

BETONGKONSTRUKSJONERS LIVSLØP

Et utviklingsprosjekt i samarbeid mellom offentlige byggherrer, industri og forskningsinstitutter



Deltakere:

Statens vegvesen (prosjektledelse), Forsvarsbygg, NORCEM A.S, Selmer Skanska AS, Sika Norge AS, Norges byggforskningsinstitutt, NTNU, SINTEF, NORUT Teknologi as

Rapport nr. 13

Forsterkning av betongsøyler med karbonfibervev.

Aktivitet DP2 B2

Prosjektet er støttet av BA-programmet i Norges forskningsråd

BETONGKONSTRUKSJONERS LIVSLØP

Rapport nr. 13

Forsterkning av betongsøyler med
karbonfibervev

Aktivitet DP2 B2

Utgiver:

Statens vegvesen, Vegdirektoratet
Postadresse: Teknologivdelingen
Postboks 8142 Dep
0033 OSLO
Telefon: 02030
Telefaks: 22 07 38 66

FORFATTER(E):

Thorenfeldt, E., Øverli, Jan Arve
SINTEF Bygg og miljøteknikk, Sement og betong

INTERN RAPPORT NR.

GRADERING

Åpen

ANTALL SIDER OG BILAG

14+22+3 vedl.

RAPPORTNR./ ISBN.:

82-91228-18-3

DATO

Desember 2006

PROSJEKTLEDERE:

Finn Fluge og Bernt Jakobsen

KORT SAMMENDRAG

Rapporten beskriver gjennomføring og resultater fra prøvebelastning av armerte betongsøyler med og uten pålimt karbonfibervev av typen SIKA Wrap med lagtykkelse 0,13 mm. Prøvingen omfattet sentrisk belastning av fire søyler med sirkulært tverrsnitt, diameter 330 mm og lengde 2,3 m. Alle søylene hadde lengdearmring bestående av 6Ø25 mm kamstål som var skjøtt i midtområdet med omfaringslengde 300 mm. Den valgte skjøtlengden var bare ¼ av minimum standard omfaringslengde for den aktuelle armeringen og kan oppfattes som en svekkelse av det armerte betongtverrsnittet. Karbonfibervevet var limt kant i kant og dekket 900 mm av midtområdet.

Hovedhensikten med forsøkene var å sammenligne søylenes kapasitet og undersøke om moderate mengder pålimt karbonfibervev kan kompensere for manglende stålbøyler og eventuelt forsterke søylene.

Forsøk og analyse viste at den korte armeringsskjøten førte til skade på betongtverrsnittet i søylen som ikke var forsterket. Søylen med en moderat mengde stålbøyler i skjøtområdet fikk sammenlignet med søylen uten bøyler en ubetydelig kapasitetsøkning, men bruddet ble mer duktilt. Virkningen av karbonfibervev var betydelig. Kapasiteten økte med 20 % ved ett lag karbonfibervev og med 50 % ved to lag. Ved ett lag karbonfibervev skyldes kapasitetsøkningen i særlig grad omsnøringseffekten. Ved to lag økte både betongens og armeringens bidrag til kapasiteten med 50 %. De fiberforsterkede søylene fikk økt duktilitet som følge av økt tøyningsevne før brudd, men bruddet ble mer eksplosivt.

STIKKORD	NORSK	ENGLISH
	Betong	Concrete
	Søyler	Columns
	Forsterkning	Strengthening
	Karbonfibervev	Carbon fibre fabric

Rapport	Nr. 13	Forsterkning av betongsøyler med karbonfibervev.
Prosjekt		Betongkonstruksjoners livsløp Et utviklingsprosjekt i samarbeid mellom offentlige byggherrer, industri og forskningsinstitutter.
Aktivitet	DP2 B2	Vedlikeholds- og oppgraderingsmetoder Oppgraderingsmetoder Instrumenterte laboratorieforsøk med karbonfiberforsterkning
Deltagere		Statens vegvesen (prosjektledelse), Forsvarsbygg, NORCEM A.S, Selmer-Skanska AS Sika Norge AS Norges byggforskningsinstitutt, NTNU, SINTEF, NORUT Teknologi as Prosjektet er støttet av BA-programmet i Norges forskningsråd ISSN 1502-2331 ISBN 82-91228-18-3 50 eksemplarer trykt av Statens vegvesen, Teknologivdelingen © Statens vegvesen 2006
Adresse		Vegdirektoratet, Teknologivdelingen Postboks 8142 Dep N-0033 Oslo, Norway
Telefon		+ 47 02030
Telefax		+ 47 22 07 38 66
Emneord		Betong Søyler Forsterkning Karbonfibervev
Key words		Concrete Columns Strengthening Carbon fibre fabric

FORORD

Fokus er i løpet av de senere årene flyttet fra bygging av nye konstruksjoner over mot forvaltning hvor det legges større vekt på problemstillinger knyttet til drift, vedlikehold og gjenbruk av eksisterende konstruksjoner.

Prosjektet "Betongkonstruksjoners livsløp" er knyttet opp mot denne typen utfordringer som en samlet bygg- og anleggsbransje står overfor. Kravene til bygg- og anleggskonstruksjoner er at de skal være funksjonelle og kostnadseffektive. Offentlige byggherrer forvalter og vedlikeholder et stort antall konstruksjoner som skal møte samfunnets krav til:

- sikkerhet
- kvalitet/økonomi
- miljø

Det ble de siste årene av 90-tallet lagt ned et betydelig arbeid i prosjektet "Bestandige betongkonstruksjoner". Av resultatene fra dette prosjektet og erfaringene fra prosjektet "OFU Gimsøystraumen" fremgår det klart at beslutningen om å bygge bestandige betongkonstruksjoner må tas tidlig i planleggingsfasen og at det er behov for enkelt å kunne verifisere prosjekteringsforutsetningene.

"Betongkonstruksjoners livsløp" bygger videre på forannevnte prosjekter. Hovedvekten er lagt på klart formulerte forskningsoppgaver som dels konkretiserer eksisterende kunnskap og dels fyller hull i kunnskapsgrunnlaget. Aktivitetene er valgt innenfor en ramme som omfatter alle faser fra planlegging til riving og gjenbruk.

Prosjektets hovedmålsetning har vært:

Kostnadseffektive og miljøgunstige betongkonstruksjoner

med følgende delmål:

- Identifisere hovedparametre i levetidsmodellene og kalibrere dem mot feltefaringer
- System for vurdering av vedlikeholdstiltaks levetid
- System for instrumentell overvåking av betongkonstruksjoners tilstandsutvikling
- Kunnskapsformidling gjennom normarbeid, kurs og internasjonale nettverk

Prosjektets sluttprodukter er:

- Grunnlag for veiledninger og regler for levetidsprosjektering
- Akseptkriterier for bedømmelse av betongkonstruksjoners bestandighet
- Datagrunnlag til bruk i standardiseringsarbeid og som inngangsdata til europeisk nettverksarbeid
- Kunnskap og kompetanse knyttet til sensorteknologi, måleteknikk, "intelligent" instrumentell overvåking, katodisk beskyttelse etc., hvor industripartnerne gis mulighet til å utnytte resultatene kommersielt

Prosjektet har bestått av flere større og mindre aktiviteter gruppert i følgende delprosjekter:

- DP1. Levetidsprosjektering
 - A. Datainnsamling
 - B. Levetidsmodeller
- DP2. Vedlikeholds- og oppgraderingsmetoder
 - A. Vedlikeholdsmetoder
 - B. Oppgraderingsmetoder
 - C. Rustfri armering
- DP3. Måleteknikk

Aktivitetene i prosjektet er basert på enkeltforslag fra prosjektdeltakerne. Hvor aktivitetene hadde fellestrekk, kunne levere resultater til, eller benytte resultater fra andre aktiviteter ble dette identifisert ved oppstarten av prosjektet og nødvendig koordinering foretatt. Ellers er aktivitetene styrt meget selvstendig.

