger, derfor er ikke antall armeringsstenger lagt inn som et heltall (test 4-2). Tøyningene hentet fra eksempelet er beregnet med utgangspunkt i angitt trykksonehøyde.

ConLam har en bruddgrense i spennarmering på 10 ‰. Denne grensen ser ut til å være oversteget i eksempelet.

30 ‰ tøyningsgrense i ConLam gir momentkapasitet på 1472,0 kNm, 3,5 ‰ tøyning i betong og 13,03 ‰ tøyning i spennarmering (test 4-1).

30 ‰ tøyningsgrense i ConLam gir momentkapasitet på 1563,1 kNm, 3,5 ‰ tøyning i betong og 13,03 ‰ tøyning i spennarmering (test 4-2).

### Test 4-1: Kun spennarmering

	Sørensen (2010) eksempel 7.1	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i betong [‰]	3,5	2,42	-1,08	-30,9
Tøyning i spennarmering [‰]	13,09	10,02	-3,07	-23,5
Momentkapasitet [kNm]	1456	1496,5	+40,5	+2,8

### Test 4-2: Slakkarmering i strekk og trykk, og spennarmering

	Sørensen (2010) eksempel 7.1	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i betong [‰]	3,5	2,42	-1,08	-30,9
Tøyning i spennarmering [‰]	13,09	10,02	-3,07	-23,5
Momentkapasitet [kNm]	1539	1586,0	+47,0	+3,1

Sørensen, Svein I. 2010. *Betongkonstruksjoner: beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Trondheim: Tapir akademisk forl.

Test 4-1: Kun spennarmering

## ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

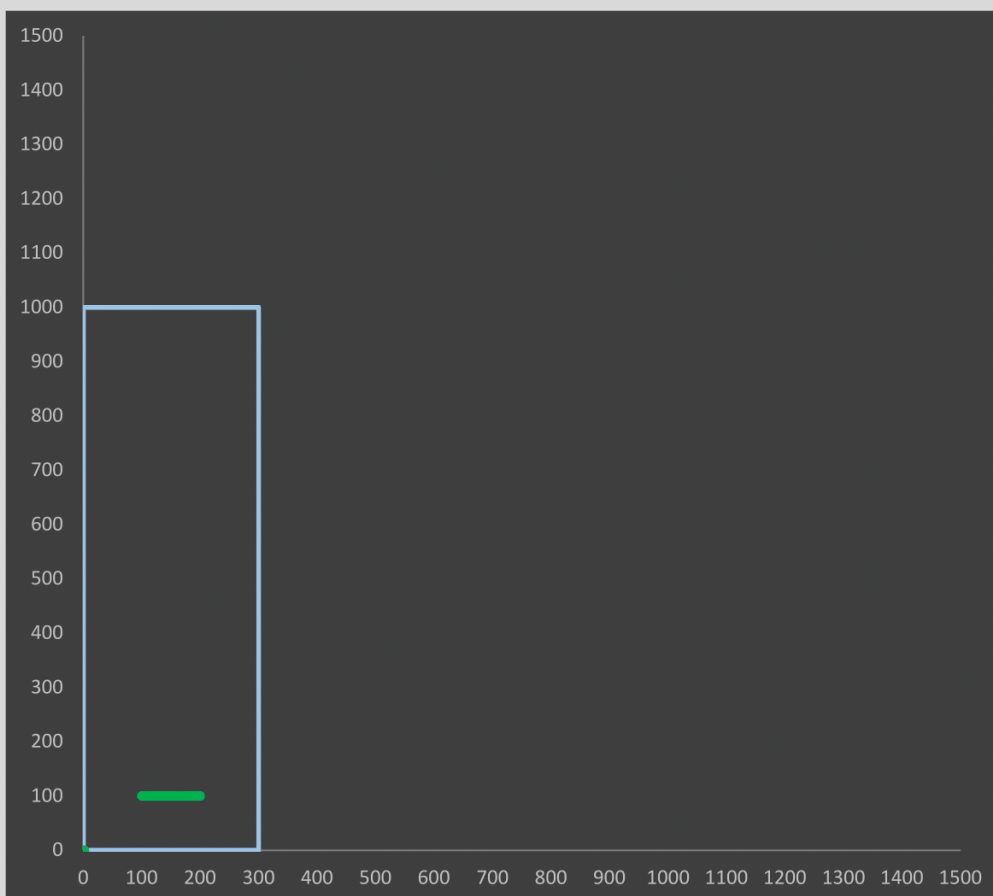
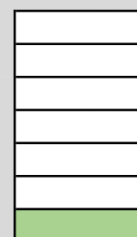
Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	300	mm
Høyde	1000	mm



## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} =$   mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} =$   mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$   mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$   mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1	1400	1	1400,0	900
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet

$\gamma_c =$

$\alpha_{cc} =$

$f_{ck} =$   N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd} =$   N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm} =$   N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{c2} =$   ‰

$\epsilon_{cu2} =$   ‰

$E_{cm} =$   N/mm<sup>2</sup>

Selvalgt E-modul,  $E'_c =$   N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c =$   N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s =$

$f_{yk} =$   N/mm<sup>2</sup>

$f_{yd} =$   N/mm<sup>2</sup>

$f_t =$   N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} =$   N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} =$   N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} =$   ‰

$\epsilon_{uk} =$   ‰

$\epsilon_{yd} =$   ‰

## Spennarmering

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$$f_{pk} = \boxed{\phantom{1550}} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = \boxed{1550} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd} = \boxed{1347,8} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = \boxed{1401,7} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = \boxed{195000} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p2} = \boxed{17458} \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning

$$\epsilon_{pud} = \boxed{10,0} \%$$

Dimensjonerende flytetøyning

$$\epsilon_{pd} = \boxed{6,91} \%$$

Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon'_{p0} = \boxed{6,30} \%$$

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

## Ytre aksialkraft

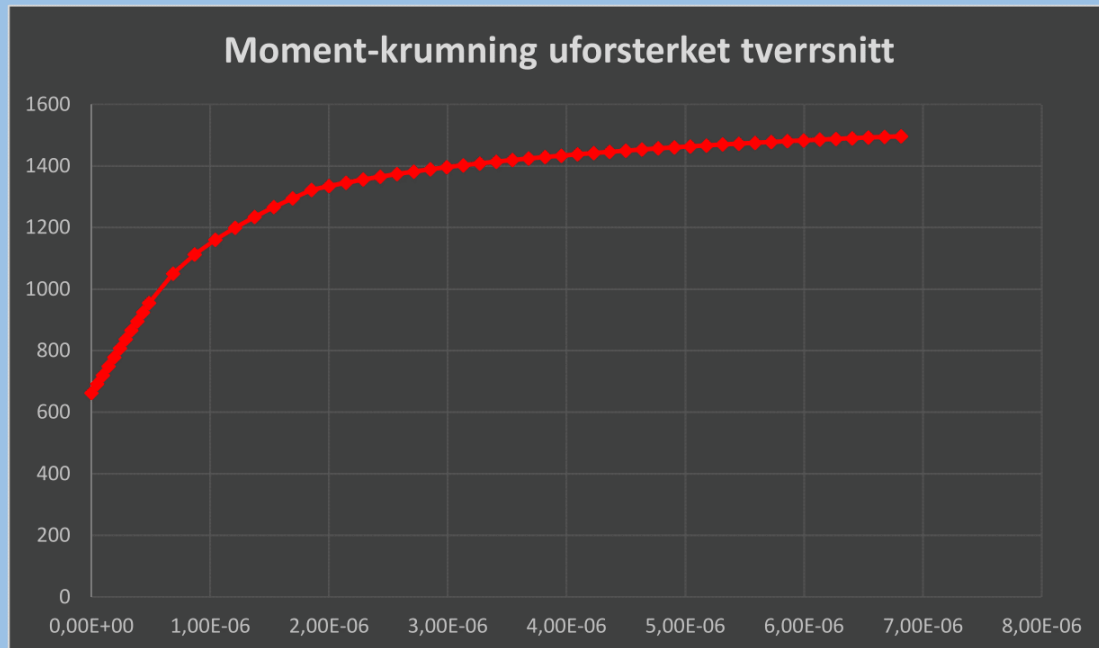
$$P = \boxed{\phantom{0000}} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	1496,5	kNm
Krumning	6,815E-06	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	4,40	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-2,42	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	-	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	10,02	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
Flytning	Brudd
-	-

\*Negativ verdi er stukning



## Test 4-2: Slakkarmering i strekk og trykk, og spennarmering

## ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	300	mm
Høyde	1000	mm


The figure shows a 2D coordinate system with both axes ranging from 0 to 1500 mm. A blue rectangle is plotted with its bottom-left corner at the origin (0,0) and its top-right corner at (300,1000). A horizontal blue line is drawn at y=950 mm from x=0 to x=300 mm. A horizontal green line is drawn at y=100 mm from x=0 to x=300 mm.

## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 92$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} = 42$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\phi$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	16	1,2135	244,0	900
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\phi$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	16	1,2135	244,0	50
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1	1400	1	1400,0	900
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C45/55**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 45,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 25,5$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 53,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 36000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 36000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰  
 $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰  
 $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Spennarmering

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$f_{pk} =$	<input type="text"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{p0,1k} =$	1550	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd} =$	1347,8	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s =$	1401,7	N/mm <sup>2</sup>

$E_{p1} =$	195000	N/mm <sup>2</sup>
$E_{p2} =$	17458	N/mm <sup>2</sup>

Dimensjonerende brudtøyning  
 Dimensjonerende flytetøyning  
 Oppspenningstøyning inkl. tap

$\epsilon_{pud} =$	10,0	%
$\epsilon_{pd} =$	6,91	%
$\epsilon'_{p0} =$	6,30	%

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet       $n = \boxed{500}$  antall lameller

## Ytre aksialkraft

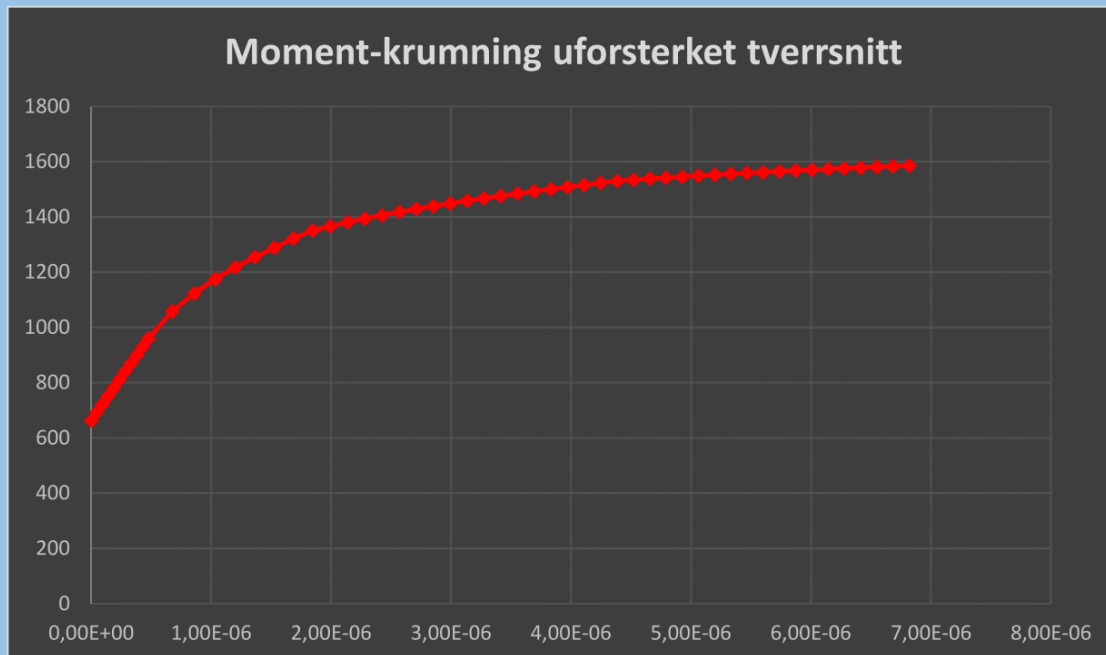
$P = \boxed{\phantom{000}}$  kN

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	1586,0	kNm
Krumning	6,821E-06	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	4,40	%o	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-2,42	%o	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	3,72	%o	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%o	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%o	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%o	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-2,08	%o	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%o	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%o	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%o	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	10,02	%o	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%o	Spennarmering, lag2

Ikke brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
Ikke flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Flytning	Brudd
-	-

\*Negativ verdi er stukning

## Test 5: Rektangulært tverrsnitt – slakkarmering i strekk og trykk, med normalkraft

Test 5 er en sammenligning mellom eksempel 4.13 i Sørensen (2010) side 90 - 94 og beregninger i ConLam. Punkt 1 (rent trykk) fra eksempelet er utelatt da programmet ikke er ment til å beregne rent trykkbelastede konstruksjonsdeler.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra ConLam i de påfølgende sidene.

Ved beregning med ConLam legges aksialkraften inn som input, til forskjell fra eksempel 4.13 der aksialkraften beregnes.

### Test 5-1: Trykkbrudd i betong

	Sørensen (2010) eksempel 4.13	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0	0,0
Tøyning i trykkarmering [‰]	3,15	3,15	0	0,0
Tøyning i strekkarmering [‰]	0,35	0,32	-0,03	-8,6
Normalkraft [kN]	2374	2374	0	0,0
Momentkapasitet [kNm]	151	144,9	-6,1	-4,0

### Test 5-2: Trykkbrudd i betong og flytning i strekkarmering

	Sørensen (2010) eksempel 4.13	ConLam	Avvik	Avvik i %
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0	0,0
Tøyning i trykkarmering [‰]	2,87	2,86	-0,01	-0,3
Tøyning i strekkarmering [‰]	2,17	2,25	+0,08	+3,7
Normalkraft [kN]	906	906	0	0,0
Momentkapasitet [kNm]	305	303,6	-1,4	-0,5

**Test 5-3: Trykkbrudd i betong og dobbel flytetøyning i strekkarmering**

	<b>Sørensen (2010) eksempel 4.13</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0	0,0
Tøyning i trykkarmering [‰]	2,56	2,55	-0,01	-0,4
Tøyning i strekkarmering [‰]	5,0	5,04	+0,04	0,8
Normalkraft [kN]	605	605	0	0,0
Momentkapasitet [kNm]	290	290,3	+0,3	+0,1

**Test 5-4: Trykkbrudd i betong og stor tøyning i strekkarmering**

	<b>Sørensen (2010) eksempel 4.13</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Tøyning i betong [‰]	3,5	3,50	0	0,0
Tøyning i trykkarmering [‰]	1,444	1,49	0,046	+3,2
Tøyning i strekkarmering [‰]	15	14,61	-0,39	-2,6
Normalkraft [kN]	63	63	0	0,0
Momentkapasitet [kNm]	218	225,1	+7,1	+3,3

Sørensen, Svein I. 2010. *Betongkonstruksjoner: beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Trondheim: Tapir akademisk forl.

## Test 5-1: Trykkbrudd i betong

# ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	300	mm
Høyde	400	mm


The figure shows a 2D coordinate system with both axes ranging from 0 to 1500. A blue rectangle is plotted with its bottom-left corner at the origin (0,0) and its top-right corner at (300,400). A red horizontal line is drawn at y=40, extending from x=0 to x=300. A blue horizontal line is drawn at y=360, extending from x=0 to x=300.

## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{nom.strekk} = 27,5$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{nom.trykk} = 27,5$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{v.strekk} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{v.trykk} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	25	3	1472,6	360
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	25	3	1472,6	40
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C30/37**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 30,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 17,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 38,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 33000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 33000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰  
 $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰  
 $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰



## Spennarmering

$$\gamma_s = 1,15$$

$f_{pk} =$		N/mm <sup>2</sup>
$f_{p0,1k} =$	1550	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd} =$	1347,8	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s =$	1401,7	N/mm <sup>2</sup>

$E_{p1} =$	195000	N/mm <sup>2</sup>
$E_{p2} =$	17458	N/mm <sup>2</sup>

Dimensjonerende brudtøyning  
 Dimensjonerende flytetøyning  
 Oppspenningstøyning inkl. tap

$\epsilon_{pud} =$	10,0	%
$\epsilon_{pd} =$	6,91	%
$\epsilon'_{p0} =$	6,30	%

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet       $n = 500$  antall lameller

## Ytre aksialkraft

$$P = 2374 \text{ kN}$$

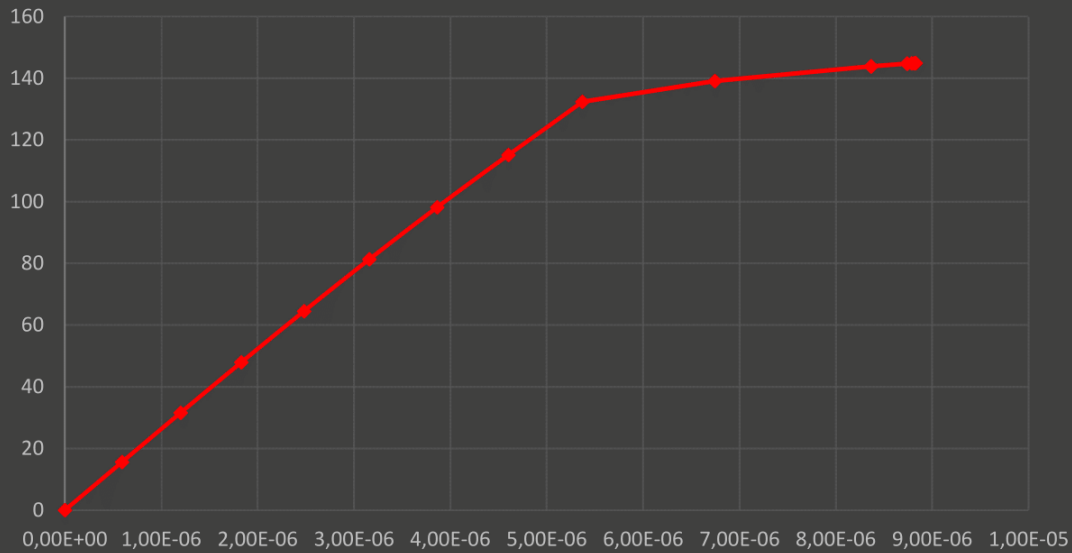
Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	144,9	kNm
Krumning	8,829E-06	

### Moment-krumning uforsterket tverrsnitt



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	0,03	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	-0,32	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-3,15	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Ikke flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

Test 5-2: Trykkbrudd i betong og flytning i strekkarmering

# ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

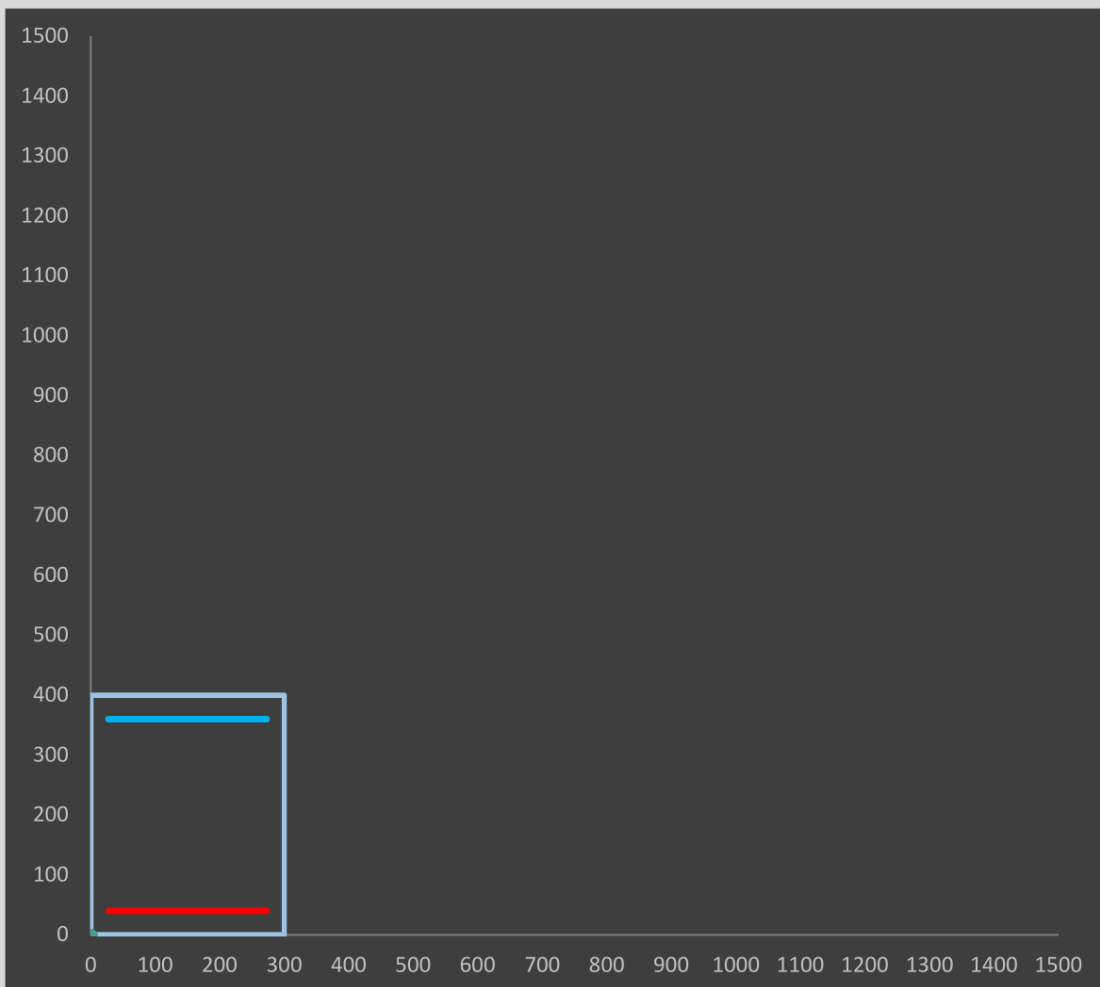
Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	300	mm
Høyde	400	mm

## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{nom.strekk} = 27,5$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{nom.trykk} = 27,5$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{v.strekk} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{v.trykk} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]
Lag 1	25	3	1472,6	360
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	25	3	1472,6	40
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	n	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C30/37**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 30,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 17,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 38,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 33000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Selvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 33000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰  
 $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰  
 $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Spennarmering

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{pk} = \text{ } \text{N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = 1550 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd} = 1347,8 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = 1401,7 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = 195000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p2} = 17458 \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning  
 Dimensjonerende flytetøyning  
 Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon_{pud} = 10,0 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{pd} = 6,91 \text{ ‰}$$

$$\epsilon'_{p0} = 6,30 \text{ ‰}$$

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = 500$  antall lameller

## Ytre aksialkraft

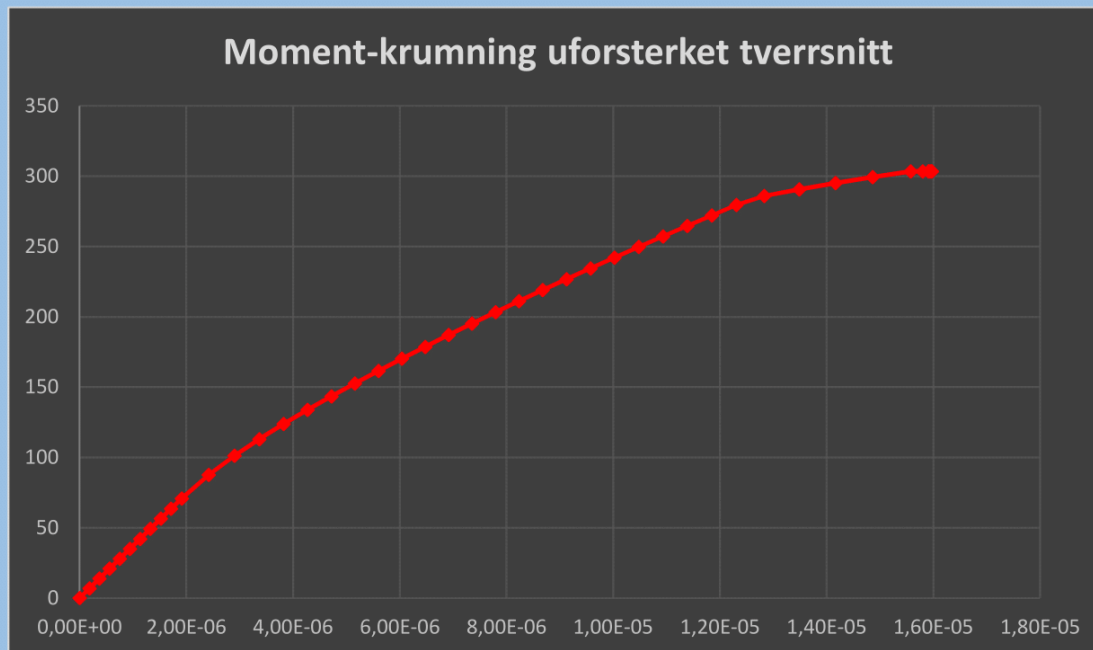
$$P = 906 \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	303,6	kNm
Krumning	1,597E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	2,89	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	2,25	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-2,86	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

## Test 5-3: Trykkbrudd i betong og dobbel flytetøyning i strekkarmering

## ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	300	mm
Høyde	400	mm


The figure shows a 2D coordinate system with both x and y axes ranging from 0 to 1500. A blue rectangle is plotted with its bottom-left corner at the origin (0,0) and its top-right corner at (300,400). A red horizontal line is drawn at y=40, extending from x=0 to x=300. A blue horizontal line is drawn at y=360, extending from x=0 to x=300.

## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{nom.strekk} = 27,5$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{nom.trykk} = 27,5$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{v.strekk} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{v.trykk} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]
Lag 1	25	3	1472,6	360
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	25	3	1472,6	40
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	n	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C30/37**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 30,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 17,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 38,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{cc2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 33000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 33000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰  
 $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰  
 $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰



## Spennarmering

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{pk} = \text{ } \text{N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = 1550 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd} = 1347,8 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = 1401,7 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = 195000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p2} = 17458 \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning  
 Dimensjonerende flytetøyning  
 Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon_{pud} = 10,0 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{pd} = 6,91 \text{ ‰}$$

$$\epsilon'_{p0} = 6,30 \text{ ‰}$$

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = 500$  antall lameller

## Ytre aksialkraft

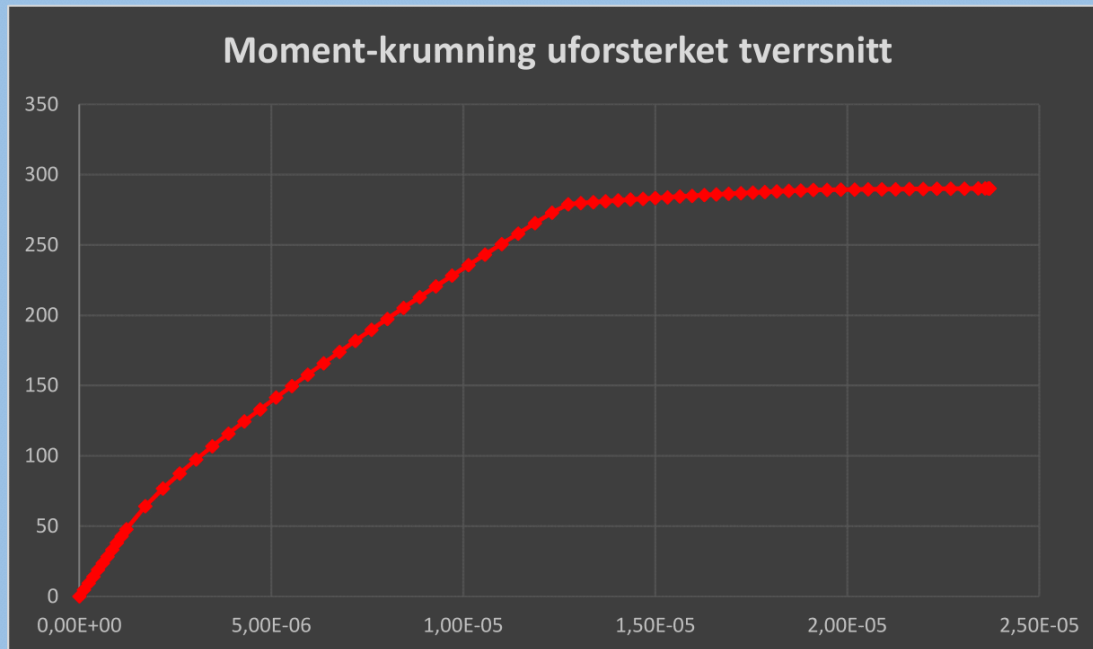
$$P = 605 \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	290,3	kNm
Krumning	2,371E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	5,98	‰	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	‰	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	5,04	‰	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	‰	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-2,55	‰	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-

Test 5-4: Trykkbrudd i betong og stor tøyning i strekkarmering

# ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	300	mm
Høyde	400	mm


## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{nom.strekk} = 27,5$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{nom.trykk} = 27,5$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{v.strekk} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{v.trykk} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]
Lag 1	25	3	1472,6	360
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	25	3	1472,6	40
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	n	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C30/37**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 30,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 17,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 38,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 33000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 33000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰  
 $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰  
 $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Spennarmering

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{pk} = \text{ } \text{N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = 1550 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd} = 1347,8 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = 1401,7 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = 195000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p2} = 17458 \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning  
 Dimensjonerende flytetøyning  
 Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon_{pud} = 10,0 \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{pd} = 6,91 \text{ ‰}$$

$$\epsilon'_{p0} = 6,30 \text{ ‰}$$

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = 500$  antall lameller

## Ytre aksialkraft

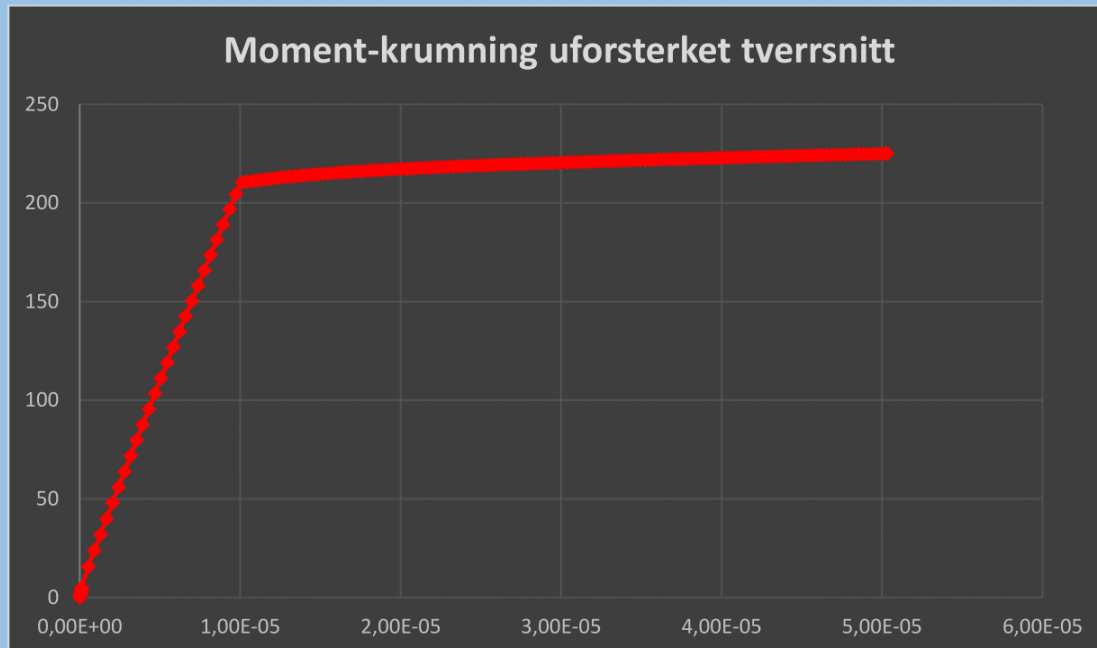
$$P = 63 \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	225,1	kNm
Krumning	5,031E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	16,63	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	14,61	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-1,49	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Ikke flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

## Test 6: Rektangulært tverrsnitt – slakkarmering i strekk og FRP-forsterkning

Test 6 er en sammenligning mellom eksempelet i kapittel 15.3 i ACI (2008) og beregninger i ConLam.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra i de påfølgende sidene. Karakteristisk og dimensjonerende fasthet for betong er satt til 34,5 MPa og sikkerhetsfaktorene er satt til 1,0. Armeringen er gitt en flytegrense på 476 MPa, uten fastning. E-modulen til fiberforsterkningen er på 37 000 MPa. Det er ikke angitt å være karbonfiber, noe det sannsynligvis ikke er da karbonfiber generelt sett har betydelig høyere E-modul. Til tross for dette anses testen som relevant fordi fibermaterialets spenning-tøyingsrelasjon beregnes lineært (i likhet med karbonfiber) i både eksempelet og i ConLam.