Prosjektet startet høsten 1999 og ble avsluttet høsten 2001. Prosjektet har vært støttet av BA-programmet i Norges forskningsråd med NOK 1 mill i hvert av årene 1999 og 2000.

I tillegg til støtten fra Norges forskningsråd har det vært ytet en betydelig egeninnsats fra deltakerne i form av personalinnsats og kjøp av FoU-tjenester. Prosjektkostnadene per 31-12-00 var NOK 7,25 mill, hvorav NOK 2,7 mill var benyttet til kjøp av FoU-tjenester fra forskningsinstitutter og NOK 0,5 mill fra konsulent. I år 2001 ble det kjøpt tjenester for NOK 1,7 mill som i sin helhet ble finansiert av prosjektdeltagerne. Samlede prosjektkostnader ved avslutningen av prosjektet er ca. NOK 9 mill.

Prosjektet har hatt følgende deltakere:

Statens vegvesen
Forsvarsbygg
NORCEM A.S
Selmer Skanska AS
NTNU
SINTEF
Sika Norge AS
Norges byggforskningsinstitutt
NORUT Teknologi as

I tillegg har prosjektet samarbeidet med Det Norske Veritas og ARMINOX, som alle har bidratt med egeninnsats.

Det er knyttet to dr. gradsstudenter til prosjektet.

Prosjektet mottok i juni 2000 et 3 års dr.grad stipendium. Stipendiat ble tilsatt 01-01-2001.

Prosjektet har vært ledet av Vegdirektoratet. Prosjektledelsen, som har bestått av Finn Fluge Vegteknisk avdeling, Vegdirektoratet og Bernt Jakobsen, Aadnesen a.s, har rapportert til en styringskomite som har bestått av representanter fra prosjektdeltakerne. Styringskomiteen har vært samlet to ganger årlig eller ved behov og har fastlagt mål og hovedstrategier.

SUMMARY

The purpose of the investigation was to develop simple methods for strengthening of concrete columns that may be subjected to higher loads than the design loads or that have suffered deteriorations caused by insufficient durability.

Amongst others the columns of Elgeseter bridge have put focus on this issue, since they show significant cracking due to alkali aggregate reactions. Furthermore, expansion of the bridge slab has led to increased loads on some of the columns. The cracks in the columns are wide and represent a risk for ongoing corrosion on the stirrups.

In this situation it has been looked into the possibilities of using externally bonded carbon fibre fabric to prevent further crack development. It will in this connection be beneficial if the carbon fibre fabric also gives a confinement effect that wholly or partly can compensate for lack of stirrups.

The main objective of the project was to investigate the strengthening effect of external, circumferential carbon fibre fabric wrapped and glued to the concrete columns by epoxy. An additional goal was to gain practical experience with the procedures for gluing and impregnation of carbon fibre fabric on site.

The strengthening effect was investigated by load tests on five weeks old reinforced concrete columns of grade C30 with and without bonded carbon fibre fabric. The testing comprised four columns with circular cross-section, diameter 330 mm and 2.3 m length. All columns were reinforced with 6Ø25 mm longitudinal rebars of grade B500C and spliced by 300 mm overlap in the middle of the column length. The columns were wrapped with carbon fibre fabric of the type SIKA Wrap with thickness 1.3 mm and applied on a length of 900 mm at the mid section.

The splice length is about $\frac{1}{4}$ of the minimum required standard overlap and is supposed to represent a weak part of the column.

The four columns showed the following variations in lay-out:

- S1: Column without stirrups in the overlap area
- S2: Column with a limited number of stirrups in the overlap area
- S3: Column with one layer of carbon fibre fabric
- S4: Column with two layer of carbon fibre fabric

The main purpose of the tests was to compare the load bearing capacity of the columns and investigate if the use of moderate amounts of externally applied carbon fibre fabric can compensate for missing stirrups or even strengthen the columns.

The tests showed that the additional number of stirrups in the splice area of column S2 had limited influence on the load bearing capacity of the column. The failure mode was however more ductile for this column than for the column without stirrups in the overlap area.

The effect of externally wrapped carbon fibre fabric was significant. The load bearing capacity increased 20% for the column with one layer of carbon fibre fabric and 50% for the column with two layers. The increase in the capacity for the one layer column is mainly due to the confining effect shown by the increased bearing capacity of the concrete. For the column with the double carbon fibre layer both the concrete and the reinforcement contributed with about 50% increase in load bearing capacity.

The columns strengthened by carbon fibre showed an increase in ductility in terms of significantly increased strains at failure. In the critical area the concrete strain increased from 1.5‰ in the columns without carbon fibres to 5‰ for the column with two layers of carbon fibre. On the other hand the strengthened columns had a much more explosive character in failure, especially when comparing with column S2 where the failure developed more gradually.

Wrapping and gluing carbon fibre fabric onto the concrete surface showed to be a relatively simple operation. When wrapping and gluing it is important that the carbon fibre fabric be evenly applied with a moderate tension in order to avoid folds that would be difficult to even out afterwards.

Common safety measures are to use gloves and glasses.

- Rapport nr. 5:** TITTEL: Statistisk beregning av levetid for betongkonstruksjoner utsatt for kloridinntrengning.
Aktivitet: DP1 B1
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. SINTEF. Rapport nr. STF22 A01613.
Forfattere: Hynne, T., Leira, B.J., Carlsen, J.E. og Lahus, O.
ISSN: 1502-2331
ISBN: 82-91228-10-8
Sider: 14+59+3 vedlegg
Dato: Februar 2003
- Rapport nr. 6:** TITTEL: Dimensjoneringsformat for kloridbestandighet.
Aktivitet: DP1 B1
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. SINTEF. Rapport STF22 A02601.
Forfattere: Leira, B.J.
ISSN: 1502-2331
ISBN: 82-91228-11-6
Sider: 14+36+ 1 vedlegg
Dato: Februar 2003
- Rapport nr. 7:** TITTEL: Pålitelighetsmetodikk ved bruk av FDV og levetidsberegninger.
Aktivitet: DP1 B2
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. Aas-Jakobsen. Rapp 6943-01.
Forfattere: Larsen, R.M.
ISSN: 1502-2331
ISBN: 82-91228-12-4
Sider: 14 + 67
Dato: Februar 2003
- Rapport nr. 8:** TITTEL: Effekt av reparasjon på levetid: Eksempelstudie fra Gimsøystraumen.
Aktivitet: DP1 B3
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. SINTEF. Rapport nr. STF22 A01607.
Forfattere: Hynne, T. og Leira, B.J.
ISSN: 1502-2331
ISBN: 82-91228-13-2
Sider: 12 + 22 + 7 vedlegg
Dato: Oktober 2006