### Test 6

	Eksempel fra ACI	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet ULS uforsterket [kNm]	396,3	406,0	+9,7	+2,4
Initialtøyning [‰]	0,61	0,61	0	0,0
Tøyning i betong [‰]	2,63	2,58	-0,05	-1,9
Tøyning i strekkarmering [‰]	8,3	8,33	+0,03	+0,4
Tøyning i forsterkning [‰]	9,0	9,0	0	0,0
Momentkapasitet ULS forsterket [kNm]	510,3	512,4	+2,1	+0,4

ACI, American Concrete Institute. 2008. *440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Vol. 1. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.





Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 49,3$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} =$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

**Slakkarmering**

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	28,66	3	1935,4	546
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

**Spennarmering**

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

**Betong**

Kvalitet **C40/50**

$\gamma_c = 1$

$\alpha_{cc} = 1$

$f_{ck} = 34,5$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd} = 34,5$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm} = 48,0$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰

$\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 35000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 35000$  N/mm<sup>2</sup>

**Armeringsstål**

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 476$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{yd} = 413,9$  N/mm<sup>2</sup>

$f_t = 476$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 0$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,07$  ‰

## Vedlegg C

### Spennarmering

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$$f_{pk} = \boxed{\phantom{1550}} \text{ N/mm}^2$$
$$f_{p0,1k} = \boxed{1550} \text{ N/mm}^2$$
$$f_{pd} = \boxed{1347,8} \text{ N/mm}^2$$
$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = \boxed{1401,7} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = \boxed{195000} \text{ N/mm}^2$$
$$E_{p2} = \boxed{17458} \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende bruddtøyning  
Dimensjonerende flytetøyning  
Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon_{pud} = \boxed{10,0} \%$$
$$\epsilon_{pd} = \boxed{6,91} \%$$
$$\epsilon'_{p0} = \boxed{6,30} \%$$

### Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

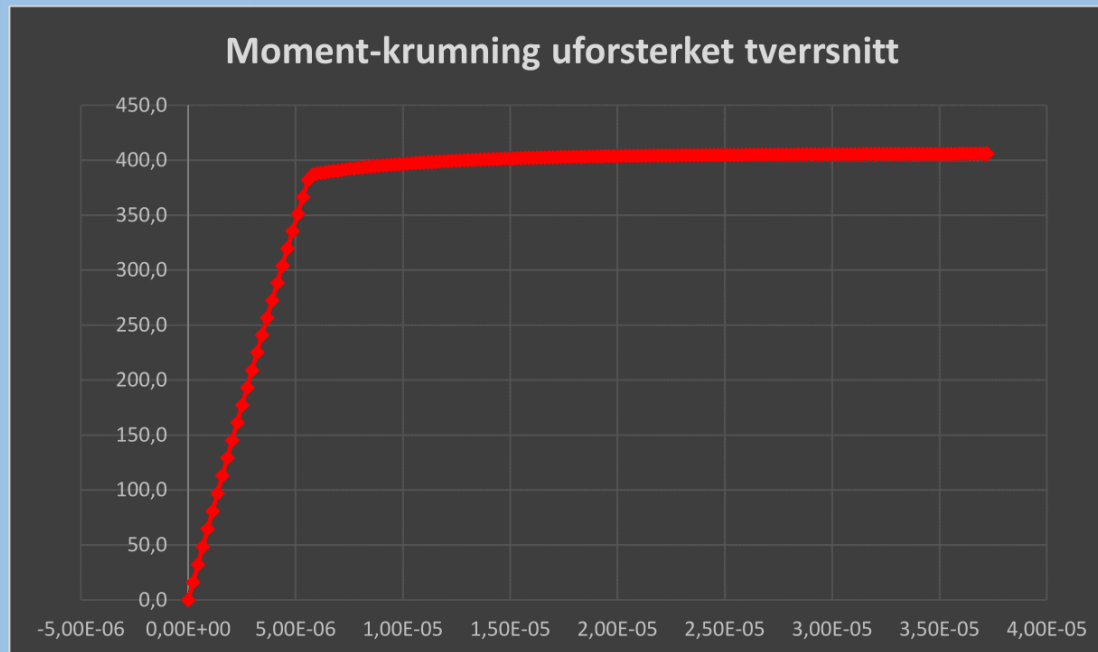
### Ytre aksialkraft

$P = \boxed{\phantom{000000}}$  kN

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

**Kapasitet ULS, uforsterket**

Moment	<b>406,0</b>	kNm
Krumning	3,722E-05	

**Tøyninger**

$\epsilon_{c,uk}$	19,19	%o	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%o	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	16,82	%o	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%o	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%o	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%o	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%o	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%o	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%o	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%o	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%o	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%o	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

## Vedlegg C

### Initialtilstand

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$$M_0 = 98 \text{ [kNm]}$$

Minimum verdi: 0,0 [kNm]

Maksimal verdi: 406,0 [kNm]

### Karbonfiber

$$V_{fm} = 1,2$$

Tykkelse laminat

$$t_f = 1,02 \text{ mm}$$

Bredde laminat

$$b_f = 305 \text{ mm}$$

Antall lag

$$n_f = 2 \text{ stk}$$

Areal

$$A_f = 622,2 \text{ mm}^2$$

$$E_f = 37000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{fk} = 15,1 \text{ ‰}$$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$$\varepsilon_{fd} = 9,00 \text{ ‰}$$

**Initialtøyning**

$\epsilon_{uk,initial} = 0,61$  ‰

Tøyning i underkant betong ved påføring av karbonfiberforsterkning.

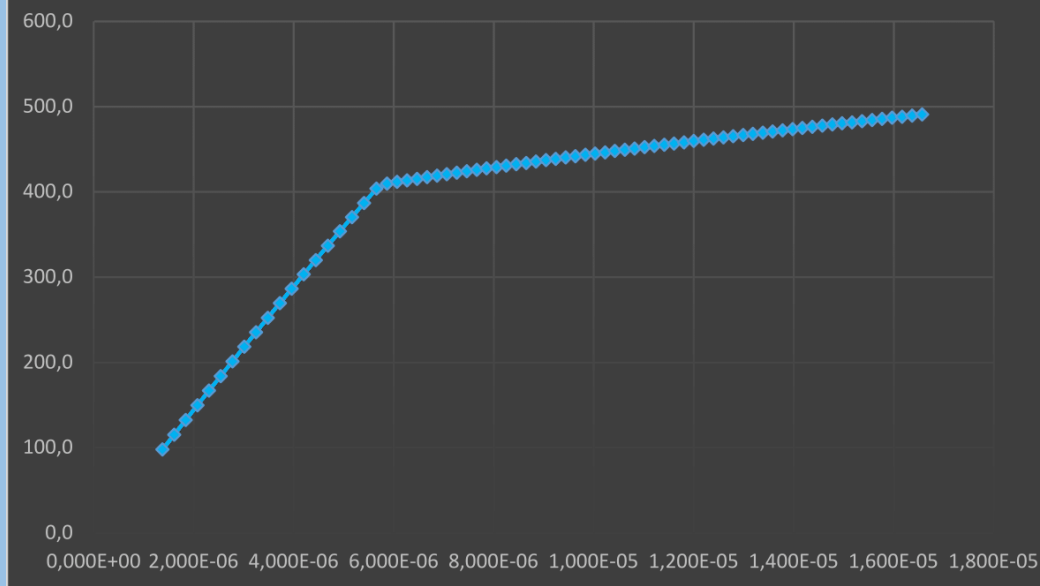
**Kapasitet**

	ULS
Moment	512,4
Krumning	1,999E-05

**SLS kar.**

SLS kar.	SLS TP
0,0	0,0

**Moment-krumning forsterket tverrsnitt**



**Tøyninger**

$\epsilon_{c,uk}$	9,61	‰	Underkant betong		
$\epsilon_{c,ok}$	-2,58	‰	Overkant betong		
$\epsilon_{s,lag1}$	8,33	‰	Strekkarmering, lag1	Flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag2}$	-	‰	Strekkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-	‰	Trykkarmering, lag1	-	-
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1	-	-
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2	-	-
$\epsilon_f$	9,00	‰	Karbonforsterkning		Brudd

\*Negativ verdi er stukning

**Konklusjon**

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med: **106,4** kNm

## Test 7: T-tverrsnitt – spennarmering og FRP-forsterkning

Test 7 er en sammenligning mellom eksempelet i kapittel 15.5 i ACI (2008) og beregninger i ConLam.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra i de påfølgende sidene. Karakteristisk og dimensjonerende fasthet for betong er satt til 27,6 MPa og sikkerhetsfaktorene er satt til 1,0. Karakteristisk og dimensjonerende flytegrense (0,1%-grense) til spennarmeringen er satt til 1586 MPa. Fra denne verdien er det angitt en fastning på spennarmeringen opp til 16 ‰ tøying og 1831 MPa spenning. Dette er gjort for å søke og etterligne materialmodellen som er brukt i eksempelet fra ACI. E-modulen til fiberforsterkningen er på 37 000 MPa. Det er ikke angitt å være karbonfiber, noe det sannsynligvis ikke er da karbonfiber generelt sett har betydelig høyere E-modul. Til tross for dette anses testen som relevant fordi fibermaterialets spenning-tøyningsrelasjon beregnes lineært (i likhet med karbonfiber) i både eksempelet og i ConLam.

### Test 7

	Eksempel fra ACI	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet ULS uforsterket [kNm]	501,6	504,2	+2,6	+0,5
Initialtøying [‰]	-0,03	-0,03	0,00	0,0
Tøying i betong [‰]	0,91	0,93	+0,02	+2,2
Tøying i spennarmering [‰]	16,05	15,85	-0,2	-1,2
Tøying i forsterkning [‰]	11,3	11,30	0,0	0,0
Momentkapasitet ULS forsterket [kNm]	661,7	658,6	-3,1	-0,5

ACI, American Concrete Institute. 2008. *440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Vol. 1. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.

# ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

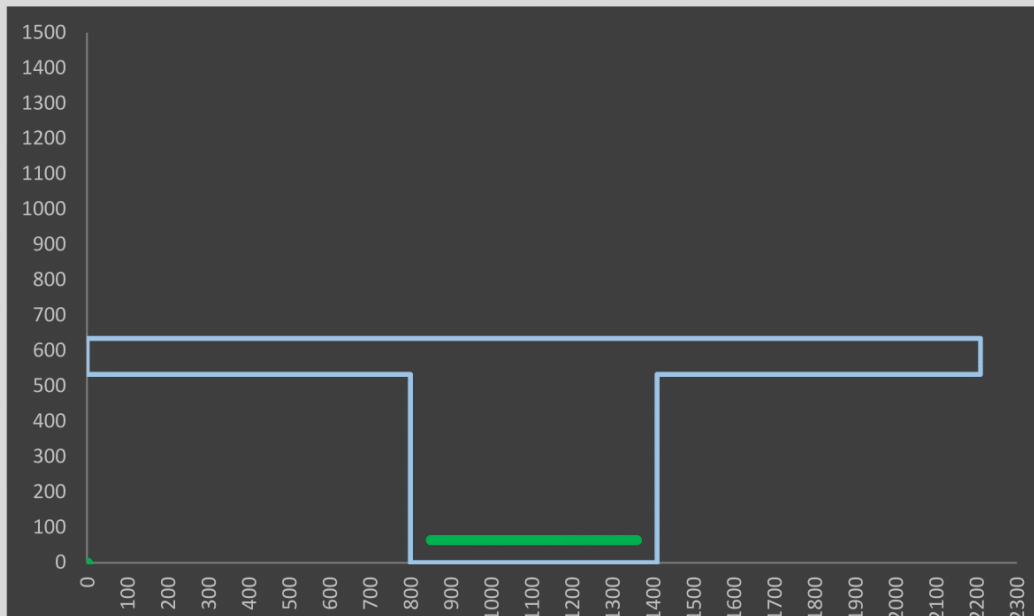
Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

T

Fyll inn tverrsnittsmål:


## T-tverrsnitt

Effektiv bredde flens	2210	mm
Tykkelse flens, ende	102	mm
Tykkelse flens, midt	102	mm
Bredde steg, bunn	610	mm
Bredde steg, topp	610	mm
Høyde steg	533	mm
Total høyde tverrsnitt	635	mm



## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 40$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} =$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,i}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1	99	5	495,0	571
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C30/37**

$\gamma_c = 1$   
 $\alpha_{cc} = 1$

$f_{ck} = 27,6$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 27,6$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 38,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 33000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 33000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 28,0$  ‰  
 $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰  
 $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰



## Spennarmering

$$v_s = \boxed{1}$$

$f_{pk} =$	<input type="text" value="1860"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{p0,1k} =$	<input type="text" value="1586"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd} =$	<input type="text" value="1586,0"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd,maks} =$	<input type="text" value="1831,0"/>	N/mm <sup>2</sup>

$E_{p1} =$	<input type="text" value="196000"/>	N/mm <sup>2</sup>
$E_{p2} =$	<input type="text" value="30981"/>	N/mm <sup>2</sup>

Dimensjonerende brudtøyning  
 Dimensjonerende flytetøyning  
 Oppspenningstøyning inkl. tap

$\epsilon_{pud} =$	<input type="text" value="16,0"/>	%
$\epsilon_{pd} =$	<input type="text" value="8,09"/>	%
$\epsilon'_{p0} =$	<input type="text" value="5,81"/>	%

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

## Ytre aksialkraft

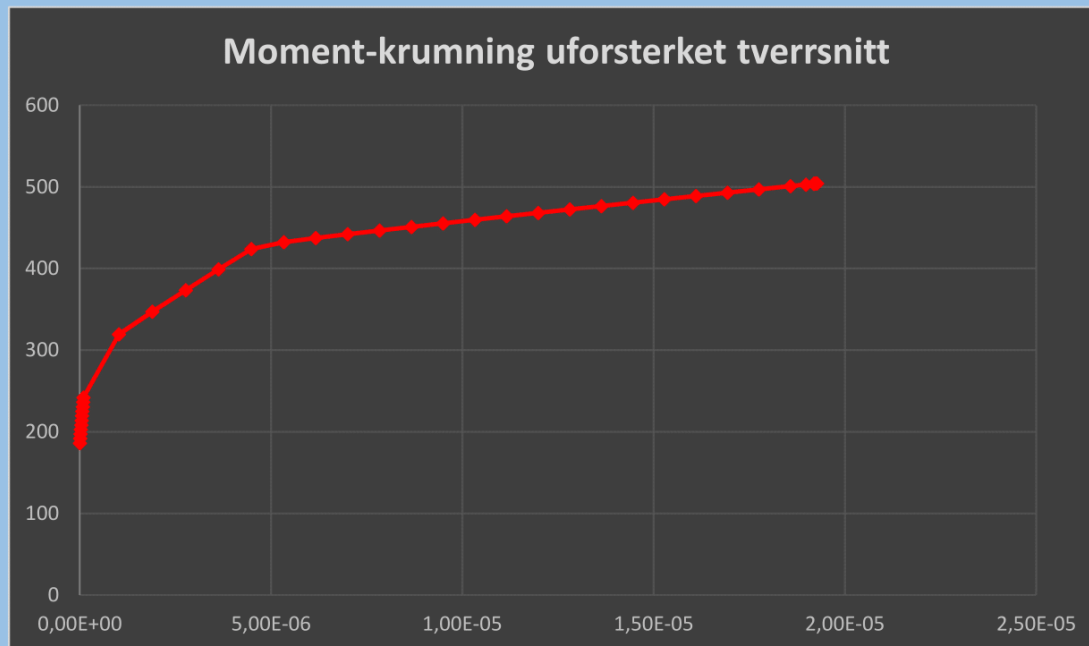
$P = \boxed{\phantom{000}}$  kN

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	<b>504,2</b>	kNm
Krumning	1,927E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	11,42	%o	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-0,81	%o	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	-	%o	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%o	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%o	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%o	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%o	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%o	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%o	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%o	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	16,00	%o	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%o	Spennarmering, lag2

	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
Flytning	Brudd
-	-

\*Negativ verdi er stukning

**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$M_0 = 199 \text{ [kNm]}$

Minimum verdi: 186,2 [kNm]

Maksimal verdi: 504,2 [kNm]

**Karbonfiber**

$\gamma_{fm} = 1,2$

Tykkelse laminat

$t_f = 1 \text{ mm}$

Bredde laminat

$b_f = 610 \text{ mm}$

Antall lag

$n_f = 1 \text{ stk}$

Areal

$A_f = 610 \text{ mm}^2$

$E_f = 37000 \text{ N/mm}^2$

$\epsilon_{fk} = 15,1 \text{ ‰}$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$\epsilon_{fd} = 11,30 \text{ ‰}$

## Vedlegg C

### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = -0,03 \text{ ‰}$$

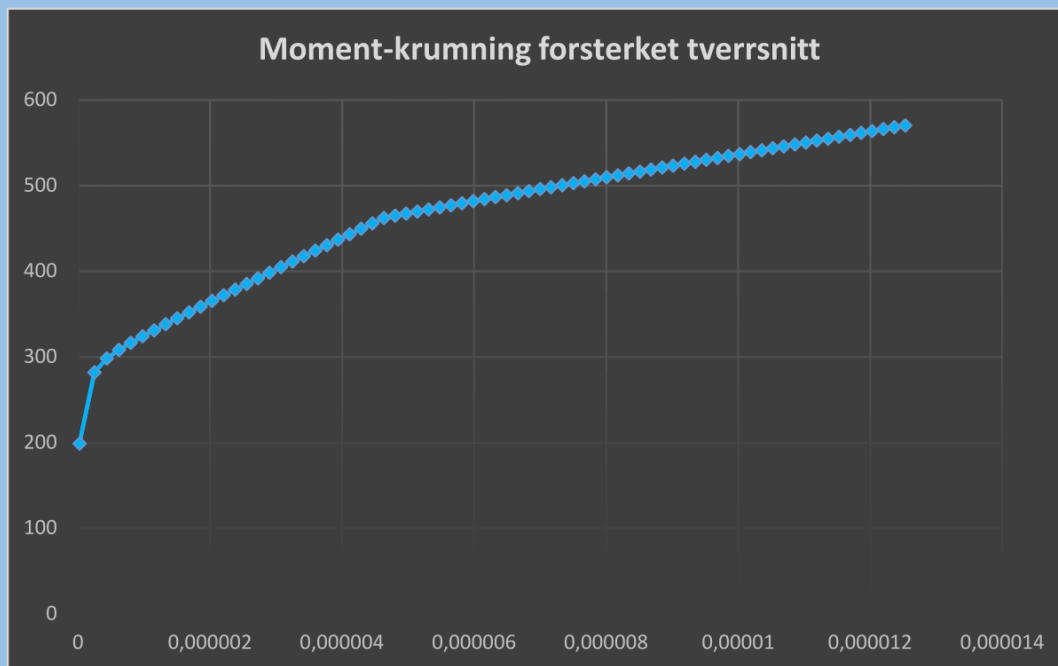
Tøyning i underkant betong ved påføring av karbonfiberforsterkning.

### Kapasitet

	ULS
Moment	658,6
Krumning	1,921E-05

### SLS kar.

SLS kar.	SLS TP
0,0	0,0



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	11,27	‰	Underkant betong		
$\epsilon_{c,ok}$	-0,93	‰	Overkant betong		Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag1}$	-	‰	Strekkarmering, lag1	-	-
$\epsilon_{s,lag2}$	-	‰	Strekkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-	‰	Trykkarmering, lag1	-	-
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{p,1}$	15,85	‰	Spennarmering, lag1	Flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2	-	-
$\epsilon_f$	11,30	‰	Karbonforsterkning		Brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med: **154,4** kNm

## Test 8: T-tverrsnitt – slakkarmering i strekk og CFRP-forsterkning

Test 8 er en sammenligning mellom håndberegninger i Mathcad basert på teori fra Sørensen (2010) side 52 – 53, beregninger fra beregningsprogram utarbeidet av Bakkebø og Larssen (2015), og beregninger i ConLam.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra ConLam i de påfølgende sidene. Teorien som er benyttet er en forenklet metode for å beregne momentkapasitet for T-tverrsnitt. Man legger her til grunn en antagelse om konstant betongtrykkspenning i hele flensen (og kun flensen), slik at trykkresultanten virker midt i flensen. Det er av denne grunn forsøkt å konstruere et eksempel i ConLam som får trykksone i tilnærmet hele flensen, for å kunne sammenligne verdier med håndberegninger. I tilfeller der trykksonen blir veldig liten (bare en liten del av flensen), noe som er vanlig for store flenstverrsnitt, eller hvor trykksonen forflytter seg ned i steget, vil avvikene bli større enn denne testen viser. Formler brukt i håndberegninger er ikke avhengig av betongkvaliteten, og det er ingen fastning i materialmodellen for armeringsstål. Det er forsøkt å endre materialmodell for stålet i ConLam ved å ha konstant strekkfasthet over grensetøyning for flytning. Dette ga mindre avvik enn ved beregning med fastning i materialmodellen.

Beregningsprogrammet til Bakkebø og Larssen benytter trykkspenningsblokk ved beregning av betongbidraget, samt ingen fastning i slakkarmeringen. Ved forsøk på å fjerne fastningen i armeringsstålet i ConLam ga resultatene ingen avvik sammenlignet med Bakkebø og Larssen.

## Test 8

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet ULS uforsterket [kNm]	507,1	532,0 (Uten fastning: 519,4)	+24,9 (+12,3)	+4,9 (+2,4)
Tøyning i CFRP [%]	5,0	5,0	0,0	0,0
Momentkapasitet ULS forsterket [kNm]	608,5	612,6 (Uten fastning: 609,7)	+4,1 (+1,2)	+0,7 (+0,2)
Økning av momentkapasitet ULS med CFRP [kNm]	101,4	80,6 (Uten fastning: 90,3)	-20,8 (-11,1)	-20,5 (-10,9)

	Beregningsprogram Bakkebo og Larssen	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet ULS uforsterket [kNm]	519,4	532,0 (Uten fastning: 519,4)	+12,6 (0,0)	+2,4 (0,0)
Tøyning i CFRP [%]	5,0	5,0	0,0	0,0
Momentkapasitet ULS forsterket [kNm]	609,7	612,6 (Uten fastning: 609,7)	+2,9 (0,0)	+0,5 (0,0)
Økning av momentkapasitet ULS med CFRP [kNm]	90,3	80,6 (Uten fastning: 90,3)	-9,7 (0,0)	-10,7 (0,0)

Bakkebo, Nicolas, og Sondre Larssen. 2015. *Betongkonstruksjoner med med pålimt karbonfiberforsterkning*, Master Thesis at Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.

# ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

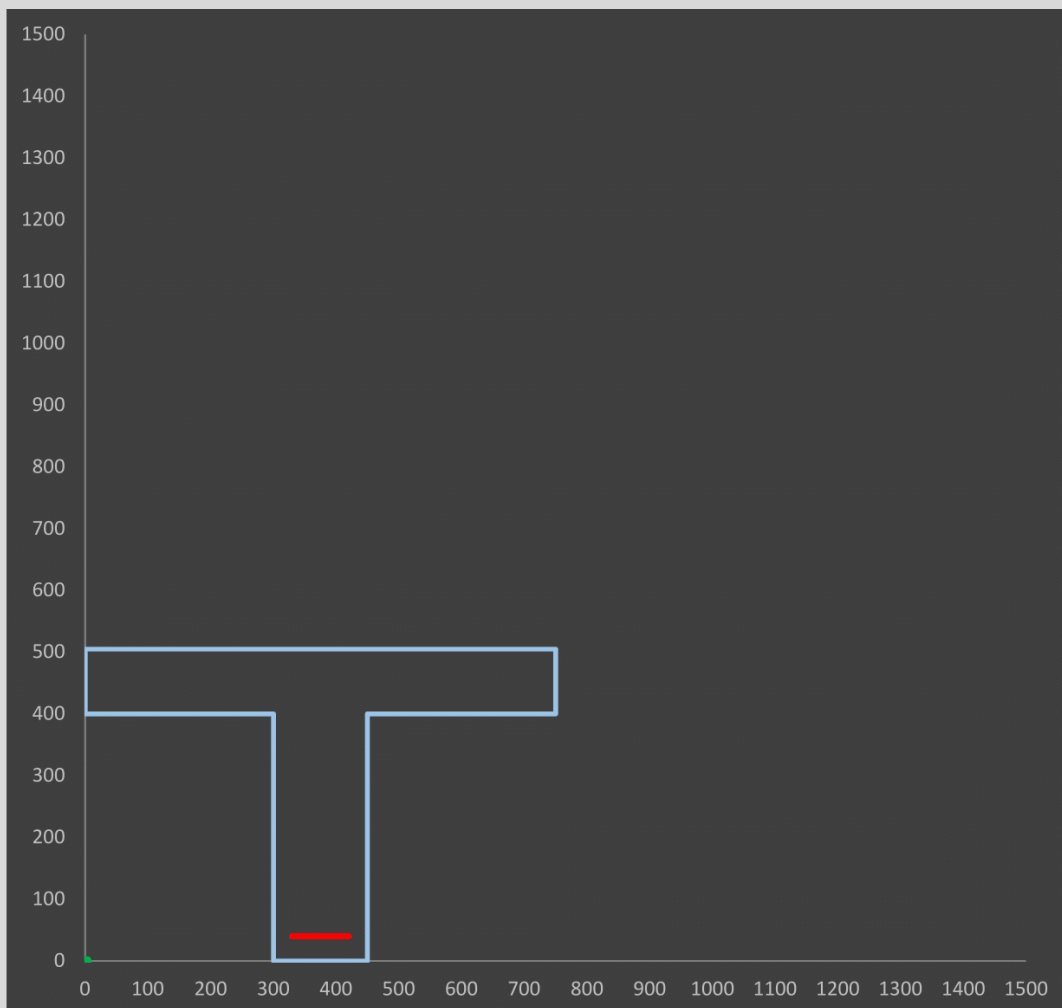
Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

T

Fyll inn tverrsnittsmål:


## T-tverrsnitt

Effektiv bredde flens	750	mm
Tykkelse flens, ende	105	mm
Tykkelse flens, midt	105	mm
Bredde steg, bunn	150	mm
Bredde steg, topp	150	mm
Høyde steg	400	mm
Total høyde tverrsnitt	505	mm



## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 30$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} =$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	20	9	2827,4	465
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C35/45**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰  
 $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰  
 $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰



## Spennarmering

$$\gamma_s = 1,15$$

$$f_{pk} = \quad \text{N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = 1550 \quad \text{N/mm}^2$$

$$f_{pd} = 1347,8 \quad \text{N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = 1401,7 \quad \text{N/mm}^2$$

$$E_{p1} = 195000 \quad \text{N/mm}^2$$

$$E_{p2} = 17458 \quad \text{N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning

$$\epsilon_{pud} = 10,0 \quad \text{‰}$$

Dimensjonerende flytetøyning

$$\epsilon_{pd} = 6,91 \quad \text{‰}$$

Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon'_{p0} = 6,30 \quad \text{‰}$$

Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = 500$  antall lameller

Ytre aksialkraft

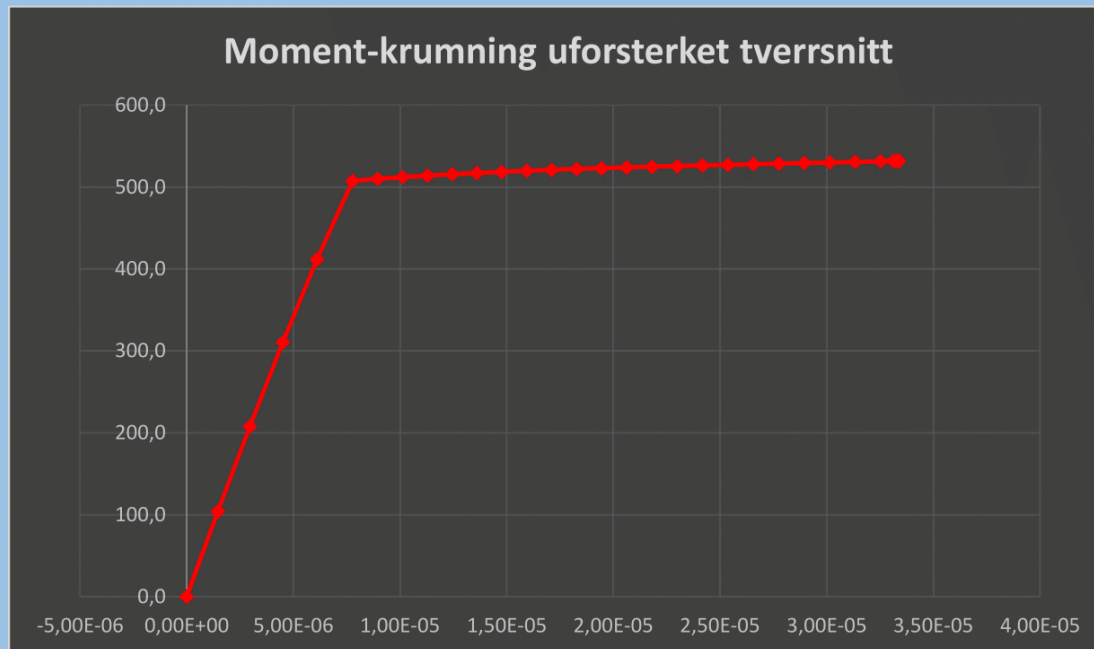
$$P = \quad \text{kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	<b>532,0</b>	kNm
Krumning	3,339E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	13,36	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	12,02	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$$M_0 = 0 \text{ [kNm]}$$

Minimum verdi: 0,0 [kNm]

Maksimal verdi: 532,0 [kNm]

**Karbonfiber**

$$V_{fm} = 1,2$$

Tykkelse laminat

$$t_f = 1,4 \text{ mm}$$

Bredde laminat

$$b_f = 100 \text{ mm}$$

Antall lag

$$n_f = 2 \text{ stk}$$

Areal

$$A_f = 280 \text{ mm}^2$$

$$E_f = 160000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{fk} = 15,0 \text{ ‰}$$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$$\varepsilon_{fd} = 5,00 \text{ ‰}$$

## Vedlegg C

### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = 0,0000 \%$$

Tøyning i underkant betong ved påføring av karbonfiberforsterkning.