- Rapport nr. 9:** TITTEL: Bestandighet og levetid av reparerte betongkonstruksjoner.
Aktivitet: DP2 A2
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. NORUT Teknologi as rapport NTAS F2001-36.
Forfattere: Arntsen, B.
ISSN: 1502-2331
ISBN: 82-91228-14-0
Sider: 14 + 20
Dato: Oktober 2006
- Rapport nr. 10:** TITTEL: Restlevetid – Kai Sjursøya.
Aktivitet: DP2 A3
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. Selmer Skanska AS, rapport nr. B 01-01.
Forfattere: Carlsen, J.E.
ISSN: 1502-2331
ISBN: 82-91228-15-9
Sider: 12 + 15 + 7 vedlegg
Dato: November 2006
- Rapport nr. 11:** TITTEL: Feltforsøk Sykkylven bru.
Aktivitet: DP2 A4
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. Selmer Skanska AS, rapport nr. B 01-02
Forfattere: Carlsen, J.E.
ISSN: 1502-2331
ISBN: 82-91228-16-7
Sider: 12 + 9 +30
Dato: Desember 2006
- Rapport nr. 12:** TITTEL: Strengthening Prestressed Concrete Beams with Carbon Fiber Polymer Plates.
Aktivitet: DP2 B1
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. NTNU, Institutt for konstruksjonsteknikk.
Forfattere: Takacs, P.F. og Kanstad, T.
ISSN: 1502-2331
ISBN: 82-91228-17-5
Sider: 14 + 46 + 12
Dato: Desember 2006

- Rapport nr. 13:** TITTEL: Forsterking av betongsøyler med karbonfiberrev.
Aktivitet: DP2 B2
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling.
SINTEF. Rapport nr. STF22 A00718.
Forfattere: Thorenfeldt, E.
ISSN 1502-2331
ISBN 82-91228-18-3
Sider: 14 + 22 + 3 vedlegg
Dato: Desember 2006
- Rapport nr. 14:** TITTEL: Forankringskapasitet av CFAP-bånd limt til betong.
Aktivitet: DP2 B2
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling.
SINTEF. Rapport nr. STF22 A01618.
Forfattere: Thorenfeldt, E.
ISSN 1502-2331
ISBN 82-91228-19-1
Sider:
Dato:
- Rapport nr. 15:** TITTEL: Nonlinear Finite Element Analysis of Deteriorated and Repaired RC Beams
Aktivitet: DP2 B3
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling.
NORUT Teknologi as rapport NTAS F2001-31.
Forfattere: Sand, B.
ISSN 1502-2331
ISBN 82-91228-20-5
Sider:
Dato:
- Rapport nr. 16:** TITTEL: Styrkeberegning ved korrosjonsskader.
Aktivitet: DP2 B3
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling.
SINTEF. Rapport nr. STF22 A01619.
Forfattere: Stemland, H.
ISSN 1502-2331
ISBN 82-91228-21-3
Sider:
Dato:

- Rapport nr. 17:** TITTEL: Korrosjonsegenskaper for rustfri armering.
Aktivitet: DP2 C1
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling.
NTNU, Institutt for konstruksjonsteknikk.
Rapport R-9-01.
Forfattere: Vennesland, Ø.
ISSN 1502-2331
ISBN 82-91228-22-1
Sider:
Dato:
- Rapport nr. 18:** TITTEL: Heftforhold for rustfritt armeringsstål.
Aktivitet: DP2 C2
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling.
NTNU rapport.
Forfattere: Hofsøy, A., Sørensen, S.I. og Markeset, G.
ISSN 1502-2331
ISBN 82-91228-24-8
Sider:
Dato:
- Rapport nr. 19:** TITTEL: Service Life Design of Concrete Structures
Aktivitet: DP1 B4
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling.
Forfattere: Helland, S., Maage, M., Smeplass, S., Fluge, F.
ISSN 1502-2331
ISBN 82-91228-25-6
Sider:
Dato:
- Rapport nr. 20:** TITTEL: SLUTTRAPPORT
Aktivitet: -
Utgiver: Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling.
Forfattere: Fluge, F. og Jakobsen, B.
ISSN 1502-2331
ISBN 82-91228-26-4
Sider:
Dato:

INNHOLDSFORTEGNELSE**FORORD**

iii

SUMMARY

v

RAPPORTOVERSIKT

vii

INNHOLDSFORTEGNELSE

xii

1. SAMMENDRAG

xiii

2. RAPPORT – innhold utgjøres av følgende vedlegg

SINTEF rapport STF22 A01718, Februar 2001

Thorenfeldt, E., Øverli Jan Arve

”Forsterkning av betongsøyler med karbonfibervev”.

1. SAMMENDRAG

Utgangspunktet for undersøkelsen er behovet for å utvikle enkle metoder til forsterkning av søyler i betongkonstruksjoner som har fått økte påkjenninger og/eller skader forårsaket av utilstrekkelig bestandighet.

Eksempelvis har søylene på Elgeseter bru i Trondheim bidratt til å sette fokus på problemstillingen da de har fått betydelig opprissing fordi det har vært brukt alkalireaktivt tilslag. I tillegg har en del av søylene fått økte påkjenninger på grunn av ekspansjon av bruplaten. Rissene i søylene er så store at det er fare for korrosjonsskader på bøylearmeringen.

Det er vurdert å bruke utvendig pålimt karbonfibervev for å hindre at det skjer en videre ekspansjon som forårsaker ytterligere økning av rissviddene. I denne sammenhengen vil det være fordelaktig om karbonfiberveven i tillegg også har en omsnøringseffekt som helt eller delvis kan kompensere for mangelfull bøylearmering.

Hovedmålsetningen med prosjektet var å undersøke den potensielle forsterkningseffekten på betongsøyler som vikles med karbonfibervev og impregneres med epoksy. En annen målsetning var å vinne erfaring med praktisk utførelse av ekstern fiberforsterkning limt og impregnert på stedet.

Forsterkningseffekten ble undersøkt ved å prøvebelaste fem uker gamle armerte betongsøyler i fasthetklasse C30 med og uten slik forstrekning. Prøvingen omfattet sentrisk belastning av fire søyler med sirkulært tverrsnitt, diameter 330 mm og lengde 2,3 m. Alle søylene hadde lengdearmring bestående av 6Ø25 mm i kamstål B500C som var skjøtt i midtområdet med omfaringslengde 300 mm. Karbonfibervev av typen SIKA Wrap med lagtykkelse 0,13 mm var limt kant i kant og dekket 900 mm av midtområdet.

Den valgte skjøtlengden var bare $\frac{1}{4}$ av minimum standard omfaringslengde for den aktuelle armeringen og kan oppfattes som en svekkelse av det armerte betongtverrsnittet.

De fire søylene hadde forskjellig detaljutførelse:

- S1: Søyle uten bøyer i skjøtområdet
- S2: Søyle med stålbøyer i skjøtområdet
- S3: Søyle med ett lag pålimt karbonfibervev
- S4: Søyle med to lag pålimt karbonfibervev

Hovedhensikten med forsøkene var å sammenligne søylenes kapasitet og undersøke om moderate mengder pålimt karbonfibervev kan kompensere for manglende bøyer og eventuelt forsterke søylene.

Forsøkene viste noe overraskende at den moderate mengden stålbøyer som var lagt inn i skjøtområdet av søyle S2 bare i liten grad påvirket søylens kapasitet. Bruddet for denne søylen ble imidlertid mer duktilt enn for søylen uten bøyer i skjøtområdet.

Virkingen av pålimt karbonfibervev var betydelig. Sammenlignet med søylen uten bøyer i skjøtområdet økte kapasiteten med 20% for søylen med ett lag fibervev og med 50% ved forsterkning med to lag. Kapasitetsøkningen for ett fiberlag skyltes i særlig grad omsnøringseffekten hvilket fremgår av at bidraget fra betongen økte relativt mer enn økningen i søylens kapasitet. Ved to fiberlag økte bidraget til søylens kapasitet fra betong og armering tilnærmet like mye og utgjorde ved brudd ca. 50% for hver av dem.

De fiber forsterkede søylene fikk en betydelig økning i duktilitet i form av økt tøyningsevne før brudd. Betongtøyningene økte fra 1,5‰ for søylene S1 og S2 til over 5‰ for S4. På den annen side fikk de fiberforsterkede søylene en mer eksplosiv bruddutvikling, særlig sett i forhold til søyle S2 hvor bruddutviklingen foregikk mer gradvis og rolig for seg.

Utførelse av forsterkning ved påføring av fibervev viste seg å være en relativt enkel arbeidsoperasjon. Det er viktig å legge fiberveven plant på betongflaten med litt strekk slik at det ikke oppstår folder som kan være vanskelig å jevne ut med rull etterpå.

Vanlige sikkerhetstiltak er bruk av hansker og briller.



SINTEF Bygg og miljøteknikk
Sement og betong

Postadresse: 7465 Trondheim
Besøksadresse: Richard Birkelands vei 3
Telefon: 73 59 52 24
Telefaks: 73 59 71 36

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

SINTEF RAPPORT

TITTEL

Forsterkning av betongsøyler med karbonfibervev

FORFATTER(E)

Erik Thorenfeldt, Jan Arve Øverli

OPPDRAKSGIVER(E)

Statens vegvesen Vegdirektoratet og Sika Norge AS

RAPPORTNR. STF22 A00718	GRADERING Åpen	OPPDRAKSGIVERS REF. Knut Grefstad	
GRADER. DENNE SIDE Åpen	ISBN 82-14-01976-1	PROSJEKTNR. 22M17600	ANTALL SIDER OG BILAG 28 s. inkl. 3 app.
ELEKTRONISK ARKIVKODE i:\pro\22m176\stf22 a00718\søyleforsøkrappport.doc	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Erik Thorenfeldt	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Hans Stemland	
ARKIVKODE	DATO 2001-02-20	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Einar Aassved Hansen, Forsknings sjef	

SAMMENDRAG

Rapporten beskriver gjennomføring og resultater av belastningsprøving av armerte betongsøyler med og uten forsterkning ved eksternt pålimt karbonfibervev av type Sika Wrap med fiberlagtykkelse 0,13 mm. Det eksperimentelle programmet består av sentrisk belastningsprøving av 4 stk armerte betongsøyler med sirkulært tverrsnitt med diameter 330 mm og lengde 2,3 m. Alle søyler er utført med lengdearmering av 6Ø25 mm kamstål med omfarings skjøt med omfaringslengde 300 mm i midtområdet. Den valgte skjøtlengden er bare ca 1/4 av minimum standard omfaringslengde for den aktuelle armeringen og kan oppfattes som en svekkelse av det armerte tverrsnittet.

Søylene har forskjellig detaljutforming: S1: Uten forsterkning, S2: Med stålbøyler i skjøtområdet S3: Med ett lag pålimt karbonfibervev, S4: Med to lag pålimt karbonfibervev.

Hovedhensikten med forsøkene er å undersøke ved direkte sammenligning av søylenes kapasitet om moderate mengder eksternt pålimt karbonfibervev kan erstatte innvendige stålbøyler og eventuelt forsterke søylene ytterligere.

Forsøk og analyse viste som ventet at den korte armeringsskjøten førte til en skade på betongtverrsnittet i den uforsterkede søylen. Armering med en moderat mengde innvendige stålbøyler hadde liten innvirkning på kapasiteten. Bruddet ble imidlertid mer duktilt enn uten bøyler i omfarings skjøtområdet.

Virkningen av eksternt fiberarmering var betydelig. Økningen av kapasiteten var ca 20 % ved ett lag fibervev og 50 % ved to lag. Ved ett lag fiber skyldes økningen særlig omsnøringseffekten på betongen. Ved to lag fibervev øket både armeringens og betongens bidrag til kapasiteten med ca 50 %. Brudd i søyler med fiberforsterkning oppstod ved betydelig større tøyninger, men hadde mer eksplosiv karakter.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Byggeteknikk	Building technology
GRUPPE 2	Betong	Concrete
EGENVALGTE	Søyler	Columns
	Forsterkning	Strengthening
	Karbonfibervev	Carbon fibre fabric

INNHALDSFORTEGNELSE

1	Innledning	2
2	Beskrivelse av forsøkene	3
2.1	Eksperimentelt program.....	3
2.2	Prøvestykker.....	3
2.3	Betong og stålmaterialer	3
2.4	Instrumentering	6
2.5	Belastningsprosedyre	7
2.6	Fibervev forsterkning.....	8
3	Resultater	9
3.1	Betongfasthet.....	9
3.2	Bruddlast	9
3.3	Tøyningsutvikling og bruddforløp	10
4	Diskusjon av resultater.....	14
4.1	Direkte sammenligning av kapasiteter	14
4.2	Sammenligning med beregning.....	14
4.3	Duktilitet	18
4.4	Erfaring med utførelse av fibervevforsterkning	19
5	Konklusjoner.....	20
6	Forskningsbehov.....	21

Appendix A - Betongtøyninger

Appendix B - Bilder

Appendix C - Analyse

1 Innledning

Utgangspunktet for undersøkelsen er at det er behov for å utvikle enkle metoder for forsterkning av søyler i brukonstruksjoner på grunn av øket påkjenning og/eller skader på grunn av utilstrekkelig bestandighet.

For eksempel har søylene på Elgeseter bru betydelige rissdannelser pga. alkalireaktivt tilslag. I tillegg har en del av søylene fått øket påkjenning på grunn av ekspansjon av bruplatten. Rissene i søylene er så store at det er fare for at bøylearmeringen har fått eller vil få korrosjonsskader.

Det er i den forbindelse vurdert å bruke utvendig pålimt karbonfibervev for å unngå at en videre ekspansjon forårsaker en økning i rissviddene. Det er derfor ønskelig at karbonfiberveven også skal gi en omsnørings effekt som helt eller delvis erstatter bøylearmeringen.

Hovedmålet for prosjektet er å undersøke forsterkningseffekten av ekstern omsnøringsarmering av betongsøyler i form av omvikling med karbonfibervev i epoxylim.

Forsterkningseffekten undersøkes ved hjelp av laboratorieforsøk med sentrisk aksialbelastning av armerte betongsøyler med omfaringskjøtt lengdearmering med kort omfaringslengde. Kapasiteten av søyler med alternativ utførelse uten bøyer, med innstøpte stålbøyer eller med ekstern omvikling med karbonfibervev i to forskjellige mengder, sammenlignes.