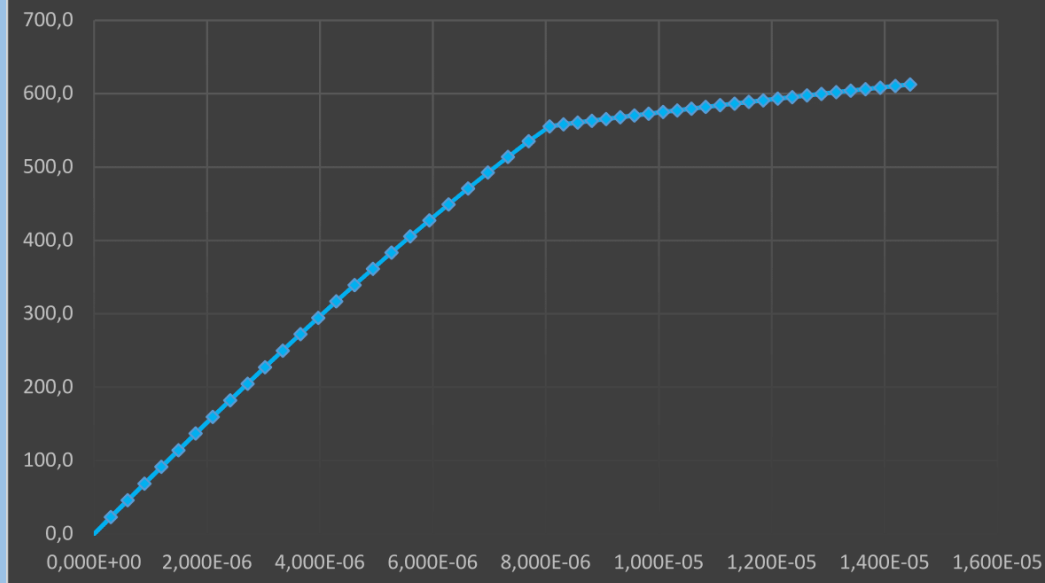
### Kapasitet

	ULS
Moment	612,6
Krumning	1,445E-05

### SLS kar.

SLS kar.	SLS TP
0,0	0,0

### Moment-krumning forsterket tverrsnitt



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	5,00	%	Underkant betong		
$\epsilon_{c,ok}$	-2,30	%	Overkant betong		Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag1}$	4,42	%	Strekkarmering, lag1	Flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%	Trykkarmering, lag1	-	-
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1	-	-
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2	-	-
$\epsilon_f$	5,00	%	Karbonforsterkning		Brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med: **80,6** kNm

# Kontroll av strekkarmert T-tverrsnitt med CFRP-forsterkning

## Materialegenskaper

$$f_{ck} := 35\text{MPa} \quad \alpha_{cc} := 0.85 \quad \gamma_c := 1.5 \quad f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.8\text{MPa}$$

$$f_{yk} := 500\text{MPa} \quad \gamma_s := 1.15 \quad f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.8\text{MPa}$$

$$\epsilon_f := \frac{5}{1000} \quad E_f := 160000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad A_f := 280\text{mm}^2$$

## Tverrsnittsgeometri

$$b_{\text{eff}} := 750\text{mm} \quad h_{\text{flens}} := 105\text{mm} \quad c_{\text{nom}} := 30\text{mm}$$

$$b_{\text{steg}} := 150\text{mm} \quad h_{\text{steg}} := 400\text{mm} \quad \emptyset := 20\text{mm} \quad n := 9$$

$$h_{\text{total}} := h_{\text{flens}} + h_{\text{steg}} = 505\text{mm}$$

$$d := h_{\text{total}} - c_{\text{nom}} - \frac{\emptyset}{2} = 465\text{mm}$$

$$A_s := n \pi \cdot \left(\frac{\emptyset}{2}\right)^2 = 2827.4\text{mm}^2$$

## Forenklet beregning:

### Momentkapasitet uforsterket

$$M_{Rd} := f_{yd} \cdot A_s \cdot \left(d - \frac{h_{\text{flens}}}{2}\right) = 507.1\text{kN}\cdot\text{m}$$

### Momentkapasitet forsterket

$$M_{Rd.f} := f_{yd} \cdot A_s \cdot \left(d - \frac{h_{\text{flens}}}{2}\right) + \epsilon_f \cdot E_f \cdot A_f \cdot \left(h_{\text{total}} - \frac{h_{\text{flens}}}{2}\right) = 608.5\text{kN}\cdot\text{m}$$

### Økning av momentkapasitet med CFRP-forsterkning

$$M_{\Delta} := M_{Rd.f} - M_{Rd} = 101.4\text{kN}\cdot\text{m}$$

## Test 9: T-tverrsnitt – slakkarmering i strekk og CFRP-forsterkning, spenningsbegrensning i bruksgrensetilstand

Test 9 er en sammenligning mellom eksempel basert på teori fra Sørensen (2010) side 52-53 og beregninger i ConLam.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra i de påfølgende sidene. Hensikten med testen er å kontrollere momentkapasiteten i bruksgrensetilstanden, karakteristisk- og tilnærmet permanente laster. I denne testen er det spenningsbegrensningen i slakkarmering som blir utslagsgivende, og her er kravet for karakteristisk- og tilnærmet permanente laster likt;  $0,8 \cdot f_{yk}$ . Grunnen til at betongspenningene ikke sammenlignes er at de ikke er sammenlignbare fordi eksempelet baserer seg på konstant betongtrykkspenning over hele flensen. ConLam kontrollerer spenningen i ytterste lamell, og gir av den grunn betydelig høyere spenning og dertil lavere kapasitet.

### Test 9

	Eksempel	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet SLS forsterket [kNm]	200,3	211,3	+11,0	+5,5

# ConLam

utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

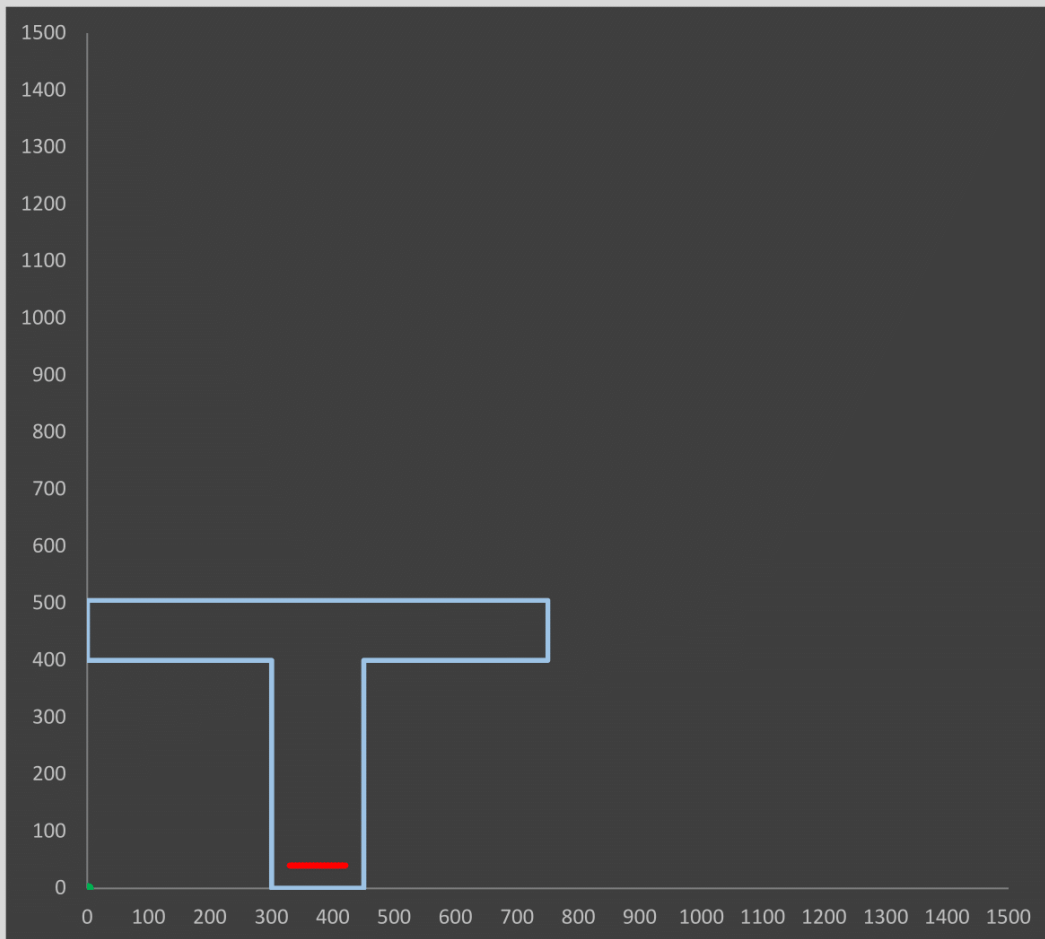
Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

**T**

Fyll inn tverrsnittsmål:

## T-tverrsnitt

Effektiv bredde flens	750	mm
Tykkelse flens, ende	105	mm
Tykkelse flens, midt	105	mm
Bredde steg, bunn	150	mm
Bredde steg, topp	150	mm
Høyde steg	400	mm
Total høyde tverrsnitt	505	mm



## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 30$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} =$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	20	3	942,5	465
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C35/45**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>  
 Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>  
 E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>  
 $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰  
 $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰  
 $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰



## Spennarmering

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$$f_{pk} = \boxed{1700} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = \boxed{1550} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd} = \boxed{1347,8} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = \boxed{1401,7} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = \boxed{195000} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p2} = \boxed{17458} \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning  
 Dimensjonerende flytetøyning  
 Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon_{pud} = \boxed{10,0} \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{pd} = \boxed{6,91} \text{ ‰}$$

$$\epsilon'_{p0} = \boxed{6,30} \text{ ‰}$$

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

## Ytre aksialkraft

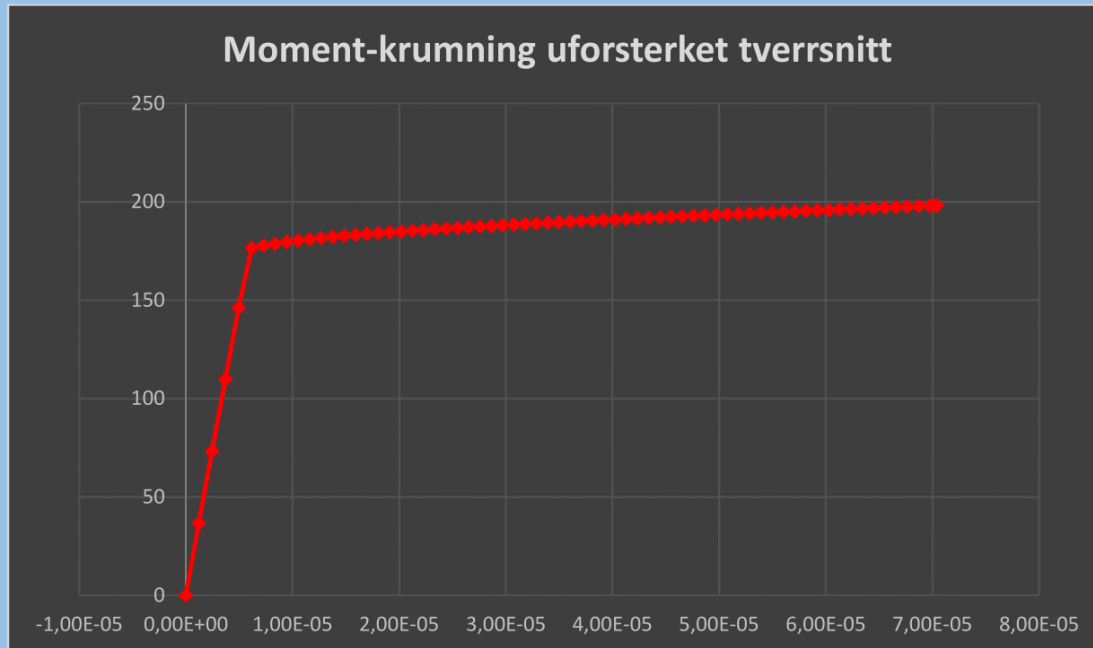
$$P = \boxed{\phantom{00000}} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	198,2	kNm
Krumning	7,043E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	32,81	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-2,76	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	30,00	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Ikke brudd	
Flytning	Brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$M_0 = 0 \text{ [kNm]}$

Minimum verdi: 0,0 [kNm]

Maksimal verdi: 198,2 [kNm]

**Karbonfiber**

$\gamma_{fm} = 1,2$

Tykkelse laminat

$t_f = 1,4 \text{ mm}$

Bredde laminat

$b_f = 100 \text{ mm}$

Antall lag

$n_f = 2 \text{ stk}$

Areal

$A_f = 280 \text{ mm}^2$

$E_f = 160000 \text{ N/mm}^2$

$\epsilon_{fk} = 15,1 \text{ ‰}$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$\epsilon_{fd} = 5,00 \text{ ‰}$

## Vedlegg C

### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = 0,0000 \text{ ‰}$$

Tøyning i underkant betong ved påføring av karbonfiberforsterkning.

### Kapasitet

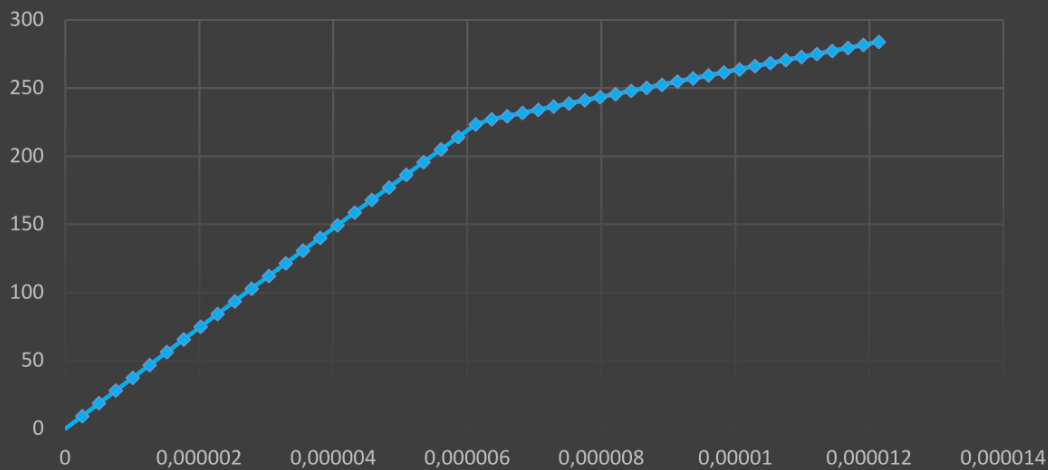
	ULS	
Moment	284,0	kNm
Krumning	1,214E-05	

### SLS kar.

### SLS TP

	SLS kar.	SLS TP	
Moment	211,3	211,3	kNm
Krumning	5,279E-06	5,279E-06	
Armeringstøyning	2,00	2,00	‰
Armeringsspenning	400,0	400,0	N/mm <sup>2</sup>
Betongspenning	-14,05	-14,05	N/mm <sup>2</sup>

### Moment-krumning forsterket tverrsnitt



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	5,00	‰	Underkant betong	
$\epsilon_{c,ok}$	-1,13	‰	Overkant betong	Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag1}$	4,51	‰	Strekkarmering, lag1	Flytning
$\epsilon_{s,lag2}$	-	‰	Strekkarmering, lag2	-
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-	‰	Trykkarmering, lag1	-
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4	-
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1	-
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2	-
$\epsilon_f$	5,00	‰	Karbonforsterkning	Brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med: **85,7** kNm

## Kontroll av slakkarmert T-tverrsnitt med CFRP-forsterkning - Spenningsbegrensning i bruksgrensetilstand

### Materialegenskaper

$$f_{ck} := 35\text{MPa} \quad \alpha_{cc} := 0.85 \quad \gamma_c := 1.5 \quad f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 19.8 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{yk} := 500\text{MPa} \quad \gamma_s := 1.15 \quad f_y := 0.8 \cdot f_{yk} = 400 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\epsilon_f := \frac{2.211}{1000} \quad \text{Fra ConLam} \quad E_f := 160000 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad A_f := 280 \cdot \text{mm}^2$$

### Tverrsnittsgeometri

$$b_{\text{eff}} := 750\text{mm} \quad h_{\text{flens}} := 105\text{mm} \quad c_{\text{nom}} := 30\text{mm}$$

$$b_{\text{steg}} := 150\text{mm} \quad h_{\text{steg}} := 400\text{mm} \quad \emptyset := 20\text{mm} \quad n := 3$$

$$h_{\text{total}} := h_{\text{flens}} + h_{\text{steg}} = 505\text{mm}$$

$$d := h_{\text{total}} - c_{\text{nom}} - \frac{\emptyset}{2} = 465\text{mm}$$

$$A_s := n \pi \cdot \left( \frac{\emptyset}{2} \right)^2 = 942.5\text{mm}^2$$

### Forenklet beregning:

#### Momentkapasitet forsterket, SLS

$$M_{\text{Rd.f}} := f_y \cdot A_s \cdot \left( d - \frac{h_{\text{flens}}}{2} \right) + \epsilon_f \cdot E_f \cdot A_f \cdot \left( h_{\text{total}} - \frac{h_{\text{flens}}}{2} \right) = 200.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

## Test 10: Bøystivhet for CFRP-forsterket tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk

Håndberegninger for test 10 er basert på teori hentet fra Sørensen (2010) side 137 – 140.

Materialdata og geometri for de testede tverrsnittene er presentert i rapport fra ConLam i de påfølgende sidene.

### Test 10

	Håndberegning Mathcad	ConLam	Avvik	Avvik i %
Bøystivhet for rektangulært tverrsnitt [Nmm <sup>2</sup> ]	$3,625 \cdot 10^{13}$	$3,639 \cdot 10^{13}$	$+0,014 \cdot 10^{13}$	+0,4
Bøystivhet for T-tverrsnitt [Nmm <sup>2</sup> ]	$6,991 \cdot 10^{13}$	$7,008 \cdot 10^{13}$	$+0,017 \cdot 10^{13}$	+0,2

Test 10-1: Rektangulært tverrsnitt

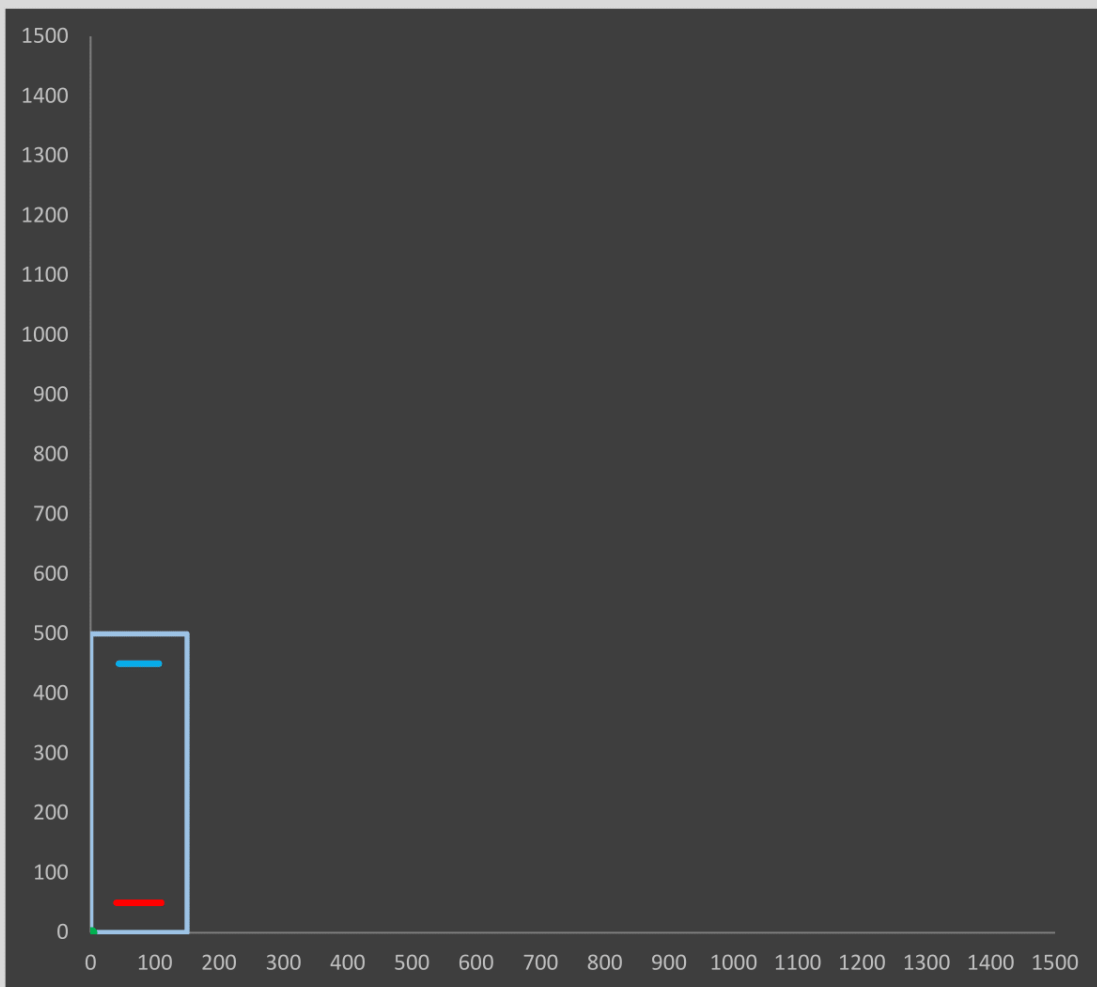
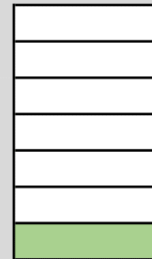
**ConLam**  
utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde  mm  
Høyde  mm



## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 40$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} = 44$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	20	4	1256,6	450
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	12	2	226,2	50
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C40/50**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 40,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 22,7$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 48,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 35000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 35000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰



## Spennarmering

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$f_{pk} =$	<input type="text" value="1700"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{p0,1k} =$	<input type="text" value="1550"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd} =$	<input type="text" value="1347,8"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s =$	<input type="text" value="1401,7"/>	N/mm <sup>2</sup>

$E_{p1} =$	<input type="text" value="195000"/>	N/mm <sup>2</sup>
$E_{p2} =$	<input type="text" value="17458"/>	N/mm <sup>2</sup>

Dimensjonerende brudtøyning

$\epsilon_{pud} =$	<input type="text" value="10,0"/>	%
--------------------	-----------------------------------	---

Dimensjonerende flytetøyning

$\epsilon_{pd} =$	<input type="text" value="6,91"/>	%
-------------------	-----------------------------------	---

Oppspenningstøyning inkl. tap

$\epsilon'_{p0} =$	<input type="text" value="6,30"/>	%
--------------------	-----------------------------------	---

Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

Ytre aksialkraft

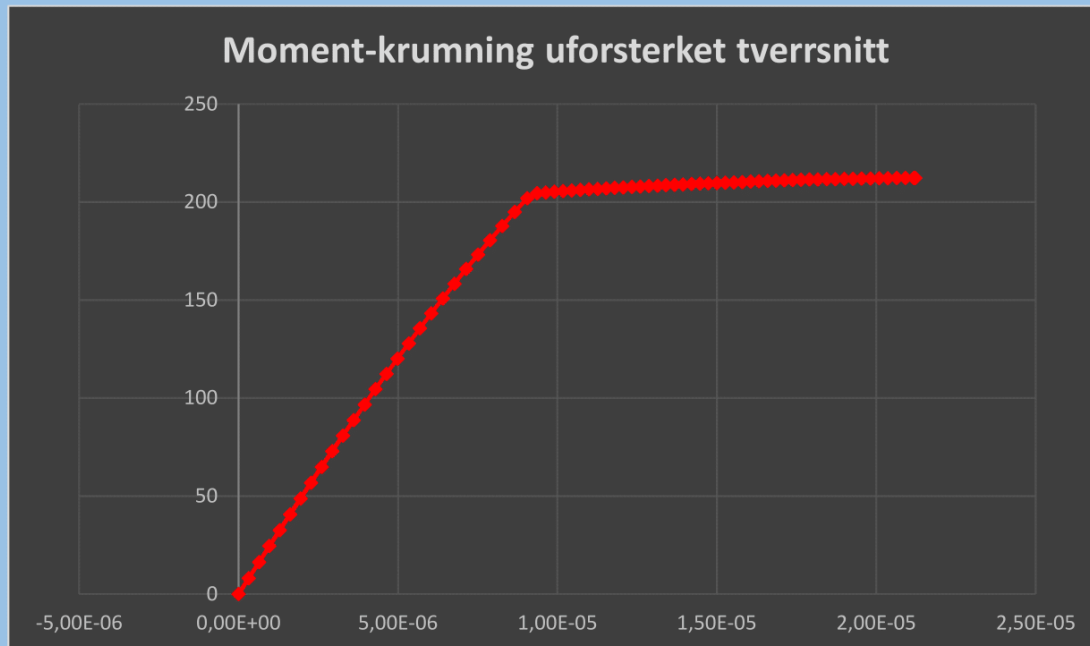
$P = \boxed{\phantom{0000}}$  kN

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	212,4	kNm
Krumning	2,122E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	7,11	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	6,05	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-2,44	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-

**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$M_0 = 0 \text{ [kNm]}$

Minimum verdi: 0,0 [kNm]

Maksimal verdi: 212,4 [kNm]

**Karbonfiber**

$V_{fm} = 1,2$

Tykkelse laminat

$t_f = 1,4 \text{ mm}$

Bredde laminat

$b_f = 100 \text{ mm}$

Antall lag

$n_f = 3 \text{ stk}$

Areal

$A_f = 420 \text{ mm}^2$

$E_f = 165000 \text{ N/mm}^2$

$\epsilon_{fk} = 15,1 \text{ ‰}$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$\epsilon_{fd} = 8,50 \text{ ‰}$

## Vedlegg C

### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = 0,0000 \%$$

Tøyning i underkant betong ved påføring av karbonfiberforsterkning.

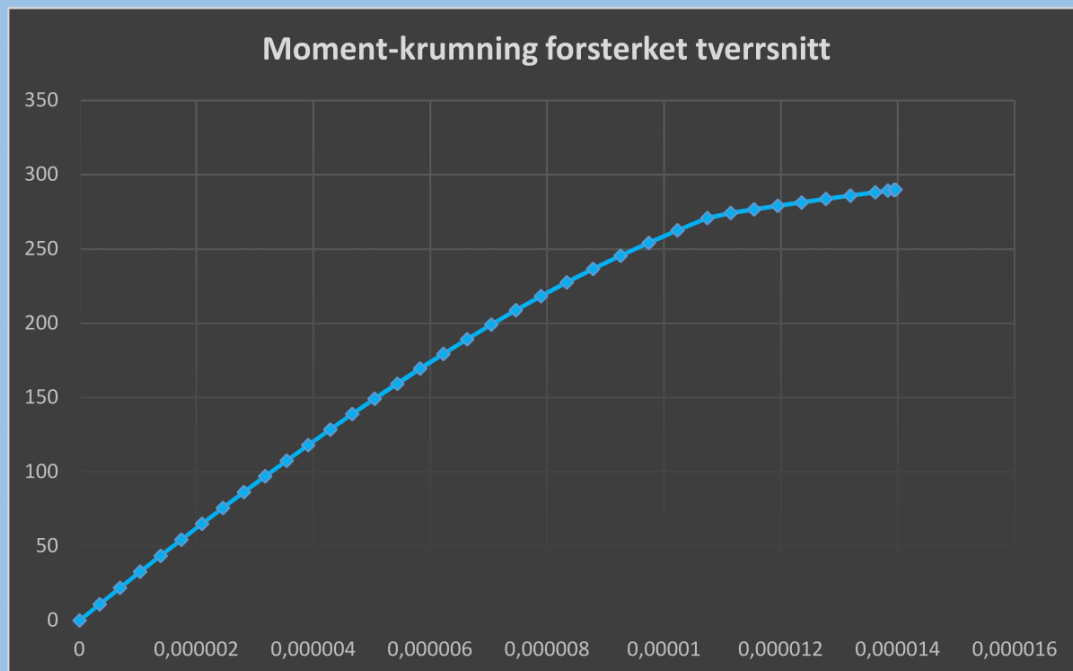
### Kapasitet

	ULS
Moment	290,0
Krumning	1,396E-05

### SLS kar.

0,0	0,0

### SLS TP



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	3,48	%	Underkant betong	
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong	
$\epsilon_{s,lag1}$	2,78	%	Strekkarmering, lag1	
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2	
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3	
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4	
$\epsilon_{st,lag1}$	-2,80	%	Trykkarmering, lag1	
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2	
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3	
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4	
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1	
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2	
$\epsilon_f$	3,48	%	Karbonforsterkning	

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
	Ikke brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med: **77,6** kNm

**Bøyestivhet**

$$M_{EI} = 0,1 \text{ kNm}$$

Minimumsverdi: 0,1 kNm

Maksimal verdi: 139,0 kNm

**Bøyestivhet**

$$EI = 3,639E+13 \text{ Nmm}^2$$

## Kontroll av bøyestivhet for CFRP-forsterket rektangulært tverrsnitt med strekk- og trykkarmering

### Material

Betong: C40/50

Armering: B500NC

Karbonfiber

 $E_{cm} := 35000\text{MPa}$  $E_s := 200000\text{MPa}$  $E_{cfrp} := 165000\text{MPa}$ 

### Tverrsnitt og geometri

 $b_f := 0\text{mm}$  $t := 100\text{mm}$  $h := 500\text{mm}$  $b := 150\text{mm}$  $d := 450\text{mm}$  $d_t := 50\text{mm}$ 

### Strekkarmering

 $n := 4$  $r := 10\text{mm}$  $A_s := \pi \cdot r^2 \cdot n$ 

### Trykkarmering

 $n_t := 2$  $r_t := 6\text{mm}$  $A_{st} := \pi \cdot r_t^2 \cdot n_t$ 

### Karbonfiber

 $n_{cfrp} := 3$  $t_{cfrp} := 1.4\text{mm}$  $b_{cfrp} := 100\text{mm}$  $A_{cfrp} := n_{cfrp} \cdot t_{cfrp} \cdot b_{cfrp}$ 

### Trykksonehøyde

 $\alpha := 0.5 \quad \kappa := 3.123 \cdot 10^{-7} \text{mm}^{-1}$ 

### Given

$$\left[ \frac{1}{2} \cdot E_{cm} \cdot (\kappa \cdot \alpha \cdot d) \cdot \alpha \cdot d \cdot b \right] + \left[ \frac{1}{2} \cdot E_{cm} \cdot [\kappa \cdot (\alpha \cdot d - t)] + (\kappa \cdot \alpha \cdot d) \right] \cdot t \cdot b_f \dots = 0$$

$$+ \left[ E_s \cdot [\kappa \cdot (\alpha \cdot d - d_t)] \cdot A_{st} \right] - \left[ E_{cm} \cdot [\kappa \cdot (\alpha \cdot d - d_t)] \cdot A_{st} \right] - \left[ E_s \cdot [\kappa \cdot (1 - \alpha) \cdot d] \cdot A_s \right] \dots$$

$$+ \left[ E_{cfrp} \cdot [\kappa \cdot (h - \alpha \cdot d)] \cdot A_{cfrp} \right]$$

 $\alpha := \text{Find}(\alpha) = 0.4$  $\alpha \cdot d = 180.102 \cdot \text{mm}$

**Bøyestivhet**

$$I_{\beta\beta} := \frac{b \cdot (\alpha \cdot d)^3}{12} + \left[ b \cdot \alpha \cdot d \cdot \left( \frac{\alpha \cdot d}{2} \right)^2 \right] + \frac{b_f \cdot t^3}{12} + \left[ b_f \cdot t \cdot \left( \alpha \cdot d - \frac{t}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_s := A_s \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot d^2$$

$$I_{st} := A_{st} \cdot (\alpha \cdot d - d_t)^2 - \frac{E_{cm}}{E_s} \cdot A_{st} \cdot (\alpha \cdot d - d_t)^2$$

$$I_{cfrp} := A_{cfrp} \cdot (h - \alpha \cdot d)^2$$

$$EI := E_{cm} \cdot I_{\beta\beta} + E_s \cdot (I_s + I_{st}) + E_{cfrp} \cdot I_{cfrp} = 3.625 \times 10^{13} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

Test 10-2: T-tverrsnitt

# ConLam

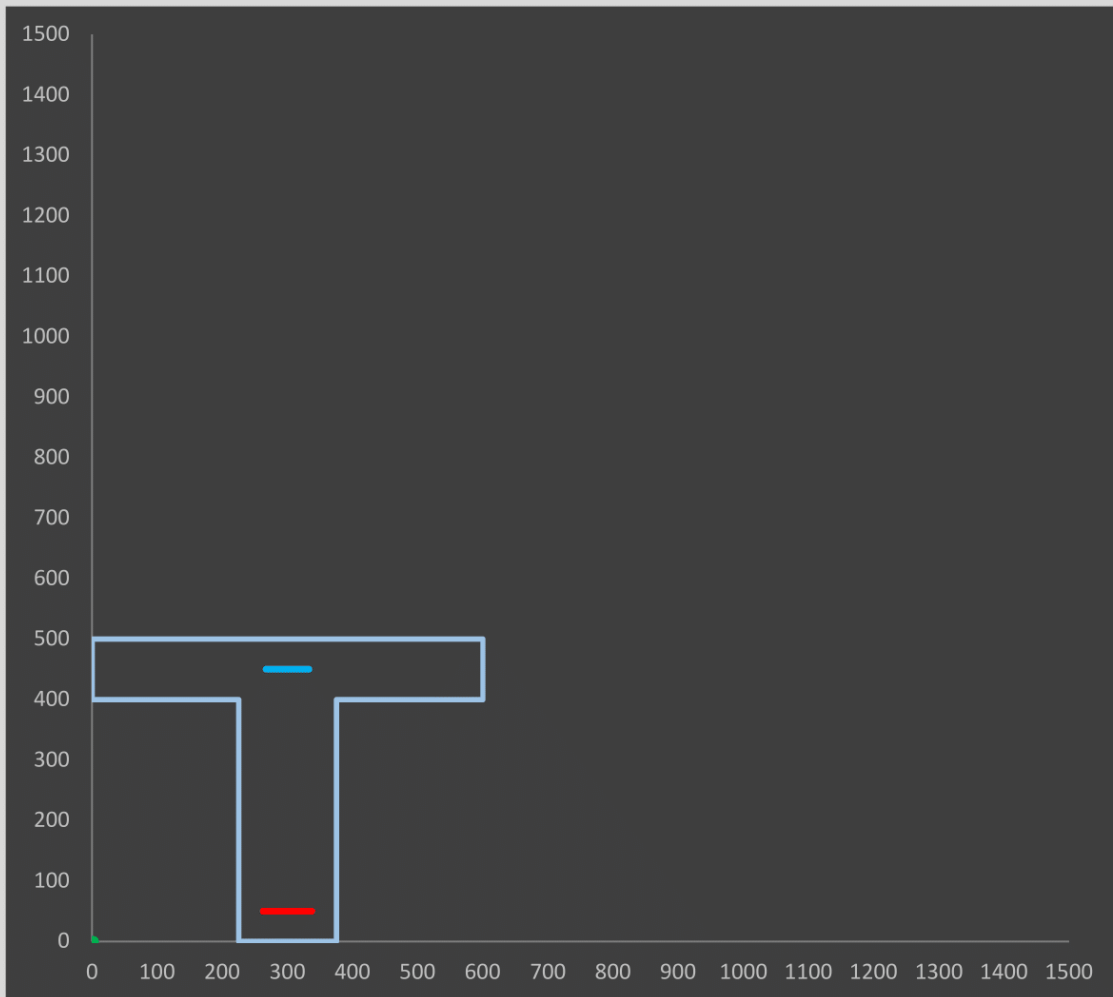
utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt):