Et delmål for undersøkelsen er å vinne erfaring med utførelse av ekstern fiberarmering som limes og impregneres med epoxy på stedet.

Undersøkelsen er utført på oppdrag av Statens Vegvesen, Brukontoret.

Undersøkelsen inngår som en del av programmet Betongkonstruksjoners livsløp, administrert av Statens Vegvesen, Vegteknisk avdeling.

Undersøkelsen er gjennomført av SINTEF Bygg og miljøteknikk, Sement og betong i samarbeide med Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU. Sika Norge as har bidratt med leveranse og utførelse av karbonfibervev forsterkning.

2 Beskrivelse av forsøkene

2.1 Eksperimentelt program

Det eksperimentelle programmet består av sentrisk belastningsprøving av 4 stk armerte betongsøyler med sirkulært tverrsnitt med diameter 330 mm og lengde 2,3 m. Alle søyler er utført med lengdearmering av 6Ø25 mm kamstål med omfaringskjøt med omfaringslengde 300 mm i midtområdet.

Den valgte skjøtlengden er bare ca 1/4 av minimum standard omfaringslengde for den aktuelle armeringen og kan oppfattes som en svekkelse av det armerte tverrsnittet.

De 4 søylene har forskjellig detaljutforming:

- S1: Uten forsterkning
- S2: Med stålbøyler i skjøtområdet
- S3: Med ett lag eksternt pålimt karbonfibervev
- S4: Med to lag eksternt pålimt karbonfibervev

Hovedhensikten med forsøkene er å undersøke ved direkte sammenligning av søylenes kapasitet om moderate mengder eksternt pålimt karbonfibervev kan erstatte innvendige stålbøyler og eventuelt forsterke søylene ytterligere.

2.2 Prøvestykker

Figur 1 viser detaljert tegning av søyle S2. Søyle S1 er identisk, bortsett fra at den er utført uten bøyler 5Ø8 c 130 i midtområdet.

Søylene er utført med forsterkning med stålrør og ekstra armering i endekområdene for å unngå brudd i armeringens kraftinnføringsområder ved endene.

Figur 2 viser tegning av søyle S3 og S4. Det framgår av figuren at også disse søylene er utført uten stålbøyler i midtområdet. Søylene er forsterket med eksternt pålimt karbonfibervev over en lengde lik 900 mm. Søyle S3 har ett lag fibervev, mens søyle S4 har dobbelt lag.

Søylene ble utstøpt stående i plastrørform og lagret i formene under plastdekke i ca 2 uker, hvor-etter søylene ble avformet ved å skjære opp plastrøret og eksponert for tørt innklima. Fibervev ble påført vel 1 uke etter avforming. Søylene ble belastningsprøvd ved ca 5 ukers alder.

2.3 Betong og stålmaterialer

Søylene er utført i normalbetong med tilsiktet terningfasthet ca 30 MPa.

Betongen var produsert i to blandinger for henholdsvis S1/S2 og S3/S4. For hver blanding ble utstøpt 6 stk referanse sylindrerprøver Ø100 * 300 i plastrørformer. Sylindrene ble lagret og avformet samtidig med søylene. Endeflatene ble kappet og slipt før trykkprøving samtidig med søylene ved ca 5 ukers alder.

Armeringskvalitet kamstål T500C. Karakteristisk flytegrense 500 MPa ved tøyning 2,5 o/oo.

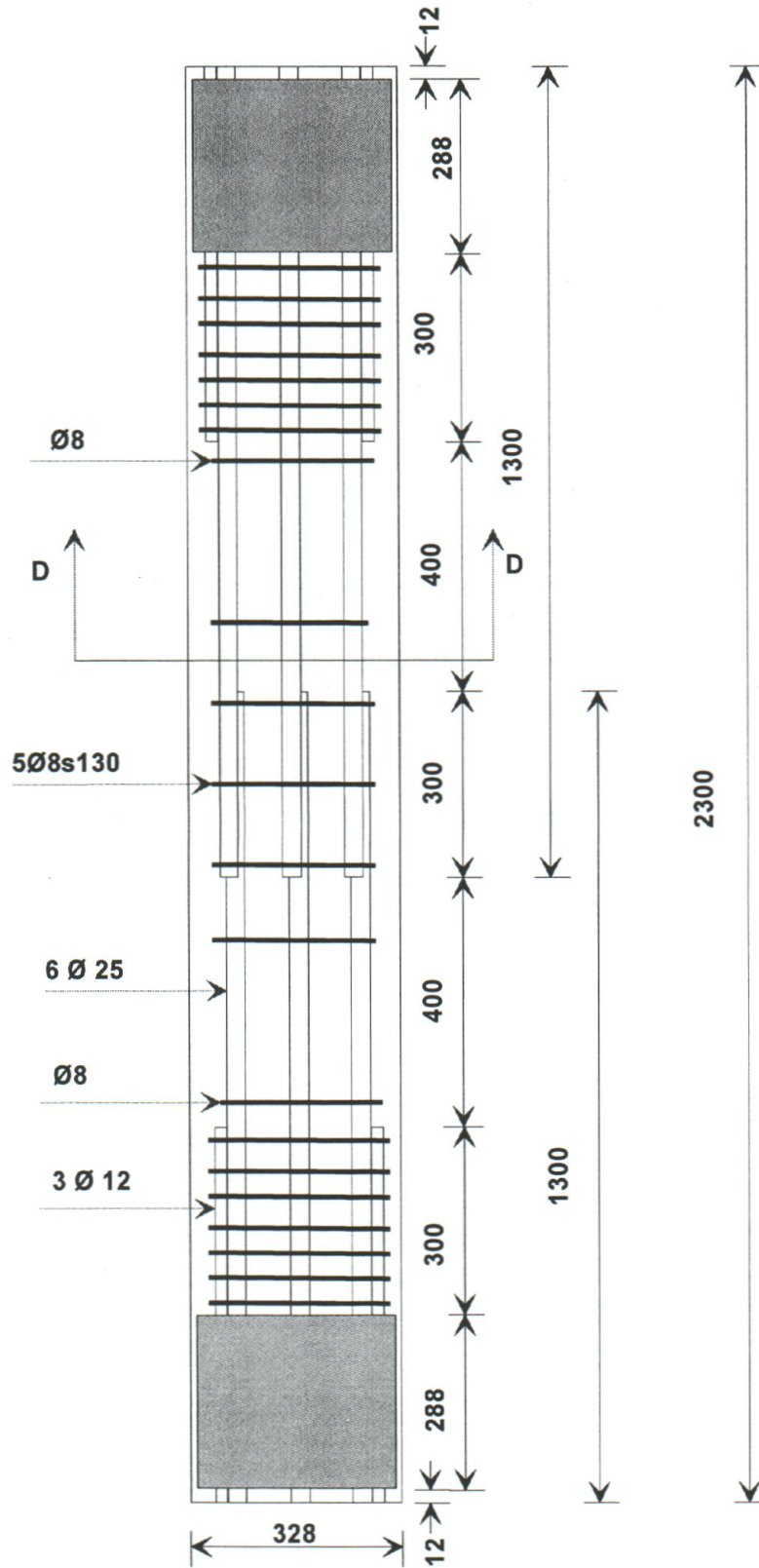
SØYLE S2


Fig 1 Søyale S2 (Søyale S1 utført uten bøyler 5Ø8 c 130)