T

Fyll inn tverrsnittsmål:

T-tverrsnitt	
Effektiv bredde flens	600 mm
Tykkelse flens, ende	100 mm
Tykkelse flens, midt	100 mm
Bredde steg, bunn	150 mm
Bredde steg, topp	150 mm
Høyde steg	400 mm
Total høyde tverrsnitt	500 mm





Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 37,5$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} = 42$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

## Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	25	4	1963,5	450
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	16	4	804,2	50
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

## Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

## Betong

Kvalitet **C20/25** $\gamma_c = 1,5$  $\alpha_{cc} = 0,85$  $f_{ck} = 20,0$  N/mm<sup>2</sup> $f_{cd} = 11,3$  N/mm<sup>2</sup> $f_{cm} = 28,0$  N/mm<sup>2</sup> $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰ $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰ $E_{cm} = 30000$  N/mm<sup>2</sup>Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 30000$  N/mm<sup>2</sup>

## Armeringsstål

 $\gamma_s = 1,15$  $f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup> $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup> $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup> $E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup> $E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup> $\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰ $\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰ $\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Vedlegg C

### Spennarmering

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$$f_{pk} = \boxed{1700} \text{ N/mm}^2$$
$$f_{p0,1k} = \boxed{1550} \text{ N/mm}^2$$
$$f_{pd} = \boxed{1347,8} \text{ N/mm}^2$$
$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = \boxed{1401,7} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = \boxed{195000} \text{ N/mm}^2$$
$$E_{p2} = \boxed{17458} \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning  
Dimensjonerende flytetøyning  
Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon_{pud} = \boxed{10,0} \text{ ‰}$$
$$\epsilon_{pd} = \boxed{6,91} \text{ ‰}$$
$$\epsilon'_{p0} = \boxed{6,30} \text{ ‰}$$

### Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

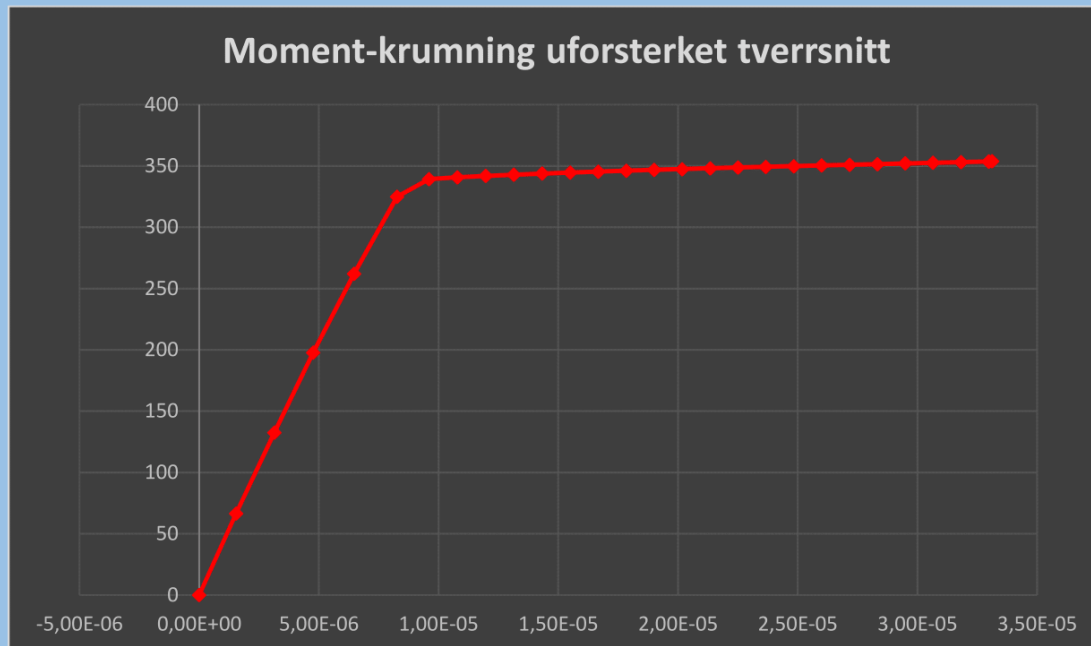
### Ytre aksialkraft

$$P = \boxed{\phantom{00000}} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

**Kapasitet ULS, uforsterket**

Moment	353,8	kNm
Krumning	3,312E-05	



**Tøyninger**

$\epsilon_{c,uk}$	13,06	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	11,41	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-1,84	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Ikke flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-

## Vedlegg C

### Initialtilstand

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$M_0 =$   [kNm]

Minimum verdi: 0,0 [kNm]

Maksimal verdi: 353,8 [kNm]

### Karbonfiber

$\gamma_{fm} =$

Tykkelse laminat

$t_f =$   mm

Bredde laminat

$b_f =$   mm

Antall lag

$n_f =$   stk

Areal

$A_f =$   mm<sup>2</sup>

$E_f =$   N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{fk} =$   ‰

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$\epsilon_{fd} =$   ‰

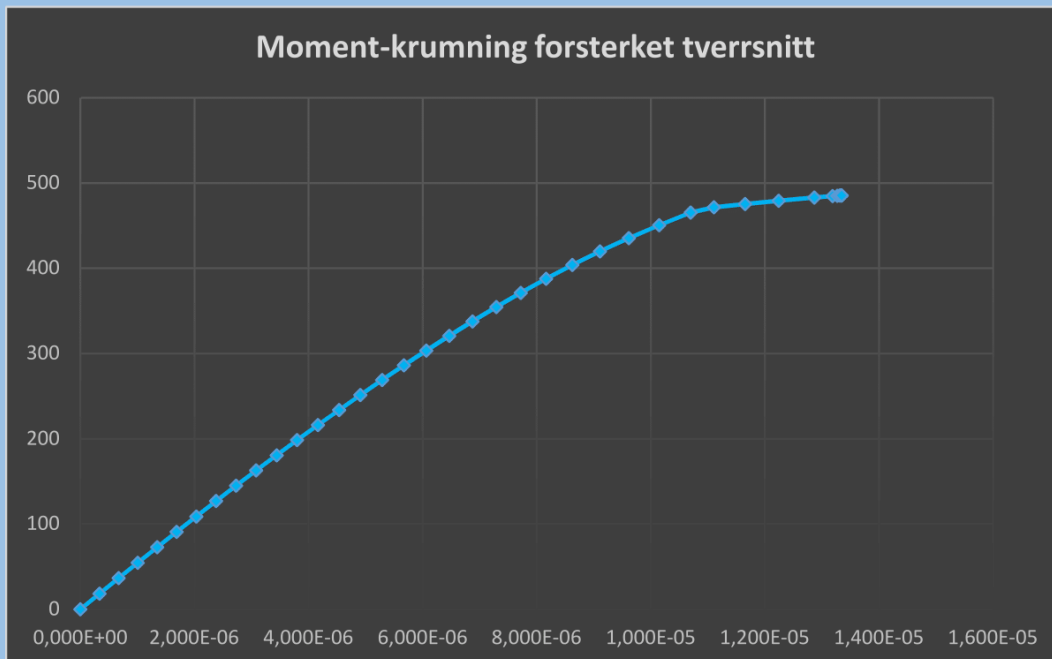
**Initialtøyning**

$\epsilon_{uk,initial} = 0,0000$  ‰

Tøyning i underkant betong ved påføring av karbonfiberforsterkning.

Kapasitet	ULS
Moment	485,5
Krumning	1,335E-05

SLS kar.	SLS TP
0,0	0,0



**Tøyninger**

$\epsilon_{c,uk}$	3,17	‰	Underkant betong	
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	‰	Overkant betong	
$\epsilon_{s,lag1}$	2,51	‰	Strekkarmering, lag1	
$\epsilon_{s,lag2}$	-	‰	Strekkarmering, lag2	
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3	
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4	
$\epsilon_{st,lag1}$	-2,83	‰	Trykkarmering, lag1	
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2	
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3	
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4	
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1	
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2	
$\epsilon_f$	3,17	‰	Karbonforsterkning	

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
	Ikke brudd

\*Negativ verdi er stukning

**Konklusjon**

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med: **131,7** kNm

## Vedlegg C

### Bøyestivhet

$$M_{EI} = 0,1 \text{ kNm}$$

Minimumsverdi: 0,1 kNm

Maksimal verdi: 209,8 kNm

### Bøyestivhet

$$EI = 7,008E+13 \text{ Nmm}^2$$

## Kontroll av bøyestivhet for CFRP-forsterket T-tverrsnitt med strekk- og trykkarmering

### Material

Betong: C20/25

Armering: B500NC

Karbonfiber

 $E_{cm} := 30000\text{MPa}$  $E_s := 200000\text{MPa}$  $E_{cfrp} := 165000\text{MPa}$ 

### Tverrsnitt og geometri

 $b_f := 450\text{mm}$  $t := 100\text{mm}$  $h := 500\text{mm}$  $b := 150\text{mm}$  $d := 450\text{mm}$  $d_t := 50\text{mm}$ 

### Strekkarmering

 $n := 4$  $r := 12.5\text{mm}$  $A_s := \pi \cdot r^2 \cdot n$ 

### Trykkarmering

 $n_t := 4$  $r_t := 8\text{mm}$  $A_{st} := \pi \cdot r_t^2 \cdot n_t$ 

### Karbonfiber

 $n_{cfrp} := 5$  $t_{cfrp} := 1.4\text{mm}$  $b_{cfrp} := 100\text{mm}$  $A_{cfrp} := n_{cfrp} \cdot t_{cfrp} \cdot b_{cfrp}$ 

### Trykksonehøyde

 $\alpha := 0.5 \quad \kappa := 2.73 \cdot 10^{-7} \text{mm}^{-1}$ 

### Given

$$\left[ \frac{1}{2} \cdot E_{cm} \cdot (\kappa \cdot \alpha \cdot d) \cdot \alpha \cdot d \cdot b \right] + \left[ \frac{1}{2} \cdot E_{cm} \cdot [(\kappa \cdot (\alpha \cdot d - t)) + (\kappa \cdot \alpha \cdot d)] \cdot t \cdot b_f \right] \dots = 0$$

$$+ \left[ E_s \cdot [\kappa \cdot (\alpha \cdot d - d_t)] \cdot A_{st} \right] - \left[ E_{cm} \cdot [\kappa \cdot (\alpha \cdot d - d_t)] \cdot A_{st} \right] - \left[ E_s \cdot [\kappa \cdot (1 - \alpha) \cdot d] \cdot A_s \right] \dots$$

$$+ \left[ E_{cfrp} \cdot [\kappa \cdot (h - \alpha \cdot d)] \cdot A_{cfrp} \right]$$

 $\alpha := \text{Find}(\alpha) = 0.2987$  $\alpha \cdot d = 134.41566 \cdot \text{mm}$

**Bøyestivhet**

$$I_{\beta\beta} := \frac{b \cdot (\alpha \cdot d)^3}{12} + \left[ b \cdot \alpha \cdot d \cdot \left( \frac{\alpha \cdot d}{2} \right)^2 \right] + \frac{b_f \cdot t^3}{12} + \left[ b_f \cdot t \cdot \left( \alpha \cdot d - \frac{t}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_s := A_s \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot d^2$$

$$I_{st} := A_{st} \cdot (\alpha \cdot d - d_t)^2 - \frac{E_{cm}}{E_s} \cdot A_{st} \cdot (\alpha \cdot d - d_t)^2$$

$$I_{cfrp} := A_{cfrp} \cdot (h - \alpha \cdot d)^2$$

$$EI := E_{cm} \cdot I_{\beta\beta} + E_s \cdot (I_s + I_{st}) + E_{cfrp} \cdot I_{cfrp} = 6.991 \times 10^{13} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$



## Test 11: Sika Carbodur beregningsprogram versus ConLam

Denne testen er en kontroll opp mot beregninger utført med Sika Carbodur beregningsprogram. Det er utført 6 ulike deltester med forsterkning:

Test 11-1: Kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk.

Test 11-2: Kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.

Test 11-3: Kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk.

Test 11-4: Kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.

Test 11-5: Kapasitetsberegning i SLS (T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk).

Test 11-6: Kapasitetsberegning i ULS, dekkestripe med slakkarmering i strekk og trykk.

### Test 11-1: Kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk.

	Sika	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	465,14	467,42	+2,28	+0,5
Momentkapasitet forsterket [kNm]	610,65	609,85	-0,80	-0,1
Tøyning i betong [‰]	3,50	3,50	0,00	0,0
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	2,81	2,80	-0,01	-0,4
Tøyning i strekkarmering lag 2 [‰]	2,12	2,12	0,00	0,0
Tøyning i CFRP-forsterkning [‰]	3,12	3,11	-0,01	-0,3

**Test 11-2: Kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.**

	Sika	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	495,57	500,93	+5,36	+1,1
Momentkapasitet forsterket [kNm]	602,59	603,60	+1,01	+0,2
Tøyning i betong [‰]	3,50	3,50	0,00	0,0
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	5,16	5,09	-0,07	-1,4
Tøyning i strekkarmering lag 2 [‰]	4,21	4,15	-0,06	-1,4
Tøyning i trykkarmering lag 1 [‰]	2,73	2,72	-0,01	-0,4
Tøyning i CFRP-forsterkning [‰]	5,69	5,61	-0,08	-1,4

**Test 11-3: Kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk.**

	Sika	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	1068,48	1110,61	+42,13	+3,9
Momentkapasitet forsterket [kNm]	1453,00	1466,58	+13,58	+0,9
Tøyning i betong [‰]	2,35	2,39	+0,04	+1,7
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	7,75	7,75	0,00	0,0
Tøyning i strekkarmering lag 2 [‰]	6,88	6,88	0,00	0,0
Tøyning i CFRP-forsterkning [‰]	8,00	8,00	0,00	0,0

**Test 11-4: Kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.**

	Sika	ConLam	Avvik	Avvik i %
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	502,12	521,12	+19,00	+3,8
Momentkapasitet forsterket [kNm]	762,81	768,88	+6,07	+0,8
Tøyning i betong [‰]	2,83	2,88	+0,05	+1,8
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	7,40	7,39	-0,01	-0,1
Tøyning i strekkarmering lag 2 [‰]	5,80	5,80	0,00	0,0
Tøyning i trykkarmering lag 1 [‰]	1,87	1,89	+0,02	+1,1
Tøyning i CFRP-forsterkning [‰]	8,00	8,00	0,00	0,0

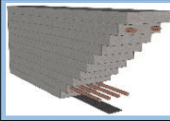
**Test 11-5: Kapasitetsberegning i SLS (T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk).**

	Sika	ConLam	Avvik	Avvik i %
<b>SLS, karakteristisk</b>				
Momentkapasitet forsterket [kNm]	455,55	453,88	-1,67	-0,4
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	1,88	1,87	-0,01	-0,5
Spenning i strekkarmering lag 1 [MPa]	375,42	374,13	-1,29	-0,3
Betongspenning [MPa]	15,00	15,00	0,00	0,0
<b>SLS, tilnærmet permanent</b>				
Momentkapasitet, forsterket [kNm]	474,91	325,56	-149,35	-31,4
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	2,00	1,36	-0,64	-32,0
Spenning i strekkarmering lag 1 [MPa]	399,98	271,87	-128,11	-32,0
Betongspenning [MPa]	10,55	11,25	+0,70	+6,6

**Test 11-6: Kapasitetsberegning i ULS, dekkestripe med slakkarmering i strekk og trykk.**

	<b>Sika</b>	<b>ConLam</b>	<b>Avvik</b>	<b>Avvik i %</b>
Momentkapasitet uforsterket [kNm]	100,38	103,27	+2,89	+2,9
Momentkapasitet forsterket [kNm]	150,19	151,24	+1,05	+0,7
Tøyning i betong [‰]	2,27	2,30	+0,03	+1,3
Tøyning i strekkarmering lag 1 [‰]	6,61	6,61	0,00	0,0
Tøyning i trykkarmering lag 1 [‰]	0,26	0,27	+0,01	+3,8
Tøyning i CFRP-forsterkning [‰]	8,00	8,00	0,00	0,0

**Test 11-1: Kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk.**



## ConLam

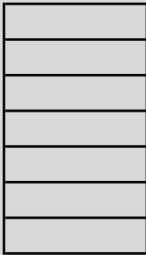
Utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

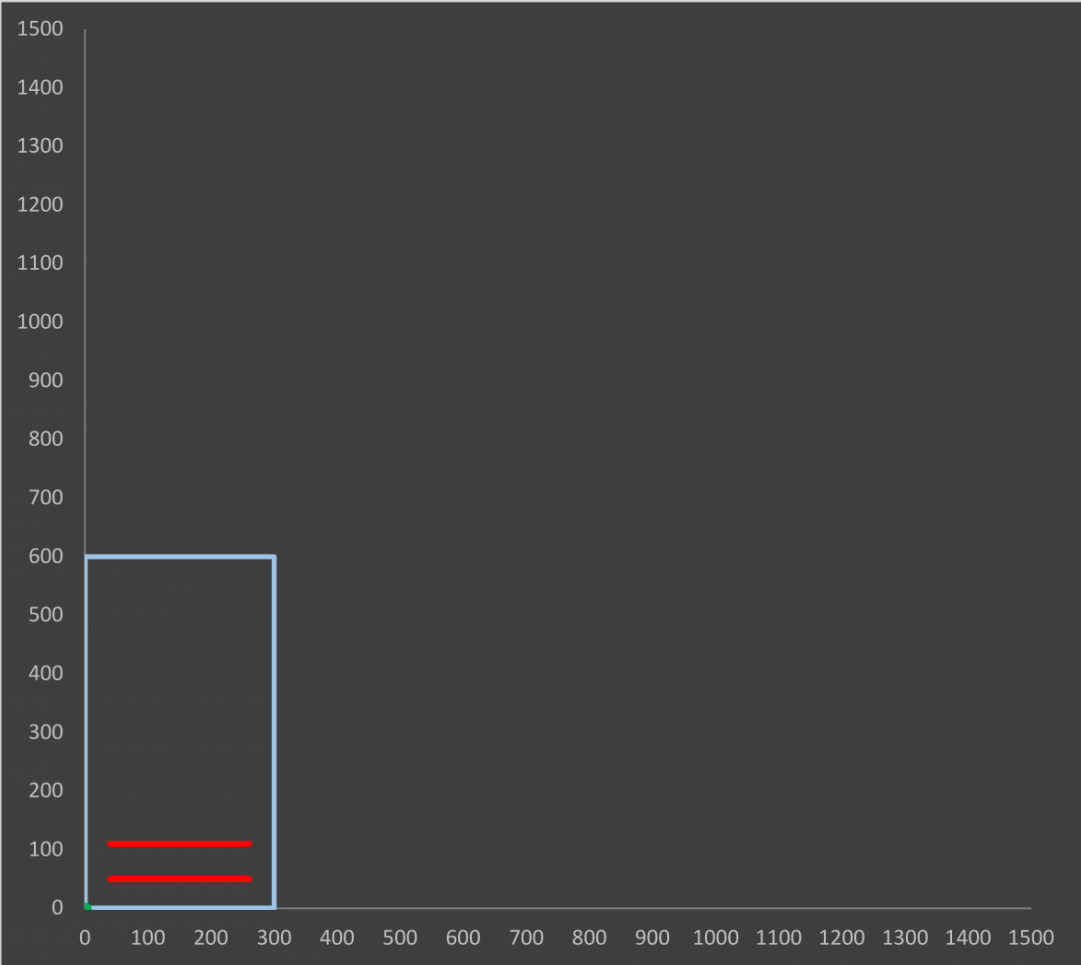
Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	300	mm
Høyde	600	mm





## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 40$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} = 32$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} = 40$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	20	4	1256,6	550
Lag 2	20	4	1256,6	490
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C35/45**

$\gamma_c = 1,5$

$\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰

$\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Spennstål

$$V_s = \boxed{1,15}$$

$$f_{pk} = \boxed{1700} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = \boxed{1550} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd} = \boxed{1347,8} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / V_s = \boxed{1401,7} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = \boxed{195000} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p2} = \boxed{17458} \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning  
 Dimensjonerende flytetøyning  
 Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon_{pud} = \boxed{10,0} \text{ ‰}$$

$$\epsilon_{pd} = \boxed{6,91} \text{ ‰}$$

$$\epsilon'_{p0} = \boxed{6,30} \text{ ‰}$$

**Lamellinndeling** av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

**Ytre aksialkraft**

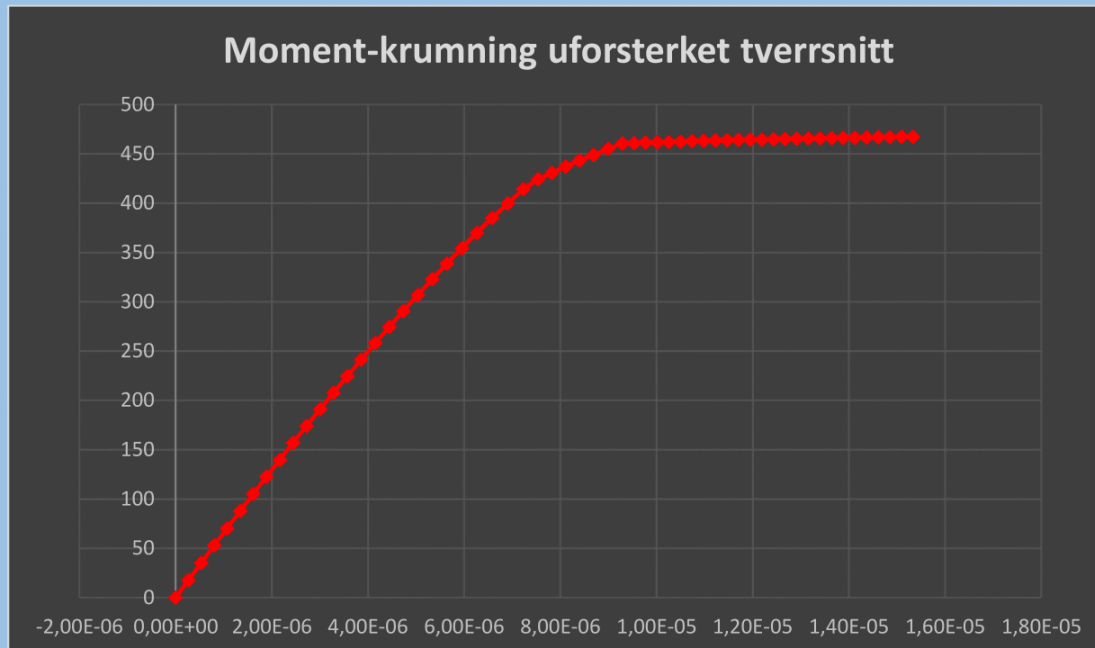
$$P = \boxed{\phantom{00000}} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	<b>467,42</b>	kNm
Krumning	1,533E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	5,70	%o	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%o	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	4,93	%o	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	4,01	%o	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%o	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%o	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%o	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%o	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%o	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%o	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%o	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%o	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-



**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$M_0 = 50,0 \text{ kNm}$

Minimumsverdi: 0,0 kNm

Maksimal verdi: 467,4 kNm

**Forsterkningsmateriale**

$\gamma_{fm} = 1,2$

Tykkelse laminat

$t_f = 1,4 \text{ mm}$

Bredde laminat

$b_f = 100 \text{ mm}$

Antall lag

$n_f = 5 \text{ stk}$

Areal

$A_f = 700 \text{ mm}^2$

$E_f = 180000 \text{ N/mm}^2$

$\varepsilon_{fk} = 12,0 \text{ ‰}$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$\varepsilon_{fd} = 8,00 \text{ ‰}$

## Vedlegg C

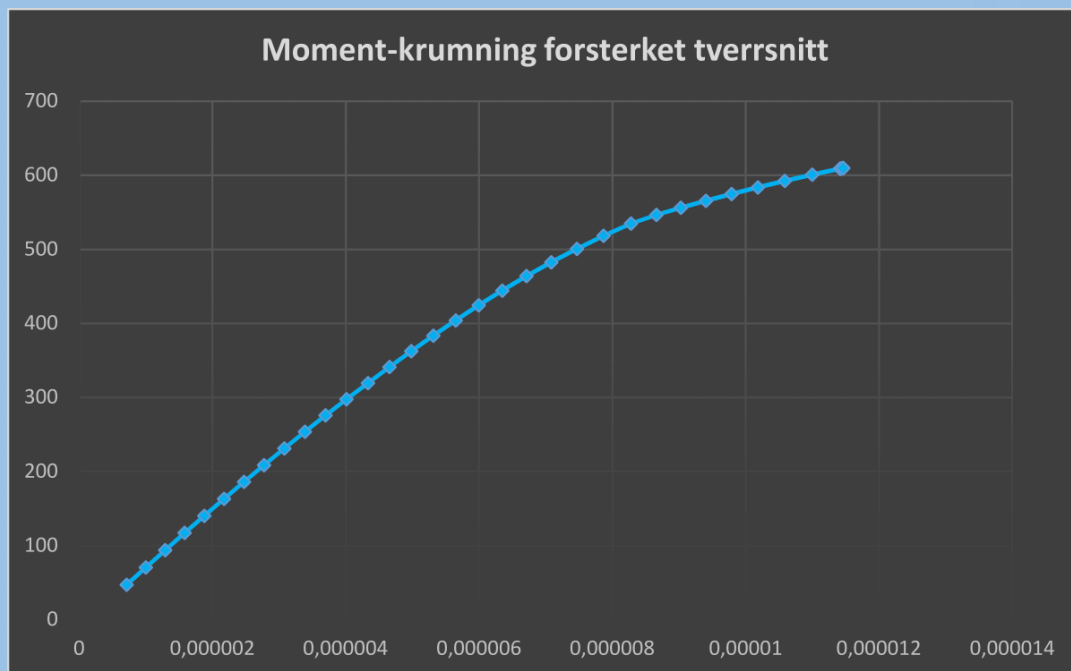
### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = 0,2663 \text{ ‰}$$

Tøyning i underkant betong ved påføring av utenpåliggende forsterkning.

### Forsterket

Kapasitet	ULS		SLS kar.	SLS TP	
Moment	609,85	kNm	0,0	0,0	kNm
Krumning	1,146E-05				



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	3,38	‰	Underkant betong	
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	‰	Overkant betong	Brudd
$\epsilon_{s,lag1}$	2,80	‰	Strekkarmering, lag1	Flytning
$\epsilon_{s,lag2}$	2,12	‰	Strekkarmering, lag2	Ikke flytning
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-	‰	Trykkarmering, lag1	-
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4	-
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1	-
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2	-
$\epsilon_f$	3,11	‰	Forsterkningsmateriale	Ikke brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med i ULS: **142,4** kNm  
 Forsterkningsgrad: **1,30**

# SIKA® CARBODUR® BEREGNINGS PROGRAMVARE

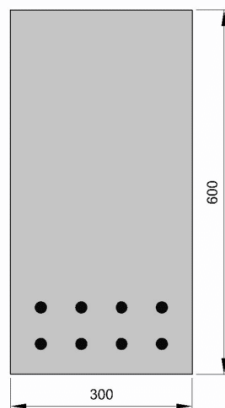
PROSJEKT: MASTEROPPGAVE

ELEMENT: TEST 11-1

## 1 TVERRSNITT OG BETONG

### 1.1 GEOMETRI

Tverrsnitt	Rektangel		
Bredde	b	=	300 mm
Høyde	h	=	600 mm



### 1.2 BETONG

Betongkvalitet	C35/45		
Middelverdi av betongens trykkfasthet	$f_{cm}$	=	43 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_c$	=	1,50

## Vedlegg C

### 2 ARMERING

#### 2.1 ARMERINGSTÅL

E- modul	$E_s$	=	200000 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_s$	=	1,15

#### 2.2 FORSTERKNINGS LAG

Bunnlaget	$d_1$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	50 mm	B500	500 MPa		4 $\times$ 20 mm
2.	110 mm	B500	500 MPa		4 $\times$ 20 mm

### 3 LASTPÅFØRING

Bøyemoment i forsterkningssonen	$M_0$	=	50,00 kNm
---------------------------------	-------	---	-----------

Design last	$M_{s,d}$	=	600,00 kNm
-------------	-----------	---	------------

### 4 RESULTATER

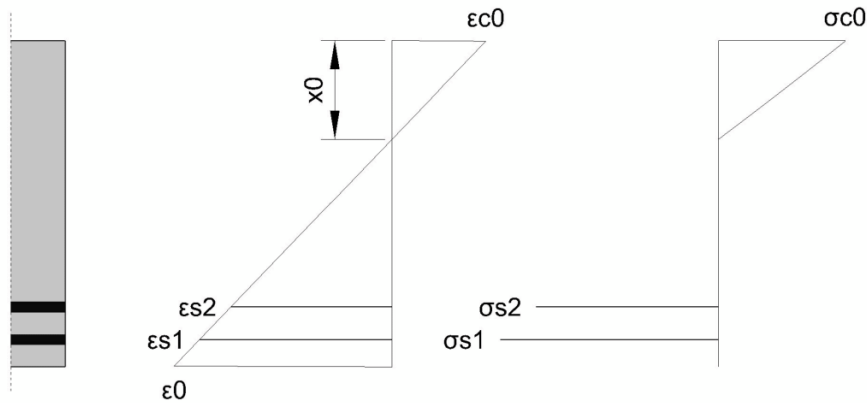
#### 4.1 UARMERT TVERRSNITT, OPPRINNELIG TILSTAND

##### 4.1.1 BETONG

Bruddforlengelse	$\epsilon_{c0}$	=	-0,11 ‰
Bunnstrekk	$\epsilon_0$	=	0,27 ‰
Komprimering sone høyde	$x_0$	=	181,50 mm

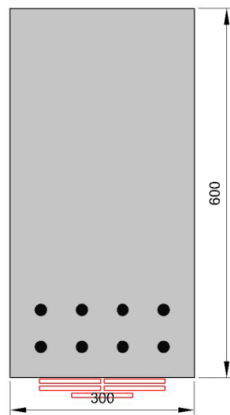
##### 4.1.2 STÅL

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	0,23 ‰
	$\epsilon_{s2}$	=	0,20 ‰
Moment motstand	$M_{Rd,0}$	=	465,14 kNm



#### 4.2 VALGT CFRP FORSTERKNING

Laminat	Sika® CarboDur® E1014
Bristepunktet	$f_{lk} = 1940,00 \text{ N/mm}^2$
E- modul	$E_{lk} = 180,00 \text{ kN/mm}^2$
Bruddstyrke	$\epsilon_{lu} = 12,00 \text{ ‰}$
	$\epsilon_{eff} = 8,00 \text{ ‰}$
Materialfaktor	$\gamma_l = 1,20$
Laminat bredde	$b_f = 100 \text{ mm}$
Laminat tykkelse	$t_f = 1,40 \text{ mm}$
Laminat overflate	$A_f = 140,00 \text{ mm}^2$
Nummer	$n = 5$
Totalt område	$A_f = 700,00 \text{ mm}^2$



## Vedlegg C

### 4.3 ANALYSE AV ULS, FORSTERKEDE KOMPONENT

#### 4.3.1 BETONG

Komprimering sone høyde	X	=	304,50 mm
Strekk i topp	$\epsilon_c$	=	-3,50 ‰
Strekk i bunn	$\epsilon$	=	3,37 ‰
Toppsspennning	$\sigma_c$	=	19,83 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.2 FORSTERKNINGS LAG

##### 1. Lag

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	2,81 ‰
Spennning	$\sigma_{s1}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

##### 2. Lag

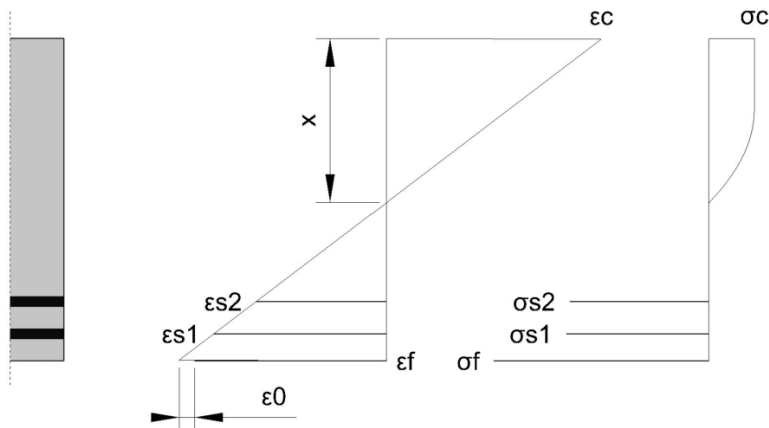
Strekk	$\epsilon_{s2}$	=	2,12 ‰
Spennning	$\sigma_{s2}$	=	424,58 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.3 LAMINAT

Strekk	$\epsilon_f$	=	3,12 ‰
Spennning	$\sigma_f$	=	562,25 N/mm <sup>2</sup>
Nødvendig tverrsnitt	$A_f$	=	700,00 mm <sup>2</sup>

#### 4.3.4 DUKTILITETEN

Relativ dybde på kompresjonsone	$\zeta$	=	0,62
Maks anbefaling	$\zeta_{max}$	=	0,45



#### 4.4 OVERSIKT

##### 4.4.1 BØYESTREKKFASTHET – RESULTAT

Nødvendig laminat tverrsnitt	$A_f$	=	606,00 mm <sup>2</sup>
Tverrsnitt av de valgte laminater	$A_f$	=	700,00 mm <sup>2</sup>

##### 4.4.2 BÆREEVNE BEVIS (ULS)

Momentmotstand før forsterkning	$M_{rd,0}$	=	465,14 kNm
Momentmotstand etter forsterkning	$M_{rd}$	=	610,65 kNm
Forsterknings grad	$M_{rd}/M_{rd,0}$	=	1,31

## 5 BEMERKNINGER

## ANSVARSRASKRIVELSE

DENNE PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE ER KUN MENT FOR Å BRUKES AV PROFESJONELLE BRUKERE MED SPESIALKOMPETANSE INNENFOR DEN TILSIKTEDE ANVENDELSEN. BRUKERE MÅ SELV KONTROLLERE RESULTATENE FØR BRUK OG TA HENSYN TIL BYGGEPLASSEN OG PÅFØRINGSFORHOLDENE, PRODUKTINFORMASJON OG LITTERATUR, TEKNIKS „STATE OF THE ART“, SÅ VEL SOM LOKALE GJELDENE STANDARDER OG FORSKRIFTER.

Med hensyn til programvaren og resultatene som fremkommer fra dets benyttelse, GIR SIKA INGEN GARANTIER FOR NØYAKTIGHET, PÅLITELIGHET, FULLSTENDIGHET, SALGBARHET ELLER EGNETHET FOR NOE FORMÅL. PROGRAMVAREN ER LEVERT PÅ EN "AS-IS" BASIS OG SIKA FRASKRIVER UTTRYKkelig ENHVER GARANTI I FORHOLD TIL PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE.

Sika shall not be liable for any consequential, punitive, incidental, exemplary, or special damages (including but not limited to loss of business opportunity or loss of profit) arising out of the evaluation or use of the software application and results derived from its use.

Sika er ikke ansvarlig for eventuelle følgeskader, strafferettslige, tilfeldige, eksemplariske, eller spesielle skader (inkludert, men ikke begrenset til, tap av forretningsmulighet eller tap av fortjeneste) som følge av evalueringen eller bruk av programvaren og resultatene som fremkommer ved det benyttelse.

Informasjonen, og i særdeleshet anbefalingene i forbindelse med montering og sluttbruk av Sika produkter, er gitt i god tro, basert på Sikas inneværende kunnskap og erfaring med produktene når de er riktig lagret, behandlet og benyttet under normale forhold i henhold til Sika anbefalinger.

I praksis vil forskjellene i materialer, underlag og stedlige forhold være slik at ingen garanti med hensyn til salgbarhet eller egnethet for et bestemt formål, og heller ikke noe ansvar for eventuelle rettslige forhold overhodet, kan utledes enten fra denne informasjonen, eller fra noen skriftlige anbefalinger, eller fra noen andre råd som tilbys. Brukeren av produktet må teste produktets egnethet for det tiltenkte anvendelsen og hensikten.

Sika forbeholder seg retten til å endre produktegenskapene. 3.parts opphavsrett må respekteres. Alle ordrer aksepteres i henhold til våre gjeldende salgs- og leveringsbetingelser.

Personvern:

Ved den første aktivering og i anledning av eventuell fremtidig programvareoppdatering eller endring av den aktuelle brukerinformatjon, vil dette programmet samle inn, lagre og overføre til Sika registreringsinformasjonen innsendt av deg.

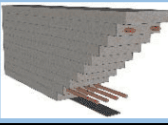
Behandling av personopplysninger skal bare gjøres som formål å administrere lisensiering av programmet. I tillegg, i noen tilfeller kan vi også bruke personopplysninger til å sende brukerne informasjon om oppgraderinger, forbedringer eller undersøkelser om programmet.

Sika beskytter nøye sikkerheten av dine personopplysninger. Du kan endre og modifisere dine personlige data til enhver tid. Sika sletter personopplysninger når alle forbindelser med personlig-databehandling er blitt oppfylt.

© Copyright Sika Services AG 2013



**Test 11-2: Kapasitetsberegning i ULS, rektangulært tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.**



## ConLam

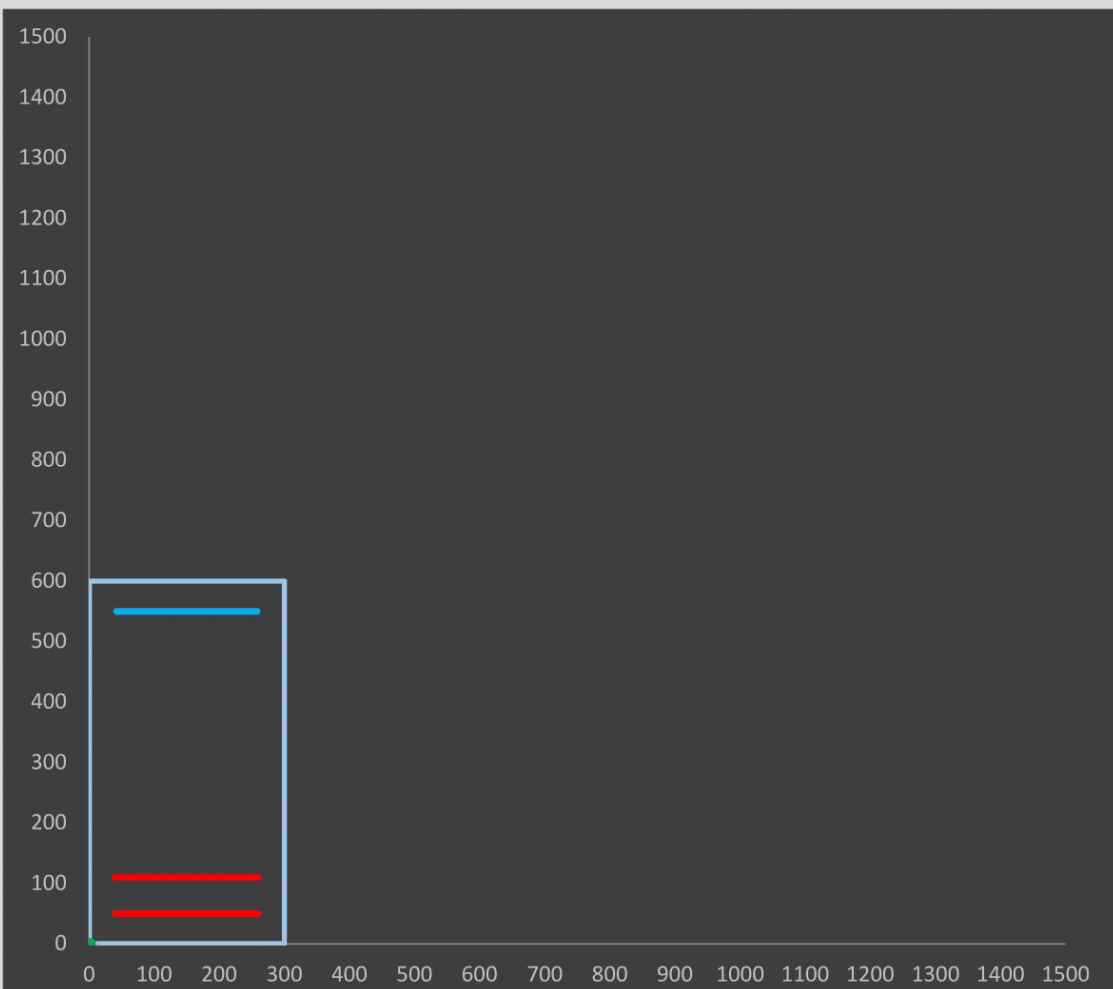
Utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	300	mm
Høyde	600	mm

## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 40$  mm

Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} = 42$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} = 40$  mm

Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]
Lag 1	20	4	1256,6	550
Lag 2	20	4	1256,6	490
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	16	3	603,2	50
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	n	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C35/45**

$\gamma_c = 1,5$

$\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰

$\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Spennstål

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$$f_{pk} = \boxed{1700} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = \boxed{1550} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd} = \boxed{1347,8} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = \boxed{1401,7} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = \boxed{195000} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p2} = \boxed{17458} \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning

$$\epsilon_{pud} = \boxed{10,0} \text{ ‰}$$

Dimensjonerende flytetøyning

$$\epsilon_{pd} = \boxed{6,91} \text{ ‰}$$

Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon'_{p0} = \boxed{6,30} \text{ ‰}$$

Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

Ytre aksialkraft

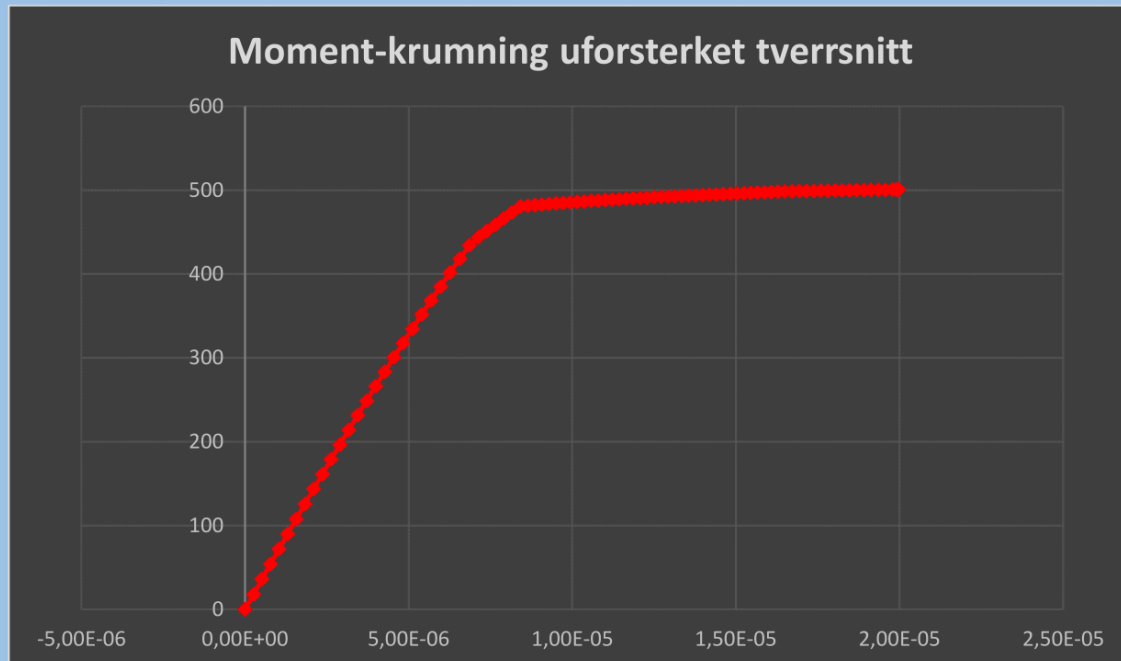
$$P = \boxed{\phantom{0000}} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	<b>500,93</b>	kNm
Krumning	1,997E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	8,48	‰	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	‰	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	7,48	‰	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	6,28	‰	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-2,50	‰	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

	Brudd
Flytning	Ikke brudd
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$$M_0 = 50,0 \text{ kNm}$$

Minimumsverdi: 0,0 kNm  
Maksimal verdi: 500,9 kNm**Forsterkningsmateriale**

$$V_{fm} = 1,2$$

Tykkelse laminat

$$t_f = 1,2 \text{ mm}$$

Bredde laminat

$$b_f = 50 \text{ mm}$$

Antall lag

$$n_f = 4 \text{ stk}$$

Areal

$$A_f = 240 \text{ mm}^2$$

$$E_f = 180000 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{fk} = 12,0 \text{ ‰}$$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$$\epsilon_{fd} = 8,00 \text{ ‰}$$

## Vedlegg C

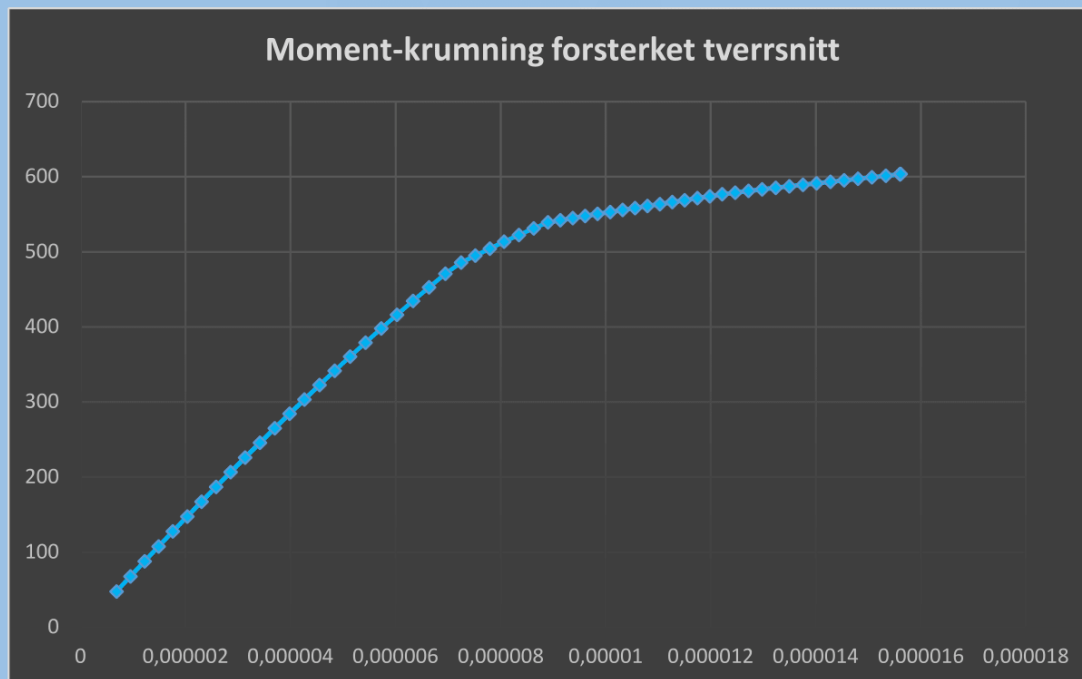
### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = 0,2637 \text{ ‰}$$

Tøyning i underkant betong ved påføring av utenpåliggende forsterkning.

### Forsterket

Kapasitet	ULS		SLS kar.	SLS TP	
Moment	603,60	kNm	0,0	0,0	kNm
Krumning	1,562E-05				



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	5,87	‰	Underkant betong	
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	‰	Overkant betong	Brudd
$\epsilon_{s,lag1}$	5,09	‰	Strekkarmering, lag1	Flytning
$\epsilon_{s,lag2}$	4,15	‰	Strekkarmering, lag2	Flytning
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-2,72	‰	Trykkarmering, lag1	Flytning
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4	-
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1	-
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2	-
$\epsilon_f$	5,61	‰	Forsterkningsmateriale	Ikke brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med i ULS: **102,7** kNm  
 Forsterkningsgrad: **1,20**

# SIKA® CARBODUR® BEREGNINGS PROGRAMVARE

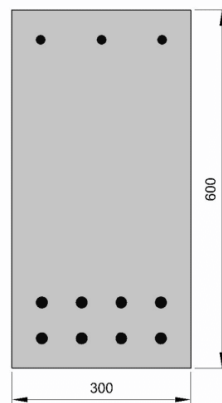
PROSJEKT: MASTEROPPGAVE

ELEMENT: TEST 11-2

## 1 TVERRSNITT OG BETONG

### 1.1 GEOMETRI

Tverrsnitt	Rektangel		
Bredde	b	=	300 mm
Høyde	h	=	600 mm



### 1.2 BETONG

Betongkvalitet	C35/45		
Middelverdi av betongens trykkfasthet	$f_{cm}$	=	43 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_c$	=	1,50

## Vedlegg C

### 2 ARMERING

#### 2.1 ARMERINGSTÅL

E-modul	$E_s$	=	200000 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_s$	=	1,15

#### 2.2 FORSTERKNINGS LAG

Topplag	$d_2$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	50 mm	B500	500 MPa		3 $\times$ 16 mm

Bunnlaget	$d_1$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	50 mm	B500	500 MPa		4 $\times$ 20 mm
2.	110 mm	B500	500 MPa		4 $\times$ 20 mm

### 3 LASTPÅFØRING

Bøyemoment i forsterkningssonen	$M_0$	=	50,00 kNm
---------------------------------	-------	---	-----------

Design last	$M_{s,d}$	=	600,00 kNm
-------------	-----------	---	------------

### 4 RESULTATER

#### 4.1 UARMERT TVERRSNITT, OPPRINNELIG TILSTAND

##### 4.1.1 BETONG

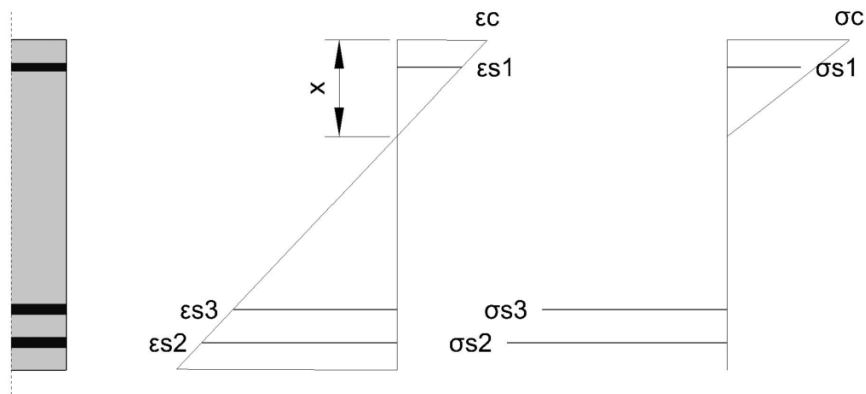
Bruddforlengelse	$\epsilon_{c0}$	=	-0,11 ‰
Bunnstrekk	$\epsilon_0$	=	0,26 ‰
Komprimering sone høyde	$x_0$	=	175,50 mm

##### 4.1.2 STÅL

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	-0,08 ‰
	$\epsilon_{s2}$	=	0,23 ‰
	$\epsilon_{s3}$	=	0,20 ‰

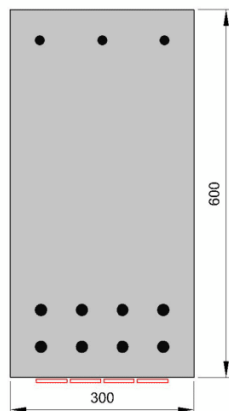
Moment motstand	$M_{Rd,0}$	=	495,57 kNm
-----------------	------------	---	------------





#### 4.2 VALGT CFRP FORSTERKNING

Laminat	Sika® CarboDur® E512
Bristepunktet	$f_{lk} = 1940,00 \text{ N/mm}^2$
E- modul	$E_{lk} = 180,00 \text{ kN/mm}^2$
Bruddstyrke	$\epsilon_{lu} = 12,00 \text{ ‰}$
	$\epsilon_{eff} = 8,00 \text{ ‰}$
Materialfaktor	$\gamma_l = 1,20$
Laminat bredde	$b_f = 50 \text{ mm}$
Laminat tykkelse	$t_f = 1,20 \text{ mm}$
Laminat overflate	$A_f = 60,00 \text{ mm}^2$
Nummer	$n = 4$
Totalt område	$A_f = 240,00 \text{ mm}^2$



## Vedlegg C

### 4.3 ANALYSE AV ULS, FORSTERKEDE KOMPONENT

#### 4.3.1 BETONG

Komprimering sone høyde	$x$	=	223,50 mm
Strekk i topp	$\epsilon_c$	=	-3,50 ‰
Strekk i bunn	$\epsilon$	=	5,93 ‰
Toppsspennning	$\sigma_c$	=	19,83 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.2 FORSTERKNINGS LAG

##### 1. Lag

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	-2,73 ‰
Spennning	$\sigma_{s1}$	=	-434,78 N/mm <sup>2</sup>

##### 2. Lag

Strekk	$\epsilon_{s2}$	=	5,16 ‰
Spennning	$\sigma_{s2}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

##### 3. Lag

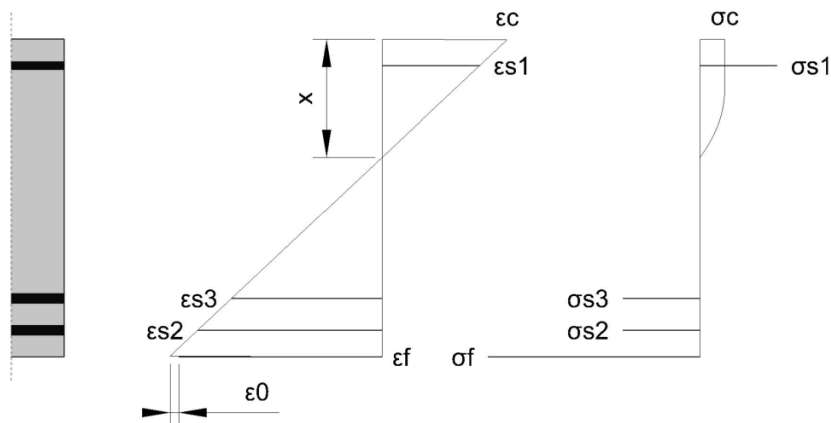
Strekk	$\epsilon_{s3}$	=	4,21 ‰
Spennning	$\sigma_{s3}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.3 LAMINAT

Strekk	$\epsilon_f$	=	5,69 ‰
Spennning	$\sigma_f$	=	1024,05 N/mm <sup>2</sup>
Nødvendig tverrsnitt	$A_f$	=	240,00 mm <sup>2</sup>

#### 4.3.4 DUKTILITETEN

Relativ dybde på kompresjonsone	$\zeta$	=	0,46
Maks anbefaling	$\zeta_{max}$	=	0,45



#### 4.4 OVERSIKT

##### 4.4.1 BØYESTREKKFASTHET – RESULTAT

Nødvendig laminat tverrsnitt	$A_f$	=	232,00 mm <sup>2</sup>
Tverrsnitt av de valgte laminater	$A_f$	=	240,00 mm <sup>2</sup>

##### 4.4.2 BÆREEVNE BEVIS (ULS)

Momentmotstand før forsterkning	$M_{rd,0}$	=	495,57 kNm
Momentmotstand etter forsterkning	$M_{rd}$	=	602,59 kNm
Forsterknings grad	$M_{rd}/M_{rd,0}$	=	1,22

## 5 BEMERKNINGER

## ANSVARSRASKRIVELSE

DENNE PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE ER KUN MENT FOR Å BRUKES AV PROFESJONELLE BRUKERE MED SPESIALKOMPETANSE INNENFOR DEN TILSIKTEDE ANVENDELSEN. BRUKERE MÅ SELV KONTROLLERE RESULTATENE FØR BRUK OG TA HENSYN TIL BYGGEPLASSEN OG PÅFØRINGSFORHOLDENE, PRODUKTINFORMASJON OG LITTERATUR, TEKNIKS „STATE OF THE ART“, SÅ VEL SOM LOKALE GJELDENE STANDARDER OG FORSKRIFTER.

Med hensyn til programvaren og resultatene som fremkommer fra dets benyttelse, GIR SIKÅ INGEN GARANTIER FOR NØYAKTIGHET, PÅLITELIGHET, FULLSTENDIGHET, SALGBARHET ELLER EGNETHET FOR NOE FORMÅL. PROGRAMVAREN ER LEVERT PÅ EN "AS-IS" BASIS OG SIKÅ FRASKRIVER UTTRYKkelig ENHVER GARANTI I FORHOLD TIL PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE.

Sika shall not be liable for any consequential, punitive, incidental, exemplary, or special damages (including but not limited to loss of business opportunity or loss of profit) arising out of the evaluation or use of the software application and results derived from its use.

Sika er ikke ansvarlig for eventuelle følgeskader, strafferettslige, tilfeldige, eksemplariske, eller spesielle skader (inkludert, men ikke begrenset til, tap av forretningsmulighet eller tap av fortjeneste) som følge av evalueringen eller bruk av programvaren og resultatene som fremkommer ved det benyttelse.

Informasjonen, og i særdeleshet anbefalingene i forbindelse med montering og sluttbruk av Sika produkter, er gitt i god tro, basert på Sikas inneværende kunnskap og erfaring med produktene når de er riktig lagret, behandlet og benyttet under normale forhold i henhold til Sika anbefalinger.

I praksis vil forskjellene i materialer, underlag og stedlige forhold være slik at ingen garanti med hensyn til salgbarhet eller egnethet for et bestemt formål, og heller ikke noe ansvar for eventuelle rettslige forhold overhodet, kan utledes enten fra denne informasjonen, eller fra noen skriftlige anbefalinger, eller fra noen andre råd som tilbys. Brukeren av produktet må teste produktets egnethet for det tiltenkte anvendelsen og hensikten.

Sika forbeholder seg retten til å endre produkttegenskapene. 3.parts opphavsrett må respekteres. Alle ordrer aksepteres i henhold til våre gjeldende salgs- og leveringsbetingelser.

Personvern:

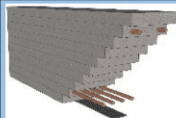
Ved den første aktiveringen og i anledning av eventuell fremtidig programvareoppdatering eller endring av den aktuelle brukerinformasjon, vil dette programmet samle inn, lagre og overføre til Sika registreringsinformasjonen innsendt av deg.

Behandling av personopplysninger skal bare gjøres som formål å administrere lisensiering av programmet. I tillegg, i noen tilfeller kan vi også bruke personopplysninger til å sende brukerne informasjon om oppgraderinger, forbedringer eller undersøkelser om programmet.

Sika beskytter nøye sikkerheten av dine personopplysninger. Du kan endre og modifisere dine personlige data til enhver tid. Sika sletter personopplysninger når alle forbindelser med personlig-databehandling er blitt oppfylt.