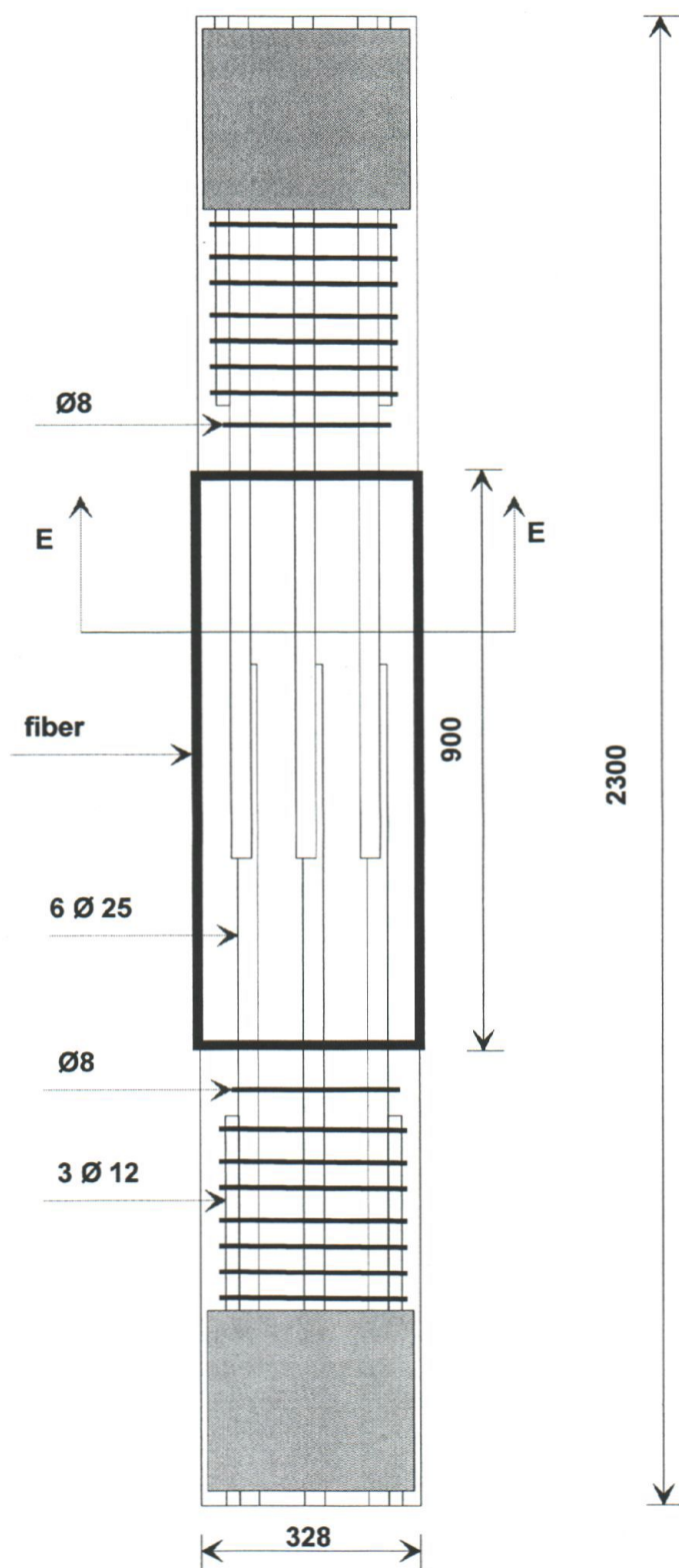
SØYLE S3 OG S4


Fig 2 Søyler S3 og S4 (Søyler S3 har ett lag og søyle S4 to lag fiberrev)

2.4 Instrumentering

Plassering av strekkklapper

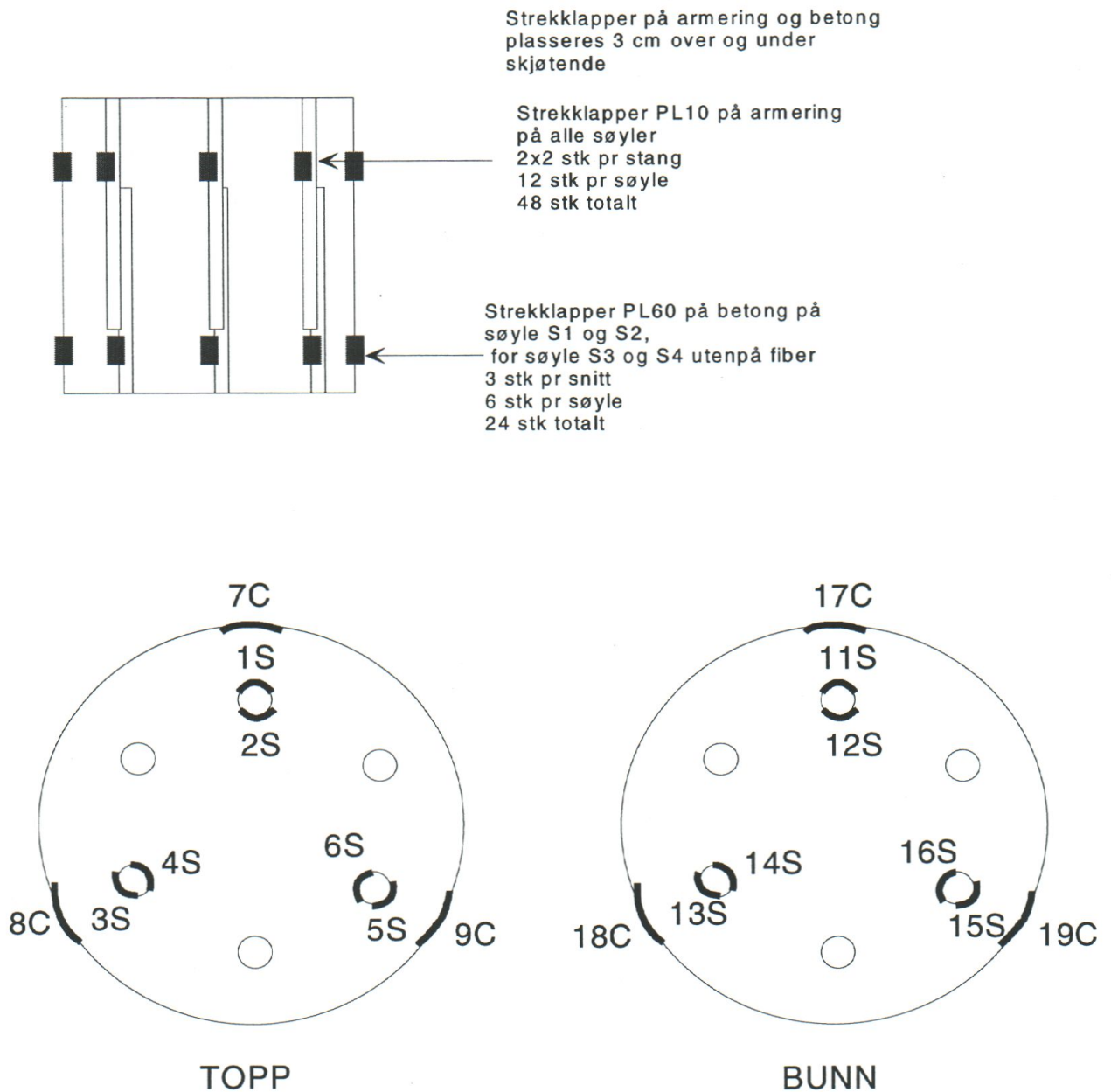


Fig 3 Plassering og nummerering av strekkklapper

Alle strekkklapper er orientert i søylenes lengderetning.