© Copyright Sika Services AG 2013

## Test 11-3: Kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk.



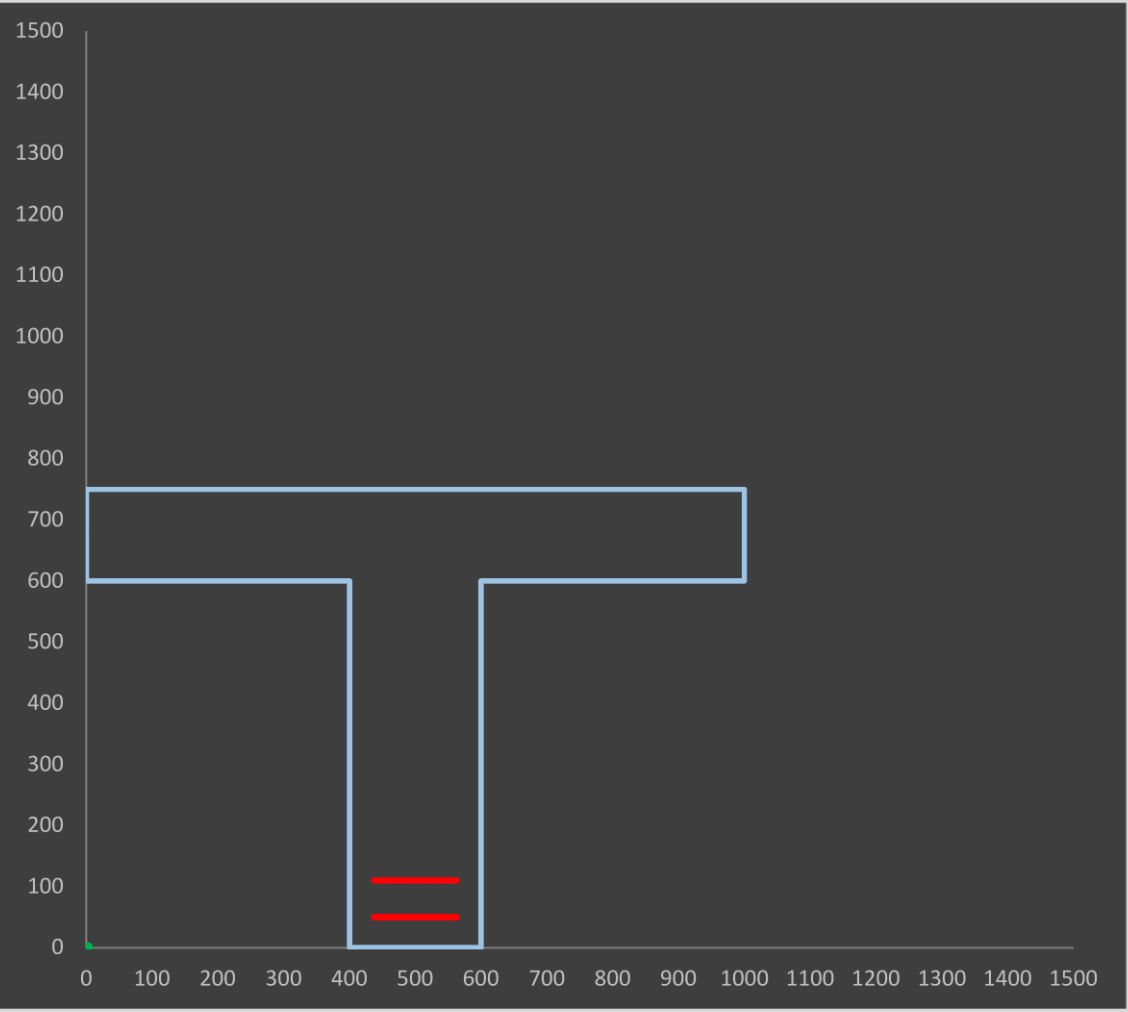
## ConLam

Utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): T

Fyll inn tverrsnittsmål:

T-tverrsnitt		
Effektiv bredde flens	1000	mm
Tykkelse flens, ende	150	mm
Tykkelse flens, midt	150	mm
Bredde steg, bunn	200	mm
Bredde steg, topp	200	mm
Høyde steg	600	mm
Total høyde tverrsnitt	750	mm



## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 37,5$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} =$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} = 35$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	25	4	1963,5	700
Lag 2	25	4	1963,5	640
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1			0,0	0
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C35/45**

$\gamma_c = 1,5$

$\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰

$\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Spennstål

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$f_{pk} =$	<input type="text" value="1700"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{p0,1k} =$	<input type="text" value="1550"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd} =$	<input type="text" value="1347,8"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s =$	<input type="text" value="1401,7"/>	N/mm <sup>2</sup>

$E_{p1} =$	<input type="text" value="195000"/>	N/mm <sup>2</sup>
$E_{p2} =$	<input type="text" value="17458"/>	N/mm <sup>2</sup>

Dimensjonerende bruddtøyning

$\epsilon_{pud} =$	<input type="text" value="10,0"/>	%
--------------------	-----------------------------------	---

Dimensjonerende flytetøyning

$\epsilon_{pd} =$	<input type="text" value="6,91"/>	%
-------------------	-----------------------------------	---

Oppspenningstøyning inkl. tap

$\epsilon'_{p0} =$	<input type="text" value="6,30"/>	%
--------------------	-----------------------------------	---

Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet       $n = \boxed{500}$  antall lameller

Ytre aksialkraft

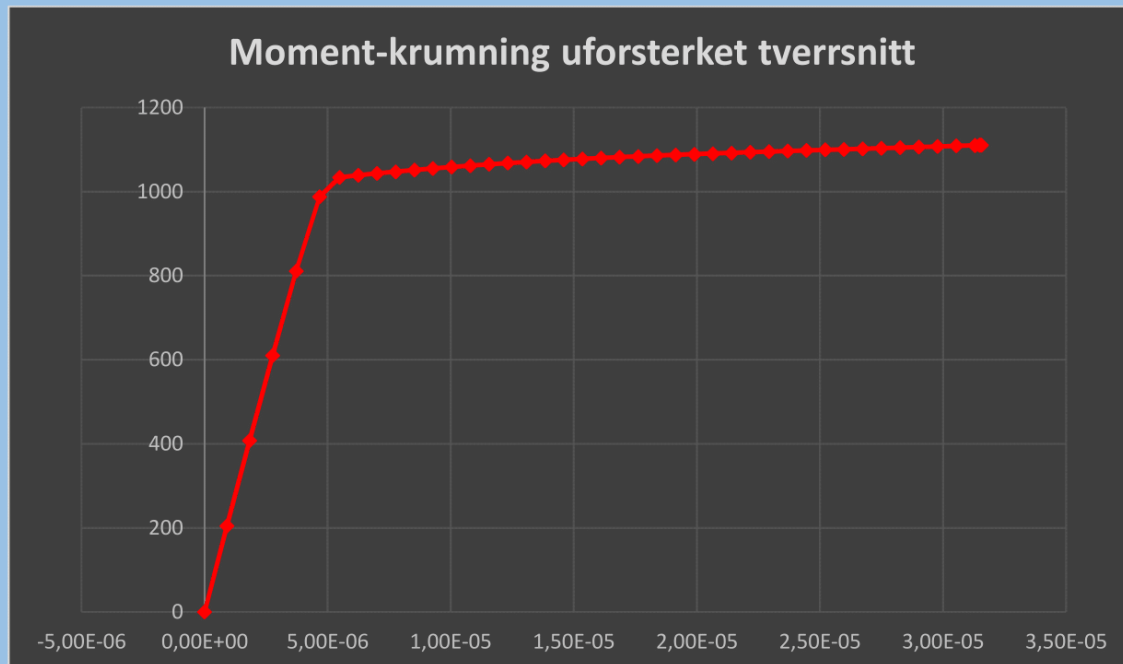
$P = \boxed{\phantom{000}}$  kN

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	1110,61	kNm
Krumning	3,156E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	20,17	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	18,59	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	16,70	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-



**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$M_0 = 200,0 \text{ kNm}$

Minimumsverdi: 0,0 kNm

Maksimal verdi: 1110,6 kNm

**Forsterkningsmateriale**

$\gamma_{fm} = 1,2$

Tykkelse laminat

$t_f = 1,4 \text{ mm}$

Bredde laminat

$b_f = 100 \text{ mm}$

Antall lag

$n_f = 3 \text{ stk}$

Areal

$A_f = 420 \text{ mm}^2$

$E_f = 180000 \text{ N/mm}^2$

$\varepsilon_{fk} = 12,0 \text{ ‰}$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$\varepsilon_{fd} = 8,00 \text{ ‰}$

## Vedlegg C

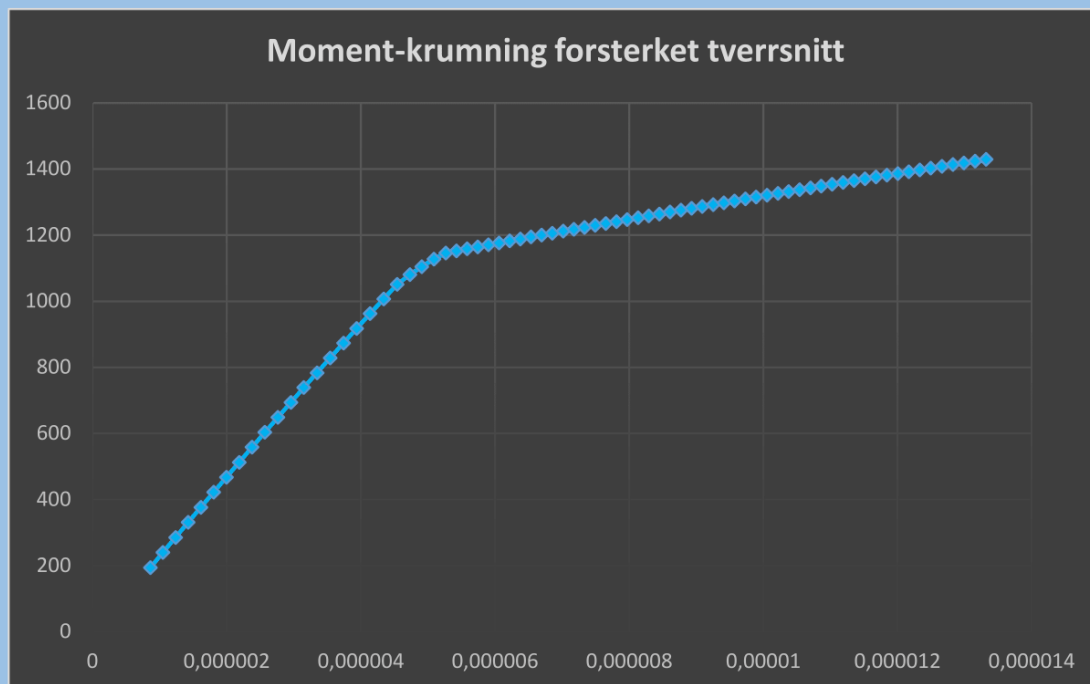
### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = 0,4742 \text{ ‰}$$

Tøyning i underkant betong ved påføring av utenpåliggende forsterkning.

### Forsterket

Kapasitet	ULS	SLS kar.	SLS TP
Moment	1466,58 kNm	0,0	0,0
Krumning	1,449E-05		



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	8,47 ‰	Underkant betong	
$\epsilon_{c,ok}$	-2,39 ‰	Overkant betong	Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag1}$	7,75 ‰	Strekkarmering, lag1	Flytning
$\epsilon_{s,lag2}$	6,88 ‰	Strekkarmering, lag2	Flytning
$\epsilon_{s,lag3}$	-	Strekkarmering, lag3	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	Strekkarmering, lag4	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-	Trykkarmering, lag1	-
$\epsilon_{st,lag2}$	-	Trykkarmering, lag2	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	Trykkarmering, lag3	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	Trykkarmering, lag4	-
$\epsilon_{p,1}$	-	Spennarmering, lag1	-
$\epsilon_{p,2}$	-	Spennarmering, lag2	-
$\epsilon_f$	8,00 ‰	Forsterkningsmateriale	Brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med i ULS: **356,0** kNm  
 Forsterkningsgrad: **1,32**

# SIKA® CARBODUR® BEREGNINGS PROGRAMVARE

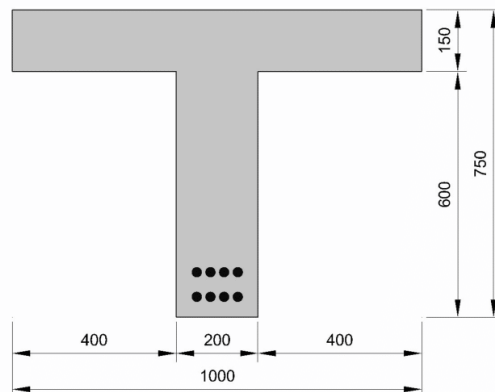
PROSJEKT: MASTEROPPGAVE

ELEMENT: TEST 11-3

## 1 TVERRSNITT OG BETONG

### 1.1 GEOMETRI

Tverrsnitt	T-Bjelke		
Bredde	b	=	1000 mm
	$b_w$	=	200 mm
Høyde	$h_0$	=	150 mm
	h	=	750 mm



### 1.2 BETONG

Betongkvalitet	C35/45		
Middelverdi av betongens trykkfasthet	$f_{cm}$	=	43 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_c$	=	1,50

## Vedlegg C

### 2 ARMERING

#### 2.1 ARMERINGSTÅL

E- modul	$E_s$	=	200000 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_s$	=	1,15

#### 2.2 FORSTERKNINGS LAG

Bunnlaget	$d_i$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	50 mm	B500	500 MPa		4 $\times$ 25 mm
2.	110 mm	B500	500 MPa		4 $\times$ 25 mm

### 3 LASTPÅFØRING

Bøyemoment i forsterkningssonen	$M_0$	=	200,00 kNm
---------------------------------	-------	---	------------

Design last	$M_{s,d}$	=	1400,00 kNm
-------------	-----------	---	-------------

### 4 RESULTATER

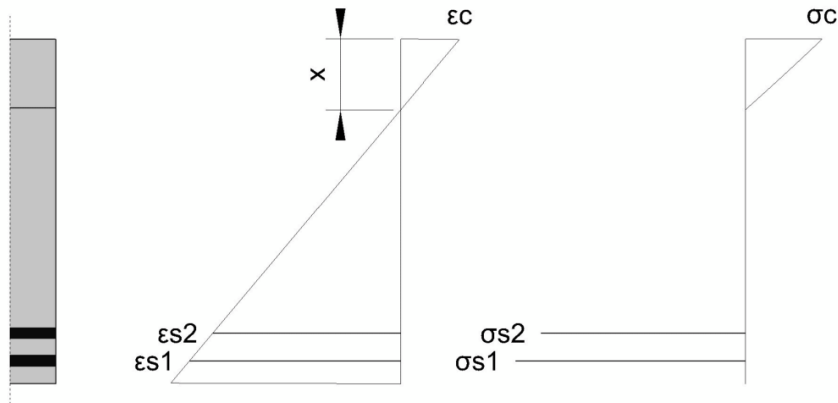
#### 4.1 UARMERT TVERRSNITT, OPPRINNELIG TILSTAND

##### 4.1.1 BETONG

Bruddforlengelse	$\epsilon_{c0}$	=	-0,12 ‰
Bunnstrekk	$\epsilon_0$	=	0,47 ‰
Komprimering sone høyde	$X_0$	=	154,50 mm

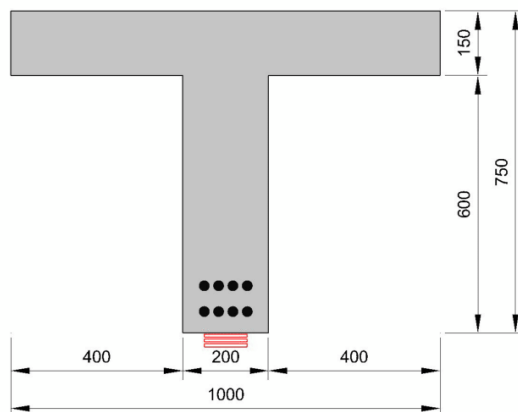
##### 4.1.2 STÅL

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	0,43 ‰
	$\epsilon_{s2}$	=	0,39 ‰
Moment motstand	$M_{Rd,0}$	=	1068,48 kNm



#### 4.2 VALGT CFRP FORSTERKNING

Laminat	Sika® CarboDur® E1014
Bristepunktet	$f_{lk} = 1940,00 \text{ N/mm}^2$
E- modul	$E_{lk} = 180,00 \text{ kN/mm}^2$
Bruddstyrke	$\epsilon_{lu} = 12,00 \text{ ‰}$
	$\epsilon_{eff} = 8,00 \text{ ‰}$
Materialfaktor	$\gamma_l = 1,20$
Laminat bredde	$b_f = 100 \text{ mm}$
Laminat tykkelse	$t_f = 1,40 \text{ mm}$
Laminat overflate	$A_f = 140,00 \text{ mm}^2$
Nummer	$n = 3$
Totalt område	$A_f = 420,00 \text{ mm}^2$



## Vedlegg C

### 4.3 ANALYSE AV ULS, FORSTERKEDE KOMPONENT

#### 4.3.1 BETONG

Komprimering sone høyde	$x$	=	163,50 mm
Strekk i topp	$\epsilon_c$	=	-2,35 ‰
Strekk i bunn	$\epsilon$	=	8,45 ‰
Toppspenning	$\sigma_c$	=	19,83 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.2 FORSTERKNINGS LAG

##### 1. Lag

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	7,75 ‰
Spenning	$\sigma_{s1}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

##### 2. Lag

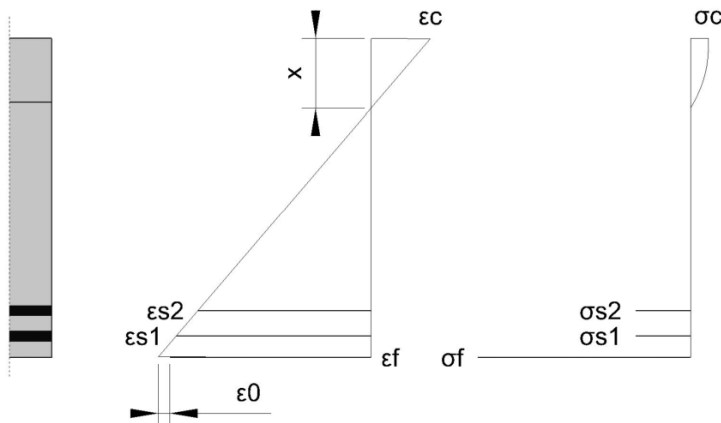
Strekk	$\epsilon_{s2}$	=	6,88 ‰
Spenning	$\sigma_{s2}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.3 LAMINAT

Strekk	$\epsilon_f$	=	8,00 ‰
Spenning	$\sigma_f$	=	1439,99 N/mm <sup>2</sup>
Nødvendig tverrsnitt	$A_f$	=	420,00 mm <sup>2</sup>

#### 4.3.4 DUKTILITETEN

Relativ dybde på kompresjonszone	$\zeta$	=	0,26
Maks anbefaling	$\zeta_{max}$	=	0,45



**4.4 OVERSIKT****4.4.1 BØYESTREKKFASTHET – RESULTAT**

Nødvendig laminat tverrsnitt	$A_f$	=	363,00 mm <sup>2</sup>
Tverrsnitt av de valgte laminater	$A_f$	=	420,00 mm <sup>2</sup>

**4.4.2 BÆREEVNE BEVIS (ULS)**

Momentmotstand før forsterkning	$M_{rd,0}$	=	1068,48 kNm
Momentmotstand etter forsterkning	$M_{rd}$	=	1453,00 kNm
Forsterknings grad	$M_{rd}/M_{rd,0}$	=	1,36

**5 BEMERKNINGER**

## ANSVARSFRAKRIVELSE

DENNE PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE ER KUN MENT FOR Å BRUKES AV PROFESJONELLE BRUKERE MED SPESIALKOMPETANSE INNENFOR DEN TILSIKTEDE ANVENDELSEN. BRUKERE MÅ SELV KONTROLLERE RESULTATENE FØR BRUK OG TA HENSYN TIL BYGGEPLASSEN OG PÅFØRINGSFORHOLDENE, PRODUKTINFORMASJON OG LITTERATUR, TEKNIKS „STATE OF THE ART“, SÅ VEL SOM LOKALE GJELDENE STANDARDER OG FORSKRIFTER.

Med hensyn til programvaren og resultatene som fremkommer fra dets benyttelse, GIR SIKA INGEN GARANTIER FOR NØYAKTIGHET, PÅLITELIGHET, FULLSTENDIGHET, SALGBARHET ELLER EGNETHET FOR NOE FORMÅL. PROGRAMVAREN ER LEVERT PÅ EN "AS-IS" BASIS OG SIKA FRASKRIVER UTTRYKkelig ENHVER GARANTI I FORHOLD TIL PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE.

Sika shall not be liable for any consequential, punitive, incidental, exemplary, or special damages (including but not limited to loss of business opportunity or loss of profit) arising out of the evaluation or use of the software application and results derived from its use.

Sika er ikke ansvarlig for eventuelle følgeskader, strafferettslige, tilfeldige, eksemplariske, eller spesielle skader (inkludert, men ikke begrenset til, tap av forretningsmulighet eller tap av fortjeneste) som følge av evalueringen eller bruk av programvaren og resultatene som fremkommer ved det benyttelse.

Informasjonen, og i særdeleshet anbefalingene i forbindelse med montering og sluttbruk av Sika produkter, er gitt i god tro, basert på Sikas inneværende kunnskap og erfaring med produktene når de er riktig lagret, behandlet og benyttet under normale forhold i henhold til Sika anbefalinger.

I praksis vil forskjellene i materialer, underlag og stedlige forhold være slik at ingen garanti med hensyn til salgbarhet eller egnethet for et bestemt formål, og heller ikke noe ansvar for eventuelle rettslige forhold overhodet, kan utledes enten fra denne informasjonen, eller fra noen skriftlige anbefalinger, eller fra noen andre råd som tilbys. Brukeren av produktet må teste produktets egnethet for det tiltenkte anvendelsen og hensikten.

Sika forbeholder seg retten til å endre produkttegenskapene. 3.parts opphavsrett må respekteres. Alle ordrer aksepteres i henhold til våre gjeldende salgs- og leveringsbetingelser.

Personvern:

Ved den første aktiveringen og i anledning av eventuell fremtidig programvareoppdatering eller endring av den aktuelle brukerinformasjon, vil dette programmet samle inn, lagre og overføre til Sika registreringsinformasjonen innsendt av deg.

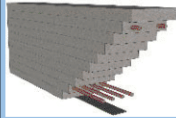
Behandling av personopplysninger skal bare gjøres som formål å administrere lisensiering av programmet. I tillegg, i noen tilfeller kan vi også bruke personopplysninger til å sende brukerne informasjon om oppgraderinger, forbedringer eller undersøkelser om programmet.

Sika beskytter nøye sikkerheten av dine personopplysninger. Du kan endre og modifisere dine personlige data til enhver tid. Sika sletter personopplysninger når alle forbindelser med personlig-databehandling er blitt oppfylt.

© Copyright Sika Services AG 2013



## Test 11-4: Kapasitetsberegning i ULS, T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk.



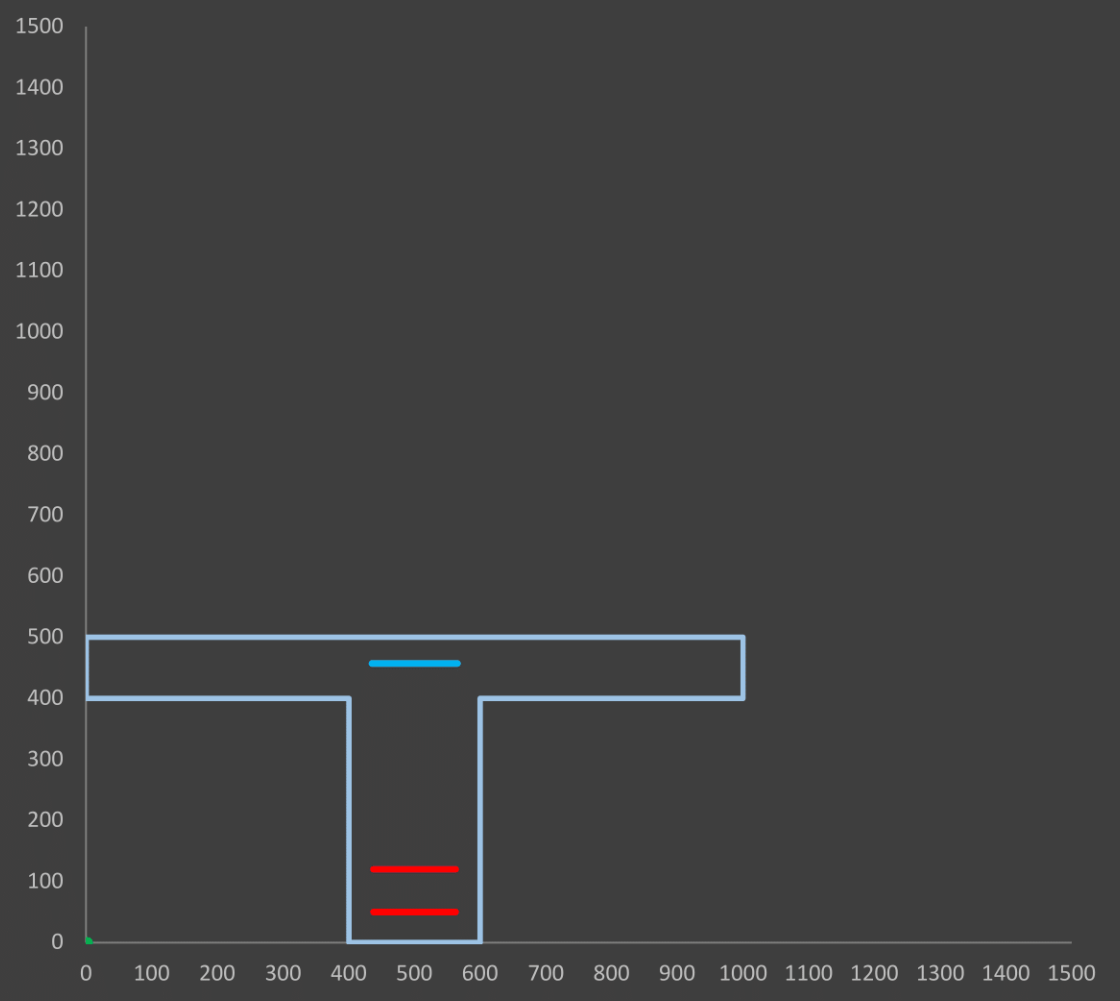
## ConLam

Utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): T

Fyll inn tverrsnittsmål:

T-tverrsnitt	
Effektiv bredde flens	1000 mm
Tykkelse flens, ende	100 mm
Tykkelse flens, midt	100 mm
Bredde steg, bunn	200 mm
Bredde steg, topp	200 mm
Høyde steg	400 mm
Total høyde tverrsnitt	500 mm



## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 37,5$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} = 35$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} = 45$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]
Lag 1	25	4	1963,5	450
Lag 2	25	2	981,7	380
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	$n$	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	16	8	1608,5	43
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	$n$	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C25/30**

$\gamma_c = 1,5$

$\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 25,0$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd} = 14,2$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm} = 33,0$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰

$\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 31000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 31000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Spennstål

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$f_{pk} =$	<input type="text" value="1700"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{p0,1k} =$	<input type="text" value="1550"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd} =$	<input type="text" value="1347,8"/>	N/mm <sup>2</sup>
$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s =$	<input type="text" value="1401,7"/>	N/mm <sup>2</sup>

$E_{p1} =$	<input type="text" value="195000"/>	N/mm <sup>2</sup>
$E_{p2} =$	<input type="text" value="17458"/>	N/mm <sup>2</sup>

Dimensjonerende brudtøyning

$\epsilon_{pud} =$	<input type="text" value="10,0"/>	%
--------------------	-----------------------------------	---

Dimensjonerende flytetøyning

$\epsilon_{pd} =$	<input type="text" value="6,91"/>	%
-------------------	-----------------------------------	---

Oppspenningstøyning inkl. tap

$\epsilon'_{p0} =$	<input type="text" value="6,30"/>	%
--------------------	-----------------------------------	---

Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

Ytre aksialkraft

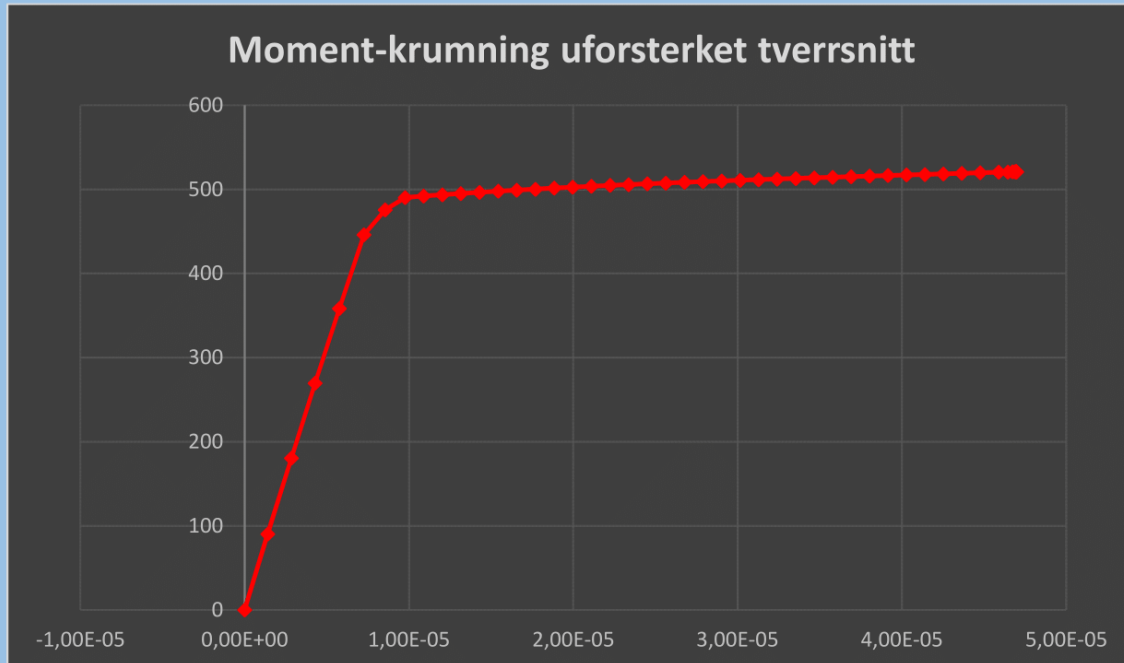
$P = \boxed{\phantom{000}}$  kN

Legg kun inn trykkraft. Denne testes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	521,12	kNm
Krumning	4,697E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	19,98	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	17,64	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	14,35	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-1,48	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
Ikke flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$$M_0 = 100,0 \text{ kNm}$$

Minimumsverdi: 0,0 kNm

Maksimal verdi: 521,1 kNm

**Forsterkningsmateriale**

$$\gamma_{fm} = 1,2$$

Tykkelse laminat

$$t_f = 1,4 \text{ mm}$$

Bredde laminat

$$b_f = 100 \text{ mm}$$

Antall lag

$$n_f = 3 \text{ stk}$$

Areal

$$A_f = 420 \text{ mm}^2$$

$$E_f = 180000 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{fk} = 12,0 \text{ ‰}$$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$$\epsilon_{fd} = 8,00 \text{ ‰}$$

## Vedlegg C

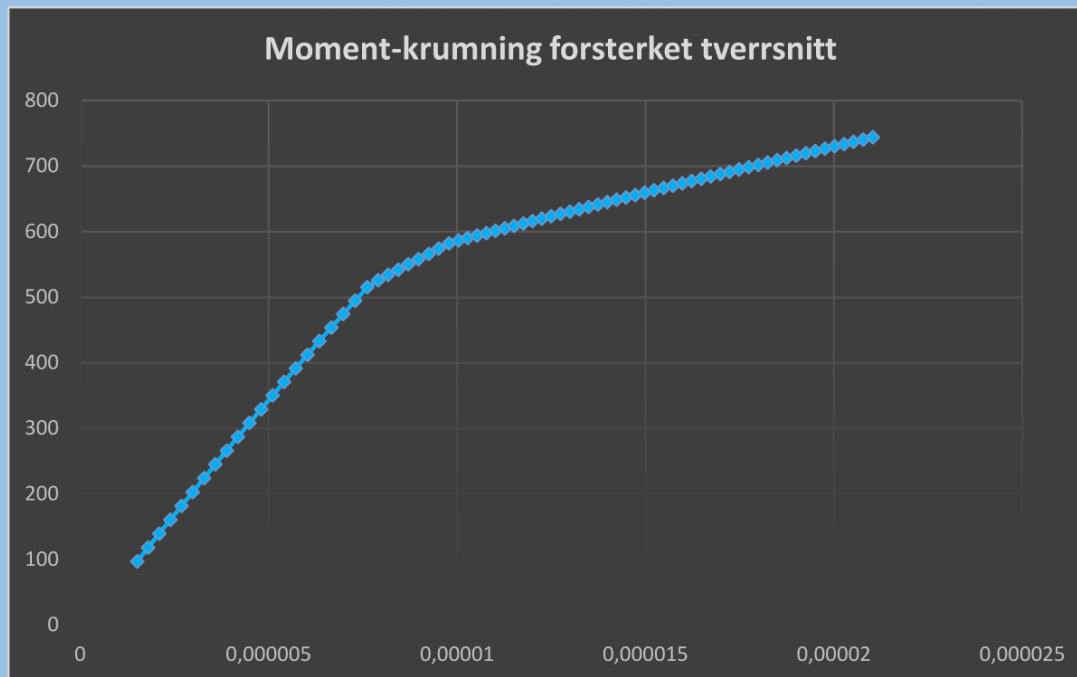
### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = 0,5355 \text{ ‰}$$

Tøyning i underkant betong ved påføring av utenpåliggende forsterkning.