2.5 Belastningsprosedyre

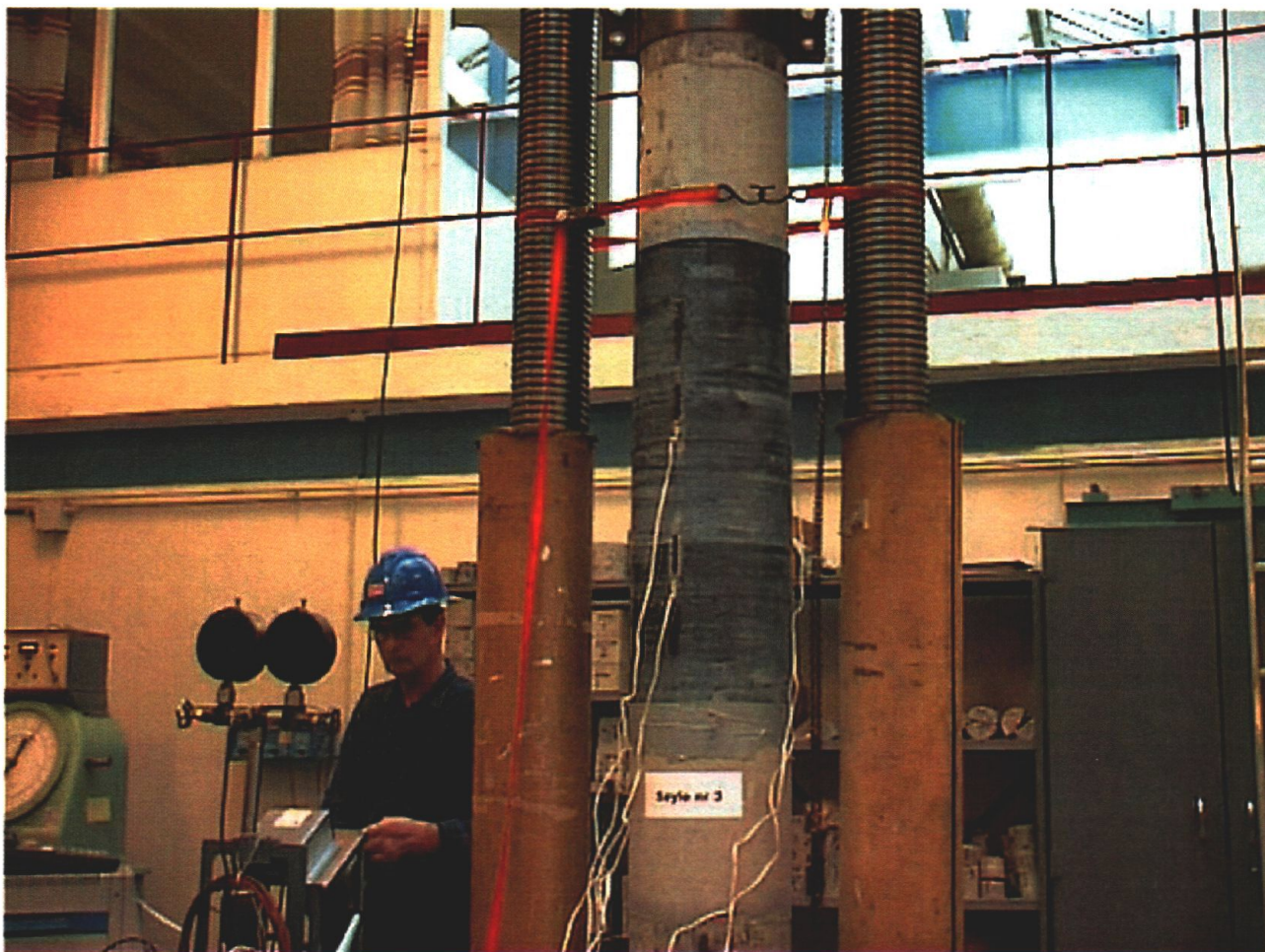


Fig 4 Søyle S3 med ett lag karbonfiber montert i søyleprøvemaskin

Søylene ble prøvd med sentrisk aksialbelastning i søylemaskin med 5000 kN lastkapasitet. Lasten vises på manometer og registreres indirekte ved oljetrykksmåler. Trykkmåleren ble spesielt kalibrert mot lastcelle før prøving. Maskinen har stivt stempel i bunnen og dreibart maskinhode ved toppen.

Søylene ble plassert sentrisk direkte på bunnstempel. Ved utførelsen av prøvestykkene ble det lagt stor vekt på å oppnå plan søyleende vinkelrett på søyleaksen. Lengdearmoring ble kappet vinkelrett og planslipt og plassert uten endeoverdekning.

For å oppnå fordelt trykkbelastning på søyletopp ble det lagt et lag fersk stålplast som ble utplanert ved påføring av en moderat forbelastning med søylehodet låst mot dreining. Stålplasten ble gitt anledning til å herdne før prøving. Prøvingen ble gjennomført med fritt dreibart maskinhode.

Søylene ble forbelastet trinnvis til ca 1500 kN (1000 kN for S1) og deretter avlastet for å kontrollere at belastningen var tilstrekkelig sentrisk. Kriteriet at de målte tøyningene langs de tre generatriser ikke skulle avvike mer enn $\pm 10\%$ fra middelverdien ble stort sett oppnådd.

Ved endelig belastning ble lasten øket i trinn til ca 1500 kN (1000 kN for S1). Ved videre manuell kontinuerlig kjøring ble lasten søkt påført med konstant hastighet 1 kN pr sekund ved å sammenligne klokke og digital lastangivelse. Dette tilsvarer en spenningshastighet på ca 0,012 MPa/sek på det armerte bruttotverrsnitt. Ved eventuell duktil respons, slik at det var mulig å følge et gradvis fall i last etter brudd, ble maskinen kjørt med tilnærmet konstant pumpehastighet.

Signaler fra strekkklapper og oljetrykksmåler ble registrert ved Solartron datalogger. Registreringen ble initiert manuelt ved lasttrinn og for øvrig automatisk hvert 10. sekund ved kontinuerlig kjøring.

I tillegg til den automatiske registreringen ble maksimallasten registrert direkte som maksimalverdi på oljetrykkmålerens voltmeter.

2.6 Fibervev forsterkning

Forsterkningen ble utført med Sika Wrap Hex-230C Karbonfibervev og epoxylim Sikadur 300.

Veven består av hovedsakelig ensrettede kontinuerlige karbonfiber med enkelte tverrtråder for å holde veven sammen. Vevet har teoretisk fiberareal tilsvarende 0,13 mm tykkelse med vekt 225 g/m². Fibrene har en teoretisk strekkfasthet på 3.500 N/mm² og E-modul 230.000 N/mm². Med lineært elastisk arbeidsdiagram gir dette en bruddforlengelse på 1,5 %.