### Forsterket

Kapasitet	ULS		SLS kar.	SLS TP	
Moment	768,88	kNm	0,0	0,0	kNm
Krumning	2,282E-05				



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	8,54	‰	Underkant betong		
$\epsilon_{c,ok}$	-2,88	‰	Overkant betong		Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag1}$	7,39	‰	Strekkarmering, lag1	Flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag2}$	5,80	‰	Strekkarmering, lag2	Flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-1,89	‰	Trykkarmering, lag1	Ikke flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1	-	-
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2	-	-
$\epsilon_f$	8,00	‰	Forsterkningsmateriale		Brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med i ULS: 247,8 kNm

Forsterkningsgrad: 1,48

# SIKA® CARBODUR® BEREGNINGS PROGRAMVARE

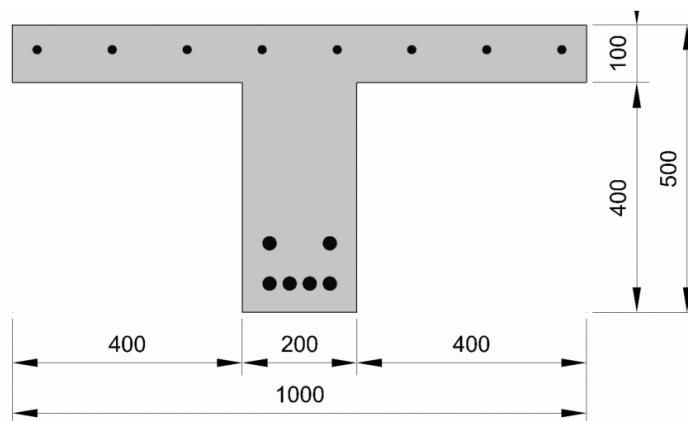
PROSJEKT: MASTEROPPGAVE

ELEMENT: TEST 11-4

## 1 TVERRSNITT OG BETONG

### 1.1 GEOMETRI

Tversnitt	T-Bjelke		
Bredde	b	=	1000 mm
	$b_w$	=	200 mm
Høyde	$h_0$	=	100 mm
	h	=	500 mm



### 1.2 BETONG

Betongkvalitet	C25/30		
Middelverdi av betongens trykkfasthet	$f_{cm}$	=	33 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_c$	=	1,50

## Vedlegg C

### 2 ARMERING

#### 2.1 ARMERINGSTÅL

E- modul	$E_s$	=	200000 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_s$	=	1,15

#### 2.2 FORSTERKNINGS LAG

Topplag	$d_2$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	43 mm	B500	500 MPa		8 $\times$ 16 mm

Bunnlaget	$d_1$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	50 mm	B500	500 MPa		4 $\times$ 25 mm
2.	120 mm	B500	500 MPa		2 $\times$ 25 mm

### 3 LASTPÅFØRING

Bøyemoment i forsterkningssonen	$M_0$	=	100,00 kNm
---------------------------------	-------	---	------------

Design last	$M_{s,d}$	=	750,00 kNm
-------------	-----------	---	------------

### 4 RESULTATER

#### 4.1 UARMERT TVERRSNITT, OPPRINNELIG TILSTAND

##### 4.1.1 BETONG

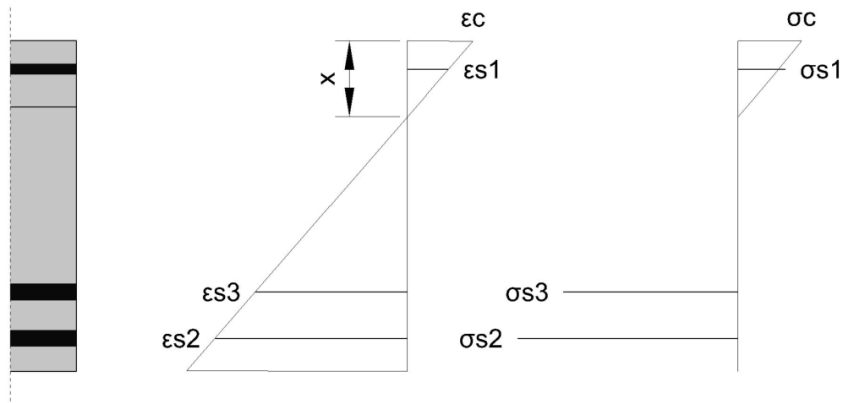
Bruddforlengelse	$\epsilon_{c0}$	=	-0,16 ‰
Bunnstrekk	$\epsilon_0$	=	0,53 ‰
Komprimering sone høyde	$x_0$	=	115,00 mm

##### 4.1.2 STÅL

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	-0,10 ‰
	$\epsilon_{s2}$	=	0,47 ‰
	$\epsilon_{s3}$	=	0,37 ‰

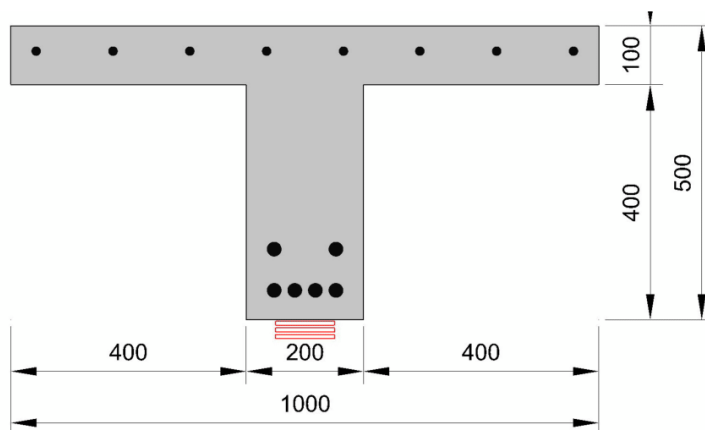
Moment motstand	$M_{Rd,0}$	=	502,12 kNm
-----------------	------------	---	------------





#### 4.2 VALGT CFRP FORSTERKNING

Laminat	Sika® CarboDur® E1014
Bristepunktet	$f_{lk} = 1940,00 \text{ N/mm}^2$
E- modul	$E_{lk} = 180,00 \text{ kN/mm}^2$
Bruddstyrke	$\epsilon_{lu} = 12,00 \%$
	$\epsilon_{eff} = 8,00 \%$
Materialfaktor	$\gamma_l = 1,20$
Laminat bredde	$b_f = 100 \text{ mm}$
Laminat tykkelse	$t_f = 1,40 \text{ mm}$
Laminat overflate	$A_f = 140,00 \text{ mm}^2$
Nummer	$n = 3$
Totalt område	$A_{f_t} = 420,00 \text{ mm}^2$



## Vedlegg C

### 4.3 ANALYSE AV ULS, FORSTERKEDE KOMPONENT

#### 4.3.1 BETONG

Komprimering sone høyde	X	=	125,00 mm
Strekk i topp	$\epsilon_c$	=	-2,83 ‰
Strekk i bunn	$\epsilon$	=	8,51 ‰
Toppspanning	$\sigma_c$	=	14,17 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.2 FORSTERKNINGS LAG

##### 1. Lag

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	-1,87 ‰
Spenning	$\sigma_{s1}$	=	-373,85 N/mm <sup>2</sup>

##### 2. Lag

Strekk	$\epsilon_{s2}$	=	7,40 ‰
Spenning	$\sigma_{s2}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

##### 3. Lag

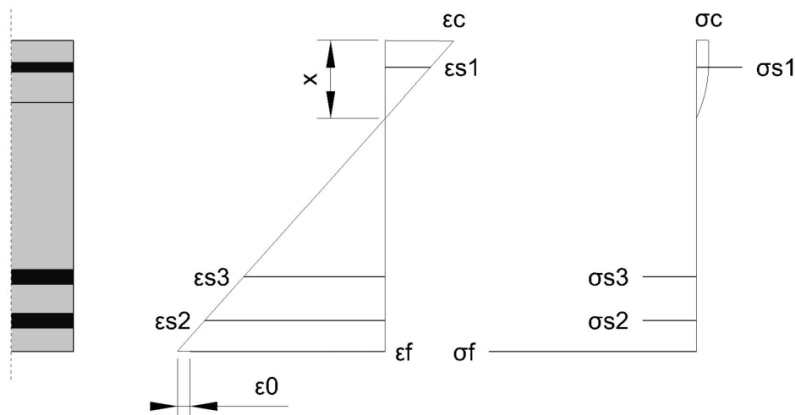
Strekk	$\epsilon_{s3}$	=	5,80 ‰
Spenning	$\sigma_{s3}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.3 LAMINAT

Strekk	$\epsilon_f$	=	8,00 ‰
Spenning	$\sigma_f$	=	1439,94 N/mm <sup>2</sup>
Nødvendig tverrsnitt	$A_f$	=	420,00 mm <sup>2</sup>

#### 4.3.4 DUKTILITETEN

Relativ dybde på kompresjonsone	$\zeta$	=	0,33
Maks anbefaling	$\zeta_{max}$	=	0,45



#### 4.4 OVERSIKT

##### 4.4.1 BØYESTREKKFASTHET – RESULTAT

Nødvendig laminat tverrsnitt	$A_f$	=	400,00 mm <sup>2</sup>
Tverrsnitt av de valgte laminater	$A_f$	=	420,00 mm <sup>2</sup>

##### 4.4.2 BÆREEVNE BEVIS (ULS)

Momentmotstand før forsterkning	$M_{rd,0}$	=	502,12 kNm
Momentmotstand etter forsterkning	$M_{rd}$	=	762,81 kNm
Forsterknings grad	$M_{rd}/M_{rd,0}$	=	1,52

## 5 BEMERKNINGER

## ANSVARSFRAKRIVELSE

DENNE PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE ER KUN MENT FOR Å BRUKES AV PROFESJONELLE BRUKERE MED SPESIALKOMPETANSE INNENFOR DEN TILSIKTEDE ANVENDELSEN. BRUKERE MÅ SELV KONTROLLERE RESULTATENE FØR BRUK OG TA HENSYN TIL BYGGEPLASSEN OG PÅFØRINGSFORHOLDENE, PRODUKTINFORMASJON OG LITTERATUR, TEKNIKS „STATE OF THE ART“, SÅ VEL SOM LOKALE GJELDENE STANDARDER OG FORSKRIFTER.

Med hensyn til programvaren og resultatene som fremkommer fra dets benyttelse, GIR SIKKA INGEN GARANTIER FOR NØYAKTIGHET, PÅLITELIGHET, FULLSTENDIGHET, SALGBARHET ELLER EGNETHET FOR NOE FORMÅL. PROGRAMVAREN ER LEVERT PÅ EN "AS-IS" BASIS OG SIKKA FRASKRIVER UTTRYKkelig ENHVER GARANTI I FORHOLD TIL PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE.

Sika shall not be liable for any consequential, punitive, incidental, exemplary, or special damages (including but not limited to loss of business opportunity or loss of profit) arising out of the evaluation or use of the software application and results derived from its use.

Sika er ikke ansvarlig for eventuelle følgeskader, strafferettslige, tilfeldige, eksemplariske, eller spesielle skader (inkludert, men ikke begrenset til, tap av forretningsmulighet eller tap av fortjeneste) som følge av evalueringen eller bruk av programvaren og resultatene som fremkommer ved det benyttelse.

Informasjonen, og i særdeleshet anbefalingene i forbindelse med montering og sluttbruk av Sika produkter, er gitt i god tro, basert på Sikas inneværende kunnskap og erfaring med produktene når de er riktig lagret, behandlet og benyttet under normale forhold i henhold til Sika anbefalinger.

I praksis vil forskjellene i materialer, underlag og stedlige forhold være slik at ingen garanti med hensyn til salgbarhet eller egnethet for et bestemt formål, og heller ikke noe ansvar for eventuelle rettslige forhold overhodet, kan utledes enten fra denne informasjonen, eller fra noen skriftlige anbefalinger, eller fra noen andre råd som tilbys. Brukeren av produktet må teste produktets egnethet for det tiltenkte anvendelsen og hensikten.

Sika forbeholder seg retten til å endre produkttegenskapene. 3.parts opphavsrett må respekteres. Alle ordrer aksepteres i henhold til våre gjeldende salgs- og leveringsbetingelser.

Personvern:

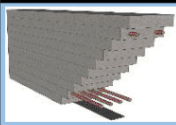
Ved den første aktiveringen og i anledning av eventuell fremtidig programvareoppdatering eller endring av den aktuelle brukerinformasjon, vil dette programmet samle inn, lagre og overføre til Sika registreringsinformasjonen innsendt av deg.

Behandling av personopplysninger skal bare gjøres som formål å administrere lisensiering av programmet. I tillegg, i noen tilfeller kan vi også bruke personopplysninger til å sende brukerne informasjon om oppgraderinger, forbedringer eller undersøkelser om programmet.

Sika beskytter nøye sikkerheten av dine personopplysninger. Du kan endre og modifisere dine personlige data til enhver tid. Sika sletter personopplysninger når alle forbindelser med personlig-databehandling er blitt oppfylt.

© Copyright Sika Services AG 2013

### Test 11-5: Kapasitetsberegning i SLS (T-tverrsnitt med slakkarmering i strekk og trykk).



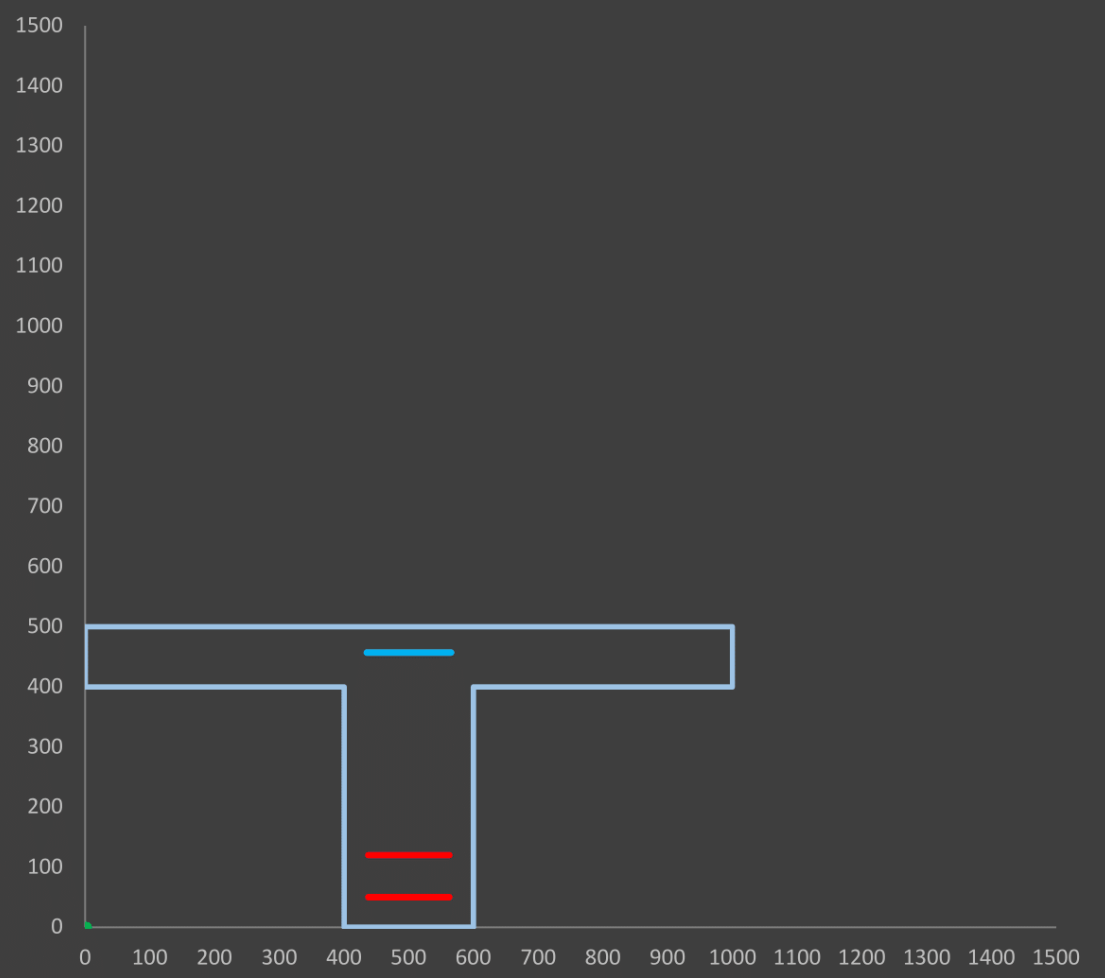
## ConLam

Utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): T

Fyll inn tverrsnittsmål:

T-tverrsnitt		
Effektiv bredde flens	1000	mm
Tykkelse flens, ende	100	mm
Tykkelse flens, midt	100	mm
Bredde steg, bunn	200	mm
Bredde steg, topp	200	mm
Høyde steg	400	mm
Total høyde tverrsnitt	500	mm



## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 37,5$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} = 35$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} = 45$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]
Lag 1	25	4	1963,5	450
Lag 2	25	2	981,7	380
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	16	8	1608,5	43
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	n	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C25/30**

$\gamma_c = 1,5$   
 $\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 25,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = 14,2$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{cm} = 33,0$  N/mm<sup>2</sup>  
 $\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰  
 $\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 31000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 31000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>  
 $f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Spennstål

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$$f_{pk} = \boxed{1700} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = \boxed{1550} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd} = \boxed{1347,8} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = \boxed{1401,7} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = \boxed{195000} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p2} = \boxed{17458} \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning

$$\epsilon_{pud} = \boxed{10,0} \text{ ‰}$$

Dimensjonerende flytetøyning

$$\epsilon_{pd} = \boxed{6,91} \text{ ‰}$$

Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon'_{p0} = \boxed{6,30} \text{ ‰}$$

Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet  $n = \boxed{500}$  antall lameller

Ytre aksialkraft

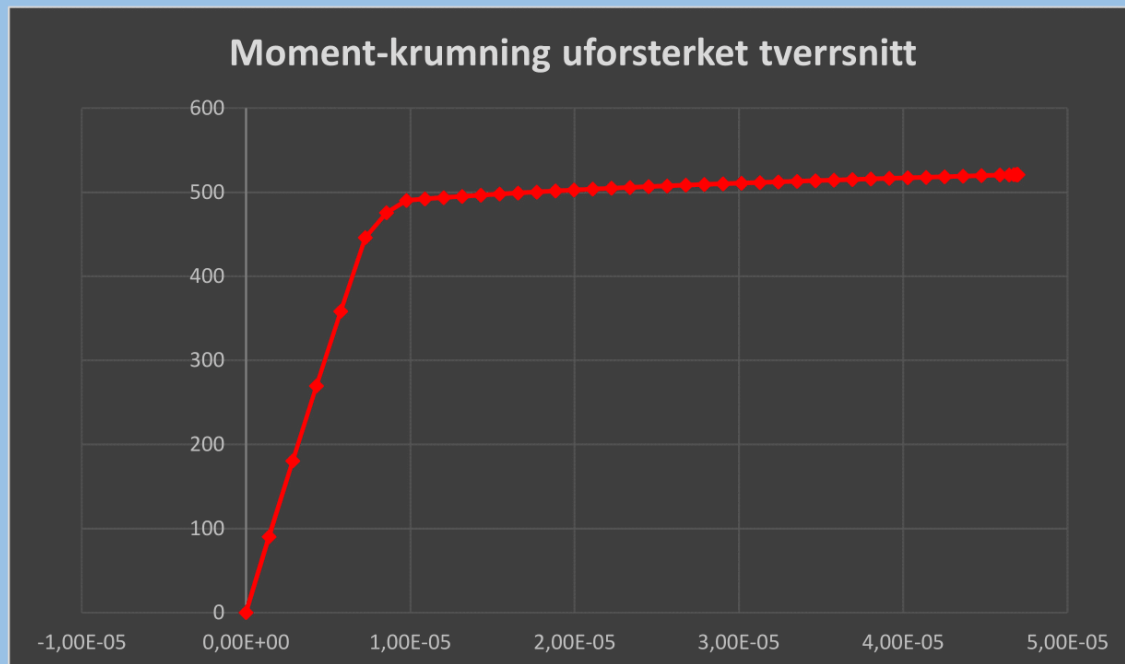
$$P = \boxed{\phantom{00000}} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	521,12	kNm
Krumning	4,697E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	19,98	%	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	%	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	17,64	%	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	14,35	%	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	%	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	%	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	-1,48	%	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	%	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	%	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	%	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	%	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	%	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

	Brudd
Flytning	Ikke brudd
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
Ikke flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-



**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$$M_0 = 100,0 \text{ kNm}$$

Minimumsverdi: 0,0 kNm

Maksimal verdi: 521,1 kNm

**Forsterkningsmateriale**

$$V_{fm} = 1,2$$

Tykkelse laminat

$$t_f = 1,4 \text{ mm}$$

Bredde laminat

$$b_f = 100 \text{ mm}$$

Antall lag

$$n_f = 3 \text{ stk}$$

Areal

$$A_f = 420 \text{ mm}^2$$

$$E_f = 180000 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{fk} = 12,0 \text{ ‰}$$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$$\epsilon_{fd} = 8,00 \text{ ‰}$$

## Vedlegg C

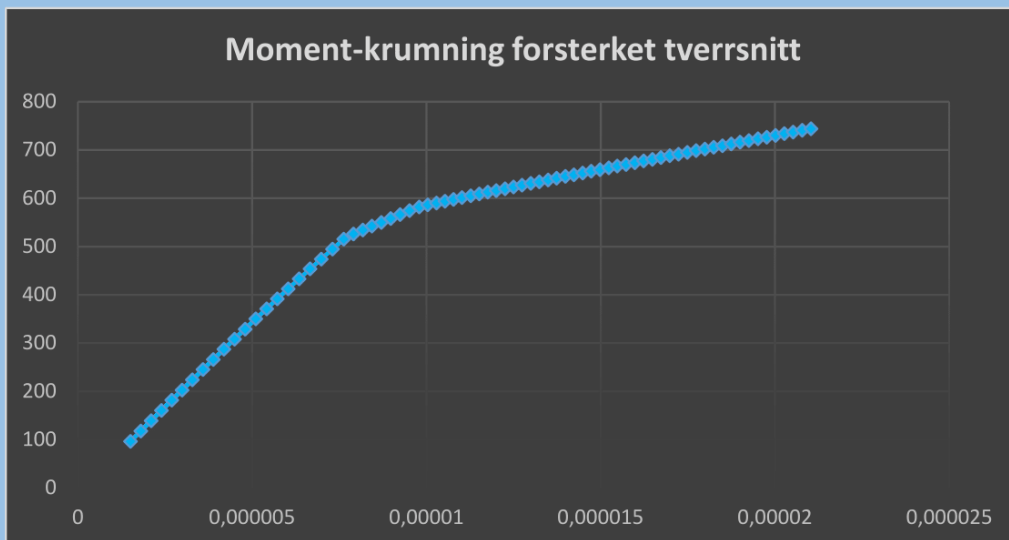
### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = 0,5355 \text{ ‰}$$

Tøyning i underkant betong ved påføring av utenpåliggende forsterkning.

### Forsterket

Kapasitet	ULS		SLS kar.	SLS TP	
Moment	<b>768,88</b>	kNm	<b>453,88</b>	<b>325,56</b>	kNm
Krumning	2,282E-05		5,797E-06	4,174E-06	
			Armeringstøyning	1,87	1,36
			Armeringsspenning	374,13	271,87
			Betongspenning	-15,00	-11,25



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	8,54	‰	Underkant betong		
$\epsilon_{c,ok}$	-2,88	‰	Overkant betong		Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag1}$	7,39	‰	Strekkarmering, lag1	Flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag2}$	5,80	‰	Strekkarmering, lag2	Flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-1,89	‰	Trykkarmering, lag1	Ikke flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1	-	-
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2	-	-
$\epsilon_f$	8,00	‰	Forsterkningsmateriale		Brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med i ULS: **247,8** kNm

# SIKA® CARBODUR® BEREGNINGS PROGRAMVARE

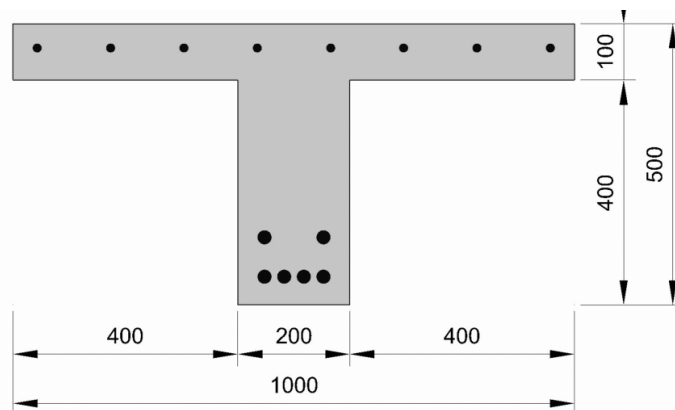
PROSJEKT: MASTEROPPGAVE

ELEMENT: TEST 11-5

## 1 TVERRSNITT OG BETONG

### 1.1 GEOMETRI

Tverrsnitt	T-Bjelke		
Bredde	b	=	1000 mm
	$b_w$	=	200 mm
Høyde	$h_0$	=	100 mm
	h	=	500 mm



### 1.2 BETONG

Betongkvalitet	C25/30		
Middelverdi av betongens trykkfasthet	$f_{cm}$	=	33 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_c$	=	1,50

## Vedlegg C

### 2 ARMERING

#### 2.1 ARMERINGSTÅL

E-modul	$E_s$	=	200000 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_s$	=	1,15

#### 2.2 FORSTERKNINGS LAG

Topplag	$d_2$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	43 mm	B500	500 MPa		8 $\times$ 16 mm

Bunnlaget	$d_1$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	50 mm	B500	500 MPa		4 $\times$ 25 mm
2.	120 mm	B500	500 MPa		2 $\times$ 25 mm

### 3 LASTPÅFØRING

Bøyemoment i forsterkningssonen  $M_0 = 100,00$  kNm

Design last  $M_{s,d} = 750,00$  kNm  
 $M_{ser,ck,d} = 453,88$  kNm  
 $M_{ser,qp,d} = 325,56$  kNm

### 4 RESULTATER

#### 4.1 UARMERT TVERRSNITT, OPPRINNELIG TILSTAND

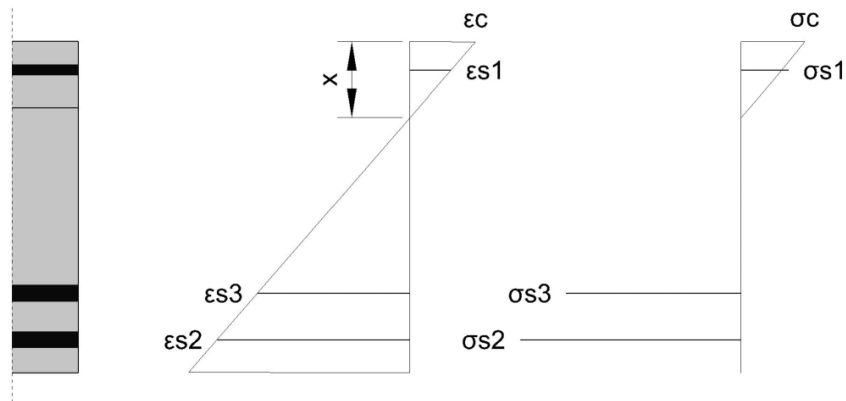
##### 4.1.1 BETONG

Bruddforlengelse  $\epsilon_{c0} = -0,16$  ‰  
Bunnstrekk  $\epsilon_0 = 0,53$  ‰  
Komprimering sone høyde  $x_0 = 115,00$  mm

##### 4.1.2 STÅL

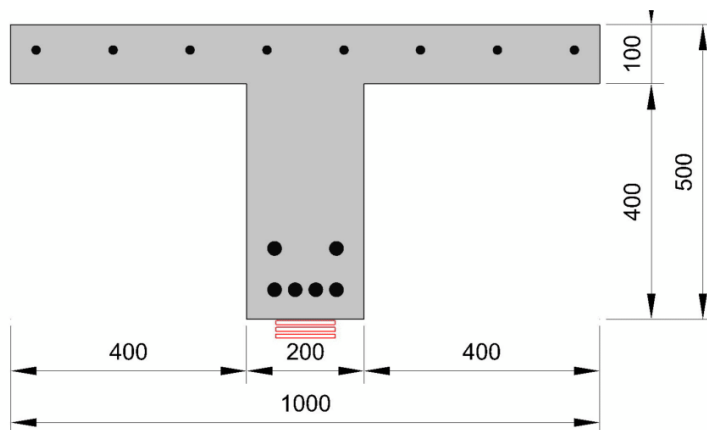
Strekk  $\epsilon_{s1} = -0,10$  ‰  
 $\epsilon_{s2} = 0,47$  ‰  
 $\epsilon_{s3} = 0,37$  ‰

Moment motstand  $M_{Rd,0} = 502,12$  kNm



#### 4.2 VALGT CFRP FORSTERKNING

Laminat	Sika® CarboDur® E1014
Bristepunktet	$f_{lk} = 1940,00 \text{ N/mm}^2$
E- modul	$E_{lk} = 180,00 \text{ kN/mm}^2$
Bruddstyrke	$\epsilon_{lu} = 12,00 \text{ ‰}$
	$\epsilon_{eff} = 8,00 \text{ ‰}$
Materialfaktor	$\gamma_l = 1,20$
Laminat bredde	$b_f = 100 \text{ mm}$
Laminat tykkelse	$t_f = 1,40 \text{ mm}$
Laminat overflate	$A_f = 140,00 \text{ mm}^2$
Nummer	$n = 3$
Totalt område	$A_f = 420,00 \text{ mm}^2$



## Vedlegg C

### 4.3 ANALYSE AV ULS, FORSTERKEDE KOMPONENT

#### 4.3.1 BETONG

Komprimering sone høyde	$x$	=	125,00 mm
Strekk i topp	$\epsilon_c$	=	-2,83 ‰
Strekk i bunn	$\epsilon$	=	8,51 ‰
Toppsspennning	$\sigma_c$	=	14,17 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.2 FORSTERKNINGS LAG

##### 1. Lag

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	-1,87 ‰
Spennning	$\sigma_{s1}$	=	-373,85 N/mm <sup>2</sup>

##### 2. Lag

Strekk	$\epsilon_{s2}$	=	7,40 ‰
Spennning	$\sigma_{s2}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

##### 3. Lag

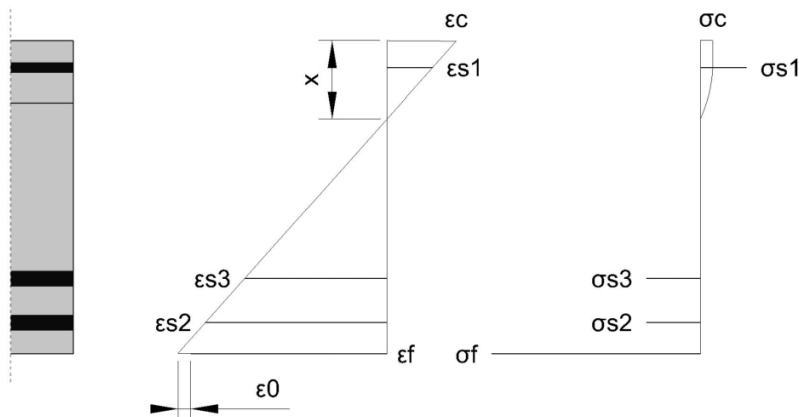
Strekk	$\epsilon_{s3}$	=	5,80 ‰
Spennning	$\sigma_{s3}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.3 LAMINAT

Strekk	$\epsilon_f$	=	8,00 ‰
Spennning	$\sigma_f$	=	1439,94 N/mm <sup>2</sup>
Nødvendig tverrsnitt	$A_f$	=	420,00 mm <sup>2</sup>

#### 4.3.4 DUKTILITETEN

Relativ dybde på kompresjonsone	$\zeta$	=	0,33
Maks anbefaling	$\zeta_{max}$	=	0,45



#### 4.4 SERVICEVENNLIG (SJELDNE LASTER)

##### 4.4.1 BETONG

Komprimering sone høyde	$x$	=	127,00 mm
Strekk i topp	$\epsilon_c$	=	-0,74 ‰
Strekk i bunn	$\epsilon$	=	2,16 ‰
Toppsspennning	$\sigma_c$	=	15,00 N/mm <sup>2</sup>
Tillatt betong belastning	$\sigma_{cd}$	=	15,00 N/mm <sup>2</sup>

##### 4.4.2 FORSTERKNINGS LAG

###### 1. Lag

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	-0,49 ‰
Spennning	$\sigma_{s1}$	=	-98,14 N/mm <sup>2</sup>
Tillatt stål belastning	$\sigma_{rd}$	=	400,00 N/mm <sup>2</sup>

###### 2. Lag

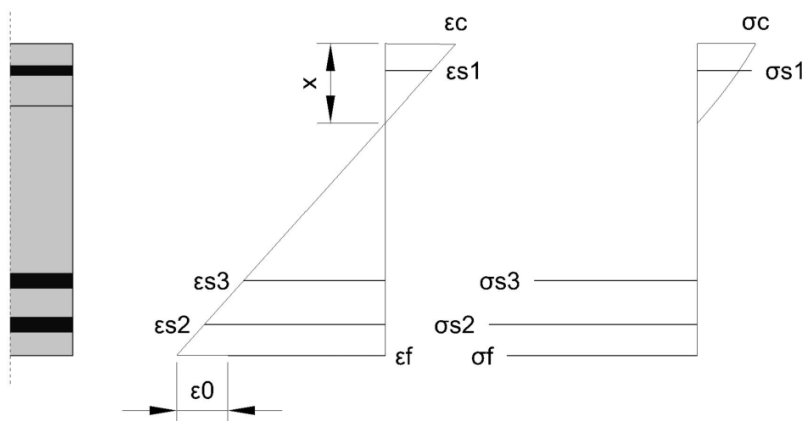
Strekk	$\epsilon_{s2}$	=	1,88 ‰
Spennning	$\sigma_{s2}$	=	375,42 N/mm <sup>2</sup>
Tillatt stål belastning	$\sigma_{rd}$	=	400,00 N/mm <sup>2</sup>

###### 3. Lag

Strekk	$\epsilon_{s3}$	=	1,47 ‰
Spennning	$\sigma_{s3}$	=	293,97 N/mm <sup>2</sup>
Tillatt stål belastning	$\sigma_{rd}$	=	400,00 N/mm <sup>2</sup>

##### 4.4.3 LAMINAT

Strekk	$\epsilon_f$	=	1,63 ‰
Spennning	$\sigma_f$	=	294,09 N/mm <sup>2</sup>



## Vedlegg C

### 4.5 SERVICEVENNLIG (KVASI PERMANENTE LASTER)

#### 4.5.1 BETONG

Komprimering sone høyde	$x$	=	189,00 mm
Strekk i topp	$\epsilon_c$	=	-1,44 ‰
Strekk i bunn	$\epsilon$	=	2,38 ‰
Toppsspennning	$\sigma_c$	=	10,55 N/mm <sup>2</sup>
Tillatt betong belastning	$\sigma_{cd}$	=	11,25 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.5.2 FORSTERKNINGS LAG

##### 1. Lag

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	-1,12 ‰
Spenning	$\sigma_{s1}$	=	-223,49 N/mm <sup>2</sup>
Tillatt stål belastning	$\sigma_{rd}$	=	400,00 N/mm <sup>2</sup>

##### 2. Lag

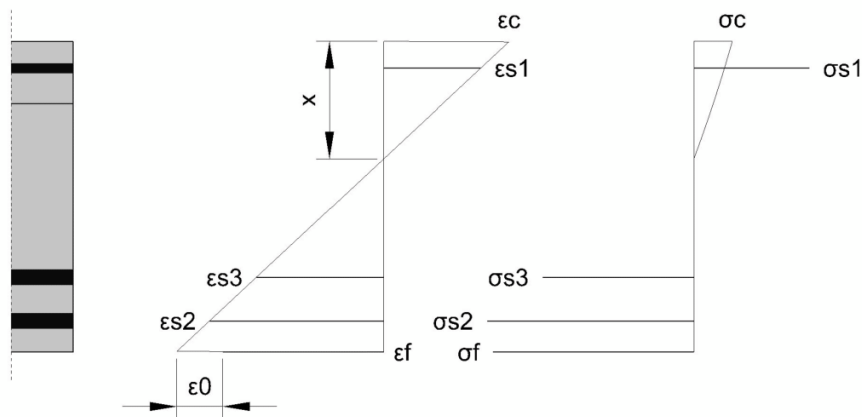
Strekk	$\epsilon_{s2}$	=	2,00 ‰
Spenning	$\sigma_{s2}$	=	399,98 N/mm <sup>2</sup>
Tillatt stål belastning	$\sigma_{rd}$	=	400,00 N/mm <sup>2</sup>

##### 3. Lag

Strekk	$\epsilon_{s3}$	=	1,46 ‰
Spenning	$\sigma_{s3}$	=	292,75 N/mm <sup>2</sup>
Tillatt stål belastning	$\sigma_{rd}$	=	400,00 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.5.3 LAMINAT

Strekk	$\epsilon_f$	=	1,85 ‰
Spenning	$\sigma_f$	=	332,78 N/mm <sup>2</sup>
Tillatt belastning på laminatet	$\sigma_{rf}$	=	1164,00 N/mm <sup>2</sup>





**4.6 OVERSIKT****4.6.1 BØYESTREKKFASTHET – RESULTAT**

Nødvendig laminat tverrsnitt	$A_f$	=	400,00 mm <sup>2</sup>
Tverrsnitt av de valgte laminater	$A_f$	=	420,00 mm <sup>2</sup>

**4.6.2 BÆREEVNE BEVIS (ULS)**

Momentmotstand før forsterkning	$M_{rd,0}$	=	502,12 kNm
Momentmotstand etter forsterkning	$M_{rd}$	=	762,81 kNm
Forsterknings grad	$M_{rd}/M_{rd,0}$	=	1,52

**4.6.3 SERVICEVENNLIG (SJELDNE LASTER)**

Momentmotstand før forsterkning	$M_{ser,ck,0}$	=	426,85 kNm
Momentmotstand etter forsterkning	$M_{ser,ck}$	=	455,55 kNm

**4.6.4 SERVICEVENNLIG (KVASI PERMANENTE LASTER)**

Momentmotstand før forsterkning	$M_{ser,qp,0}$	=	414,16 kNm
Momentmotstand etter forsterkning	$M_{ser,qp}$	=	474,91 kNm

**5 BEMERKNINGER**

## ANSVARFRASKRIVELSE

DENNE PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE ER KUN MENT FOR Å BRUKES AV PROFESJONELLE BRUKERE MED SPESIALKOMPETANSE INNENFOR DEN TILSIKTEDE ANVENDELSEN. BRUKERE MÅ SELV KONTROLLERE RESULTATENE FØR BRUK OG TA HENSYN TIL BYGGEPLASSEN OG PÅFØRINGSFORHOLDENE, PRODUKTINFORMASJON OG LITTERATUR, TEKNIKS „STATE OF THE ART“, SÅ VEL SOM LOKALE GJELDENE STANDARDER OG FORSKRIFTER.

Med hensyn til programvaren og resultatene som fremkommer fra dets benyttelse, GIR SIKKA INGEN GARANTIER FOR NØYAKTIGHET, PÅLITELIGHET, FULLSTENDIGHET, SALGBARHET ELLER EGNETHET FOR NOE FORMÅL. PROGRAMVAREN ER LEVERT PÅ EN "AS-IS" BASIS OG SIKKA FRASKRIVER UTTRYKkelig ENHVER GARANTI I FORHOLD TIL PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE.

Sika shall not be liable for any consequential, punitive, incidental, exemplary, or special damages (including but not limited to loss of business opportunity or loss of profit) arising out of the evaluation or use of the software application and results derived from its use.

Sika er ikke ansvarlig for eventuelle følgeskader, strafferettslige, tilfeldige, eksemplariske, eller spesielle skader (inkludert, men ikke begrenset til, tap av forretningsmulighet eller tap av fortjeneste) som følge av evalueringen eller bruk av programvaren og resultatene som fremkommer ved det benyttelse.

Informasjonen, og i særdeleshet anbefalingene i forbindelse med montering og sluttbruk av Sika produkter, er gitt i god tro, basert på Sikas inneværende kunnskap og erfaring med produktene når de er riktig lagret, behandlet og benyttet under normale forhold i henhold til Sika anbefalinger.

I praksis vil forskjellene i materialer, underlag og stedlige forhold være slik at ingen garanti med hensyn til salgbarhet eller egnethet for et bestemt formål, og heller ikke noe ansvar for eventuelle rettslige forhold overhodet, kan utledes enten fra denne informasjonen, eller fra noen skriftlige anbefalinger, eller fra noen andre råd som tilbys. Brukeren av produktet må teste produktets egnethet for det tiltenkte anvendelsen og hensikten.

Sika forbeholder seg retten til å endre produkttegenskapene. 3.parts opphavsrett må respekteres. Alle ordrer aksepteres i henhold til våre gjeldende salgs- og leveringsbetingelser.

Personvern:

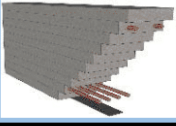
Ved den første aktiveringen og i anledning av eventuell fremtidig programvareoppdatering eller endring av den aktuelle brukerinformasjon, vil dette programmet samle inn, lagre og overføre til Sika registreringsinformasjonen innsendt av deg.

Behandling av personopplysninger skal bare gjøres som formål å administrere lisensiering av programmet. I tillegg, i noen tilfeller kan vi også bruke personopplysninger til å sende brukerne informasjon om oppgraderinger, forbedringer eller undersøkelser om programmet.

Sika beskytter nøye sikkerheten av dine personopplysninger. Du kan endre og modifisere dine personlige data til enhver tid. Sika sletter personopplysninger når alle forbindelser med personlig-databehandling er blitt oppfylt.

© Copyright Sika Services AG 2013

## Test 11-6: Kapasitetsberegning i ULS, dekkestripe med slakkarmering i strekk og trykk.



## ConLam

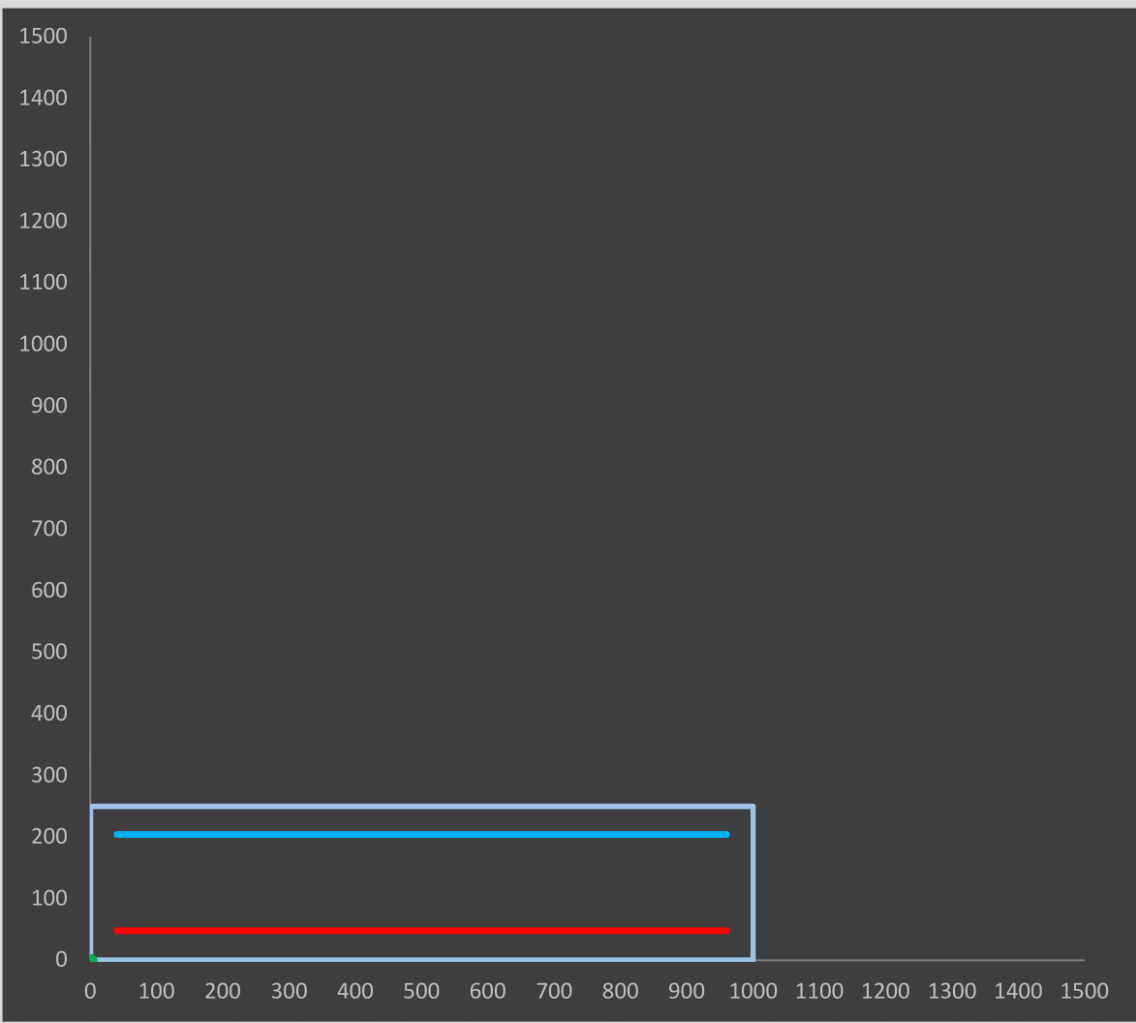
Utviklet av Eivind A. R. Kvinge & Espen Randen

Velg tverrsnittstype (rektangulært eller T-tverrsnitt): Rektangel

Fyll inn tverrsnittsmål:

**Rektangulært tverrsnitt**

Bredde	1000	mm
Høyde	250	mm

## Vedlegg C

Overdekning strekkarmering  $c_{\text{nom.strekk}} = 40$  mm  
 Overdekning trykkarmering  $c_{\text{nom.trykk}} = 40$  mm

Fri vertikalavstand (strekklag)  $a_{\text{v.strekk}} =$  mm  
 Fri vertikalavstand (trykklag)  $a_{\text{v.trykk}} =$  mm

### Slakkarmering

Strekk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]
Lag 1	16	6	1206,4	202
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

Trykk				
	$\varnothing$ [mm]	n	$A_{st}$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [mm]
Lag 1	12	6	678,6	46
Lag 2			0,0	0
Lag 3			0,0	0
Lag 4			0,0	0

### Spennarmering

	$A_{p,1}$ [mm <sup>2</sup> ]	n	$A_p$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_p$ [mm]
Lag 1			0,0	
Lag 2			0,0	

### Betong

Kvalitet **C35/45**

$\gamma_c = 1,5$

$\alpha_{cc} = 0,85$

$f_{ck} = 35,0$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cd} = 19,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm} = 43,0$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{c2} = 2,0$  ‰

$\epsilon_{cu2} = 3,5$  ‰

$E_{cm} = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

Selvvalgt E-modul,  $E'_c =$  N/mm<sup>2</sup>

E-modul som benyttes ved beregning av bøyestivhet,  $E_c = 34000$  N/mm<sup>2</sup>

### Armeringsstål

$\gamma_s = 1,15$

$f_{yk} = 500$  N/mm<sup>2</sup>

$f_{yd} = 434,8$  N/mm<sup>2</sup>

$f_t = 600$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd1} = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

$E_{sd2} = 1194$  N/mm<sup>2</sup>

$\epsilon_{ud} = 30,0$  ‰

$\epsilon_{uk} = 75,0$  ‰

$\epsilon_{yd} = 2,17$  ‰

## Spennstål

$$\gamma_s = \boxed{1,15}$$

$$f_{pk} = \boxed{1700} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{p0,1k} = \boxed{1550} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd} = \boxed{1347,8} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{pd,maks} = 1,04 * f_{p0,1k} / \gamma_s = \boxed{1401,7} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p1} = \boxed{195000} \text{ N/mm}^2$$

$$E_{p2} = \boxed{17458} \text{ N/mm}^2$$

Dimensjonerende brudtøyning

$$\epsilon_{pud} = \boxed{10,0} \text{ ‰}$$

Dimensjonerende flytetøyning

$$\epsilon_{pd} = \boxed{6,91} \text{ ‰}$$

Oppspenningstøyning inkl. tap

$$\epsilon'_{p0} = \boxed{6,30} \text{ ‰}$$

## Lamellinndeling av tversnitt (hele høyden):

Ønsket nøyaktighet

$$n = \boxed{500} \text{ antall lameller}$$

## Ytre aksialkraft

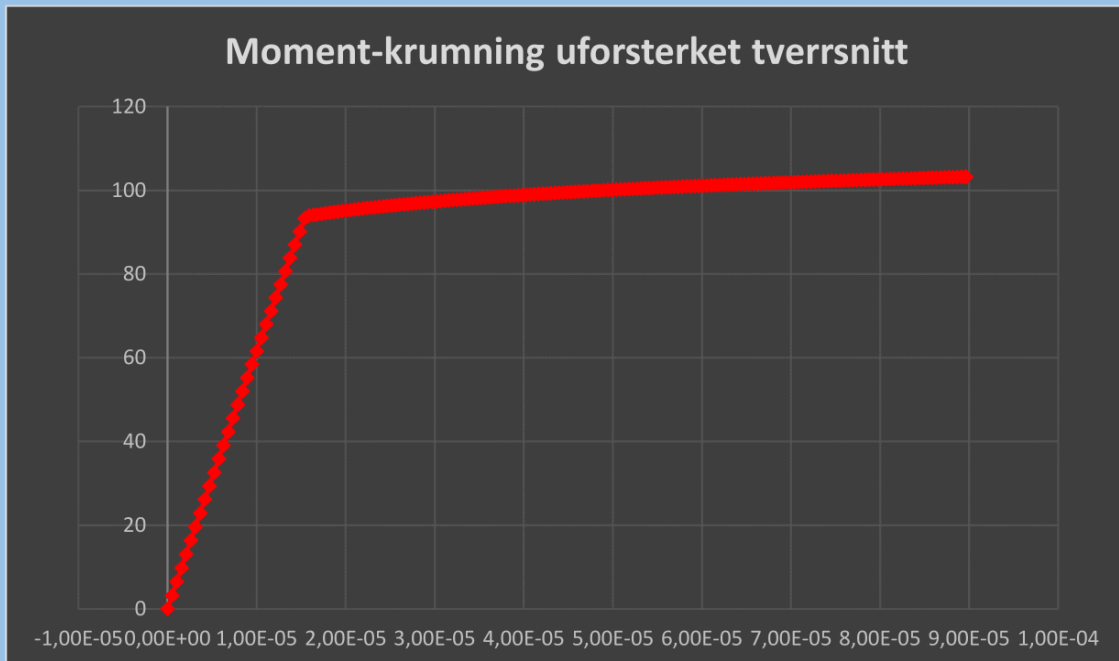
$$P = \boxed{\phantom{0000}} \text{ kN}$$

Legg kun inn trykkraft. Denne tastes inn med positiv verdi.

## Vedlegg C

### Kapasitet ULS, uforsterket

Moment	<b>103,27</b>	kNm
Krumning	8,965E-05	



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	18,91	‰	Underkant betong
$\epsilon_{c,ok}$	-3,50	‰	Overkant betong
$\epsilon_{s,lag1}$	14,61	‰	Strekkarmering, lag1
$\epsilon_{s,lag2}$	-	‰	Strekkarmering, lag2
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4
$\epsilon_{st,lag1}$	0,62	‰	Trykkarmering, lag1
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2

\*Negativ verdi er stukning

Brudd	
Flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
Ikke flytning	Ikke brudd
-	-
-	-
-	-
-	-
-	-

**Initialtilstand**

Last ved påføring av forsterkning, initialmoment (karakteristiske verdier)

$$M_0 = 25,0 \text{ kNm}$$

Minimumsverdi: 0,0 kNm

Maksimal verdi: 103,3 kNm

**Forsterkningsmateriale**

$$\gamma_{fm} = 1,2$$

Tykkelse laminat

$$t_f = 1,4 \text{ mm}$$

Bredde laminat

$$b_f = 120 \text{ mm}$$

Antall lag

$$n_f = 1 \text{ stk}$$

Areal

$$A_f = 168 \text{ mm}^2$$

$$E_f = 180000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{fk} = 12,0 \text{ ‰}$$

Valgt dimensjonerende tøyningsgrense (ofte anbefalt av leverandør):

$$\varepsilon_{fd} = 8,00 \text{ ‰}$$

## Vedlegg C

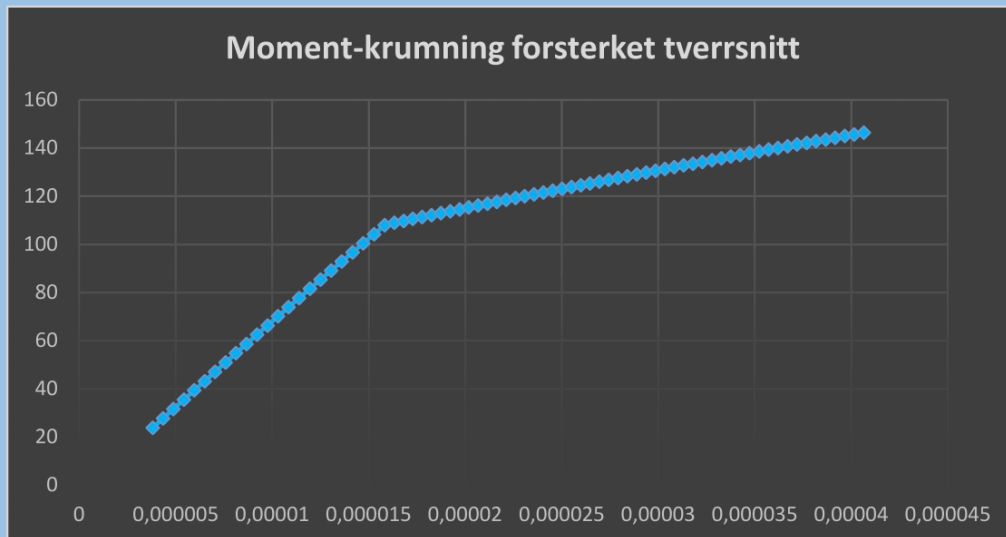
### Initialtøyning

$$\epsilon_{uk,initial} = 0,7287 \text{ ‰}$$

Tøyning i underkant betong ved påføring av utenpåliggende forsterkning.

### Forsterket

Kapasitet	ULS		SLS kar.	SLS TP	
Moment	151,24	kNm	0,00	0,00	kNm
Krumning	4,413E-05				



### Tøyninger

$\epsilon_{c,uk}$	8,73	‰	Underkant betong		
$\epsilon_{c,ok}$	-2,30	‰	Overkant betong		Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag1}$	6,61	‰	Strekkarmering, lag1	Flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{s,lag2}$	-	‰	Strekkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{s,lag3}$	-	‰	Strekkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{s,lag4}$	-	‰	Strekkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{st,lag1}$	-0,27	‰	Trykkarmering, lag1	Ikke flytning	Ikke brudd
$\epsilon_{st,lag2}$	-	‰	Trykkarmering, lag2	-	-
$\epsilon_{st,lag3}$	-	‰	Trykkarmering, lag3	-	-
$\epsilon_{st,lag4}$	-	‰	Trykkarmering, lag4	-	-
$\epsilon_{p,1}$	-	‰	Spennarmering, lag1	-	-
$\epsilon_{p,2}$	-	‰	Spennarmering, lag2	-	-
$\epsilon_f$	8,00	‰	Forsterkningsmateriale		Brudd

\*Negativ verdi er stukning

### Konklusjon

Momentkapasiteten til konstruksjonselementet kan økes med i ULS: **48,0** kNm  
 Forsterkningsgrad: **1,46**



# SIKA® CARBODUR® BEREGNINGS PROGRAMVARE

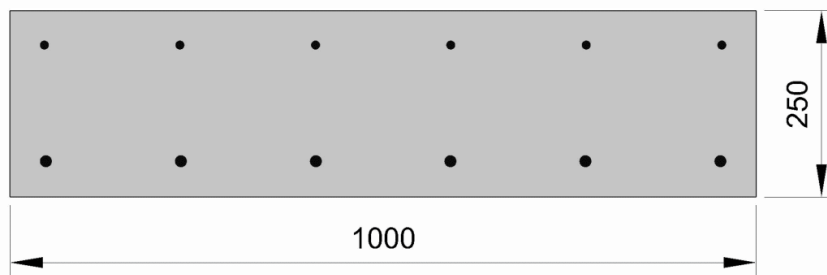
PROSJEKT: MASTEROPPGAVE

ELEMENT: TEST 11-6

## 1 TVERRSNITT OG BETONG

### 1.1 GEOMETRI

Tverrsnitt	Dekke		
Bredde	b	=	1000 mm
Høyde	h	=	250 mm



### 1.2 BETONG

Betongkvalitet	C35/45		
Middelverdi av betongens trykkfasthet	$f_{cm}$	=	43 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_c$	=	1,50

## Vedlegg C

### 2 ARMERING

#### 2.1 ARMERINGSTÅL

E- modul	$E_s$	=	200000 N/mm <sup>2</sup>
Materialfaktor	$\gamma_s$	=	1,15

#### 2.2 FORSTERKNINGS LAG

Topplag	$d_2$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	46 mm	B500	500 MPa		6 $\times$ 12 mm

Bunnlaget	$d_1$	Stål	$f_{yk}$	Areal	Nummer $\times d_s$
1.	48 mm	B500	500 MPa		6 $\times$ 16 mm

### 3 LASTPÅFØRING

Bøyemoment i forsterkningssonen	$M_0$	=	25,00 kNm
---------------------------------	-------	---	-----------

Design last	$M_{s,d}$	=	150,00 kNm
-------------	-----------	---	------------

### 4 RESULTATER

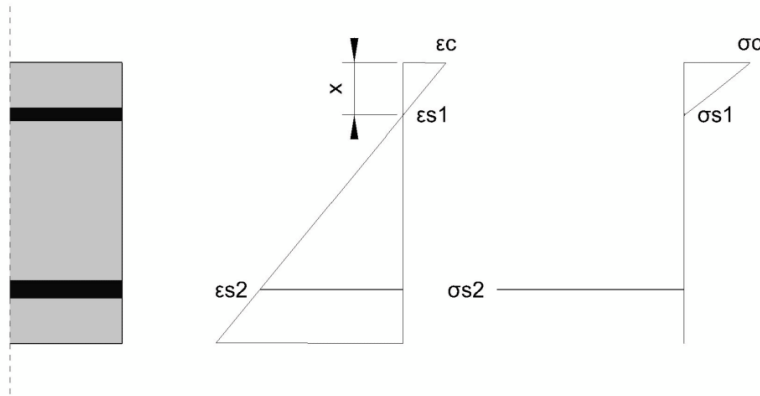
#### 4.1 UARMERT TVERRSNITT, OPPRINNELIG TILSTAND

##### 4.1.1 BETONG

Bruddforlengelse	$\epsilon_{c0}$	=	-0,17 ‰
Bunnstrekk	$\epsilon_0$	=	0,73 ‰
Komprimering sone høyde	$X_0$	=	46,50 mm

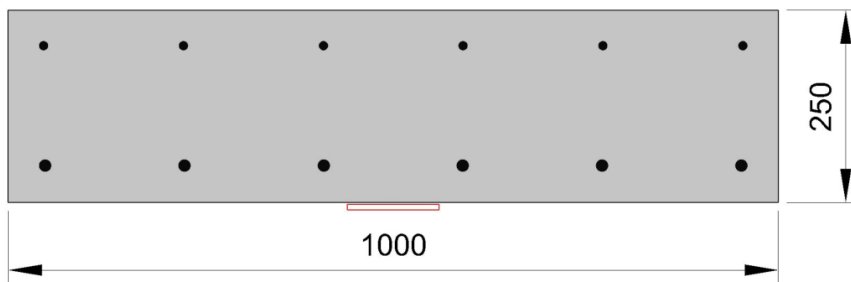
##### 4.1.2 STÅL

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	0,00 ‰
	$\epsilon_{s2}$	=	0,56 ‰
Moment motstand	$M_{Rd,0}$	=	100,38 kNm



#### 4.2 VALGT CFRP FORSTERKNING

Laminat	Sika® CarboDur® E1214
Bristepunktet	$f_{lk} = 1940,00 \text{ N/mm}^2$
E- modul	$E_{lk} = 180,00 \text{ kN/mm}^2$
Bruddstyrke	$\epsilon_{lu} = 12,00 \text{ ‰}$
	$\epsilon_{eff} = 8,00 \text{ ‰}$
Materialfaktor	$\gamma_l = 1,20$
Laminat bredde	$b_f = 120 \text{ mm}$
Laminat tykkelse	$t_f = 1,40 \text{ mm}$
Laminat overflate	$A_f = 168,00 \text{ mm}^2$
Nummer	$n = 1$
Totalt område	$A_f = 168,00 \text{ mm}^2$



## Vedlegg C

### 4.3 ANALYSE AV ULS, FORSTERKEDE KOMPONENT

#### 4.3.1 BETONG

Komprimering sone høyde	$x$	=	51,50 mm
Strekk i topp	$\epsilon_c$	=	-2,27 ‰
Strekk i bunn	$\epsilon$	=	8,70 ‰
Toppsspennning	$\sigma_c$	=	19,83 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.2 FORSTERKNINGS LAG

##### 1. Lag

Strekk	$\epsilon_{s1}$	=	-0,26 ‰
Spennning	$\sigma_{s1}$	=	-52,61 N/mm <sup>2</sup>

##### 2. Lag

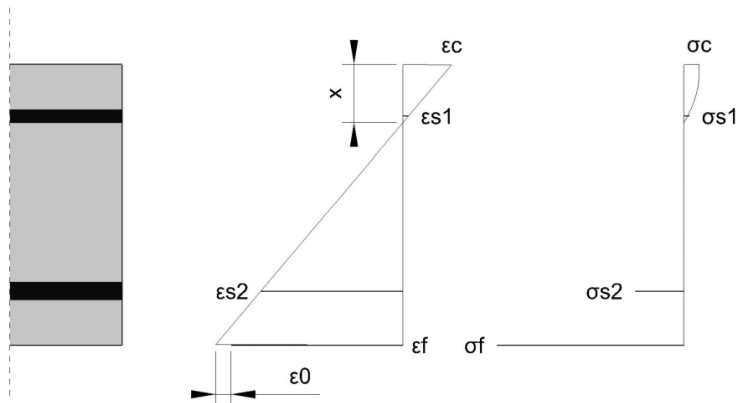
Strekk	$\epsilon_{s2}$	=	6,61 ‰
Spennning	$\sigma_{s2}$	=	434,78 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.3.3 LAMINAT

Strekk	$\epsilon_f$	=	8,00 ‰
Spennning	$\sigma_f$	=	1439,70 N/mm <sup>2</sup>
Nødvendig tverrsnitt	$A_f$	=	168,00 mm <sup>2</sup>

#### 4.3.4 DUKTILITETEN

Relativ dybde på kompresjonszone	$\zeta$	=	0,25
Maks anbefaling	$\zeta_{max}$	=	0,45



#### 4.4 OVERSIKT

##### 4.4.1 BØYESTREKKFASTHET – RESULTAT

Nødvendig laminat tverrsnitt	$A_f$	=	168,00 mm <sup>2</sup>
Tverrsnitt av de valgte laminater	$A_f$	=	168,00 mm <sup>2</sup>

##### 4.4.2 BÆREEVNE BEVIS (ULS)

Momentmotstand før forsterkning	$M_{rd,0}$	=	100,38 kNm
Momentmotstand etter forsterkning	$M_{rd}$	=	150,19 kNm
Forsterknings grad	$M_{rd}/M_{rd,0}$	=	1,50

## 5 BEMERKNINGER

- Laminatene bør fordeles jevnt over hele platebredden. Den maksimale aksial avstand mellom laminatene bør ikke overstige følgende verdier:
  - 20% av spennet (40% av brakettarmen lengde)
  - 5x platetykkelse

## ANSVARSFRAKRIVELSE

DENNE PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE ER KUN MENT FOR Å BRUKES AV PROFESJONELLE BRUKERE MED SPESIALKOMPETANSE INNENFOR DEN TILSIKTEDE ANVENDELSEN. BRUKERE MÅ SELV KONTROLLERE RESULTATENE FØR BRUK OG TA HENSYN TIL BYGGEPLASSEN OG PÅFØRINGSFORHOLDENE, PRODUKTINFORMASJON OG LITTERATUR, TEKNISKS „STATE OF THE ART“, SÅ VEL SOM LOKALE GJELDENE STANDARDER OG FORSKRIFTER.

Med hensyn til programvaren og resultatene som fremkommer fra dets benyttelse, GIR SIKÅ INGEN GARANTIER FOR NØYAKTIGHET, PÅLITELIGHET, FULLSTENDIGHET, SALGBARHET ELLER EGNETHET FOR NOE FORMÅL. PROGRAMVAREN ER LEVERT PÅ EN "AS-IS" BASIS OG SIKÅ FRASKRIVER UTTRYKKELEG ENHVER GARANTI I FORHOLD TIL PROGRAMVAREN OG RESULTATENE SOM FREMKOMMER FRA DETS BENYTTELSE.

Sika shall not be liable for any consequential, punitive, incidental, exemplary, or special damages (including but not limited to loss of business opportunity or loss of profit) arising out of the evaluation or use of the software application and results derived from its use.

Sika er ikke ansvarlig for eventuelle følgeskader, strafferettslige, tilfeldige, eksemplariske, eller spesielle skader (inkludert, men ikke begrenset til, tap av forretningsmulighet eller tap av fortjeneste) som følge av evalueringen eller bruk av programvaren og resultatene som fremkommer ved det benyttelse.

Informasjonen, og i særdeleshet anbefalingene i forbindelse med montering og sluttbruk av Sika produkter, er gitt i god tro, basert på Sikas inneværende kunnskap og erfaring med produktene når de er riktig lagret, behandlet og benyttet under normale forhold i henhold til Sika anbefalinger.

I praksis vil forskjellene i materialer, underlag og stedlige forhold være slik at ingen garanti med hensyn til salgbarhet eller egnethet for et bestemt formål, og heller ikke noe ansvar for eventuelle rettslige forhold overhodet, kan utledes enten fra denne informasjonen, eller fra noen skriftlige anbefalinger, eller fra noen andre råd som tilbys. Brukeren av produktet må teste produktets egnethet for det tiltenkte anvendelsen og hensikten.

Sika forbeholder seg retten til å endre produkttegenskapene. 3.parts opphavsrett må respekteres. Alle ordrer aksepteres i henhold til våre gjeldende salgs- og leveringsbetingelser.

Personvern:

Ved den første aktiveringen og i anledning av eventuell fremtidig programvareoppdatering eller endring av den aktuelle brukerinformasjon, vil dette programmet samle inn, lagre og overføre til Sika registreringsinformasjonen innsendt av deg.

Behandling av personopplysninger skal bare gjøres som formål å administrere lisensiering av programmet. I tillegg, i noen tilfeller kan vi også bruke personopplysninger til å sende brukerne informasjon om oppgraderinger, forbedringer eller undersøkelser om programmet.

Sika beskytter nøye sikkerheten av dine personopplysninger. Du kan endre og modifisere dine personlige data til enhver tid. Sika sletter personopplysninger når alle forbindelser med personlig-databehandling er blitt oppfylt.

© Copyright Sika Services AG 2013