Sikadur 330 er et 2-komponent epoxylim med lys grå farge, pasta-konsistens og densitet 1,3 kg/l. Brukstiden varierer med temperaturen og er angitt til 90 min ved +15 °C og 30 min ved + 35 °C. Strekkfasthet 30 N/mm² og E-modul 3800 N/mm² gir teoretisk bruddforlengelse ca 0,8 % .

Sika Wrap leveres med bredder ca 300 eller 600 mm på rull med lengde ca 45 m.

I det aktuelle tilfelle ble vev med bredde 300 mm lagt i 3 bredder kant i kant og dekket dermed 900 mm av søylen. Hver vev ble lagt rundt søylen med ca 100 mm overlapp.

På søyle S4 ble det lagt to lag.

3 Resultater

3.1 Betongfasthet

Resultat av trykkprøving av betongsylindre Ø100 x 300 lagret sammen med søyleprøvene og prøvd ved samme alder som søylene (ca 5 uker) er vist i Tabell 1

Tabell 1 Trykkfasthet for referansesyndre

Blanding	Blanding for S1/S2	Blanding for S3/S4	
	Middelverdi av 6 sylindre per blanding		Samlet middelverdi
Fasthet (MPa)	24,1	23,6	23,85

3.2 Bruddlast

Målte maksimallaster i kN for sølene er vist i første rad i Tabell 2 og i figur 5

Tabell 2 Observert maksimallast og andeler på stål og betong

Søyle nr:	S1	S2	S3	S4
Bruddlast forsøk F_u	2177	2195	2633	3281
Stålkraft F_s	693	636	677	1024
Betongkraft $F_c = F_u - F_s$	1484	1559	1956	2257

I tillegg til målt maksimalverdi er beregnet kraft i lengdearmeringen basert på middel av målte armeringstøyninger ved maksimallast medtatt i annen rad i tabellen. Den angitte betongkraft framkommer som differensen mellom maksimallast og kraft i lengdearmeringen. For søyle S1, hvor den automatiske tøyingsregistreringen stoppet ved 96 % av maksimallast, er stålkraften ved brudd bestemt ved ekstrapolering av tøyingsutvikling mot brudd.

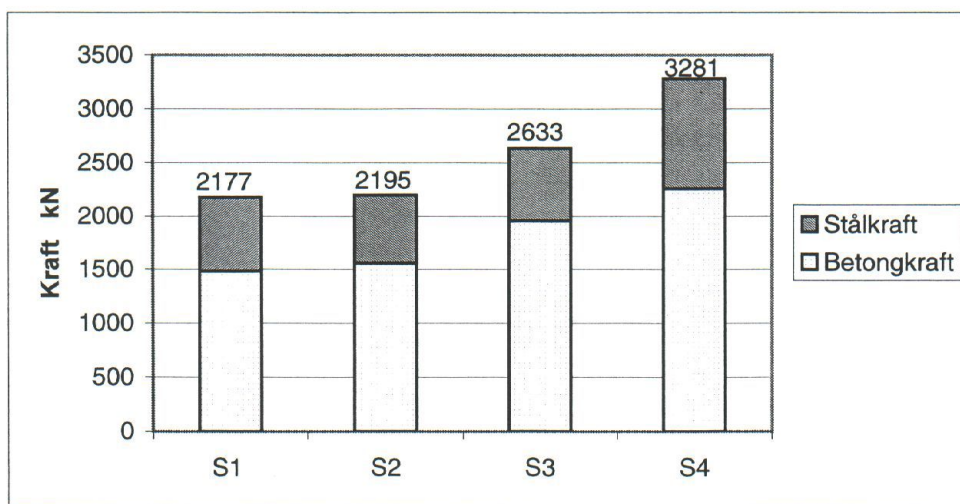


Fig 5 Bruddlast for søyler med angitt andel av kraft i betong og lengdearmering

3.3 Tøyningsutvikling og bruddforløp

Tøyningsutvikling i strekkklapper på betong er vist i diagrammer i appendix A – betongtøyninger. Det presiseres at strekkklappene er plassert på overflaten av betongen, eventuelt utenpå fiberlaget, like utenfor endene av omfaringsskjøtene. Det er derfor forventet at strekkklappene vil registrere den lokale tøyningsøkning i betongen ved endene av lengdearmeringen når det oppstår glidning i den korte omfaringsskjøten.

Tabell 3 Maksimale registrerte betongtøyninger i o/oo og tilsvarende lastnivå i kN

Søyle nr	S1	S2	S3	S4
middeltøying	1,21 / 2080	1,64 / 2190	3,34 / 2628	5,12 / 3272
enkelt lapp	1,56 / 2080	2,98 / 2173	4,62 / 2628	6,06 / 3272

Utvikling av middeltøyninger i armeringen like utenfor omfaringsskjøtens øvre og nedre ende framgår indirekte av beregnet kraft i armering som vist i figur 8 – 11. For 6Ø25 mm armering med 1,0 o/oo tøying fås en spenning på 200 MPa og en tilsvarende kraft lik 589 kN.

Søyle S1 – uten forsterkning

Tilnærmet lineær og kompatibel tøyningsutvikling i betong og armering opp til last ca 1800 kN
Over dette nivå får armeringen en redusert kraftstigning (særlig i snitt ved overkant skjøt)
Vertikale riss i skjøtområdet observert ved last ca 1900 kN (Spalteriss pga. glidning i skjøt)
Plutselig brudd ved last 2177 kN.

Søyle S2 – med ståløyler

Tilnærmet lineær og kompatibel tøyningsutvikling i betong og armering opp til last ca 2000 kN
Vertikale riss i skjøtområdet observert ved last ca 2000 kN (Spalteriss pga. glidning i skjøt)
Gradvis utvikling av spalteriss ved belastning mot maksimumlast ved 2195 kN.
Kraft i armering reduseres like før maksimumlast nås, særlig ved skjøtens øvre ende.
Bruddet er relativt duktilt. Fall i kraft i øvre armering kompenseres delvis av øket betongkraft.

Søyle S3 – med ett lag fibervev

Søylen fikk en utilsiktet høy forbelastning til ca 1800 kN. Tøyningsutviklingen var likevel tilnærmet lineær og kompatibel i betong og armering opp til last ca 2300 kN.
Ved videre belastning reduseres kraftstigningen i armeringen. Maksimal kraft i armeringen ca 800 kN oppnås ved last ca 2350 kN for deretter å falle til under 700 kN ved brudd.
Fra last 2450 kN kunne det høres knitrelyder som tydet på brudd i enkeltfiber (bunter).
Ekspløsjonsartet brudd med totalbrudd i fiber langs en generatrise i skjøtområdet ved last 2633 kN
Se foto fig 10.

Søyle S4 – med to lag fibervev

Tilnærmet lineær og kompatibel tøyningsutvikling i betong og armering opp til last ca 2400 kN.
Ved videre belastning reduseres kraftstigningen i armeringen ved underkant skjøt noe, men armeringskraften fortsetter å stige relativt kraftig helt fram til brudd.
Fra last 2600 kN kunne det høres knitrelyder som tydet på brudd i enkeltfiber(bunter).
Ekspløsjonsartet brudd med totalbrudd i fiber langs en generatrise i skjøtområdet ved last 3281 kN
Se foto fig 11.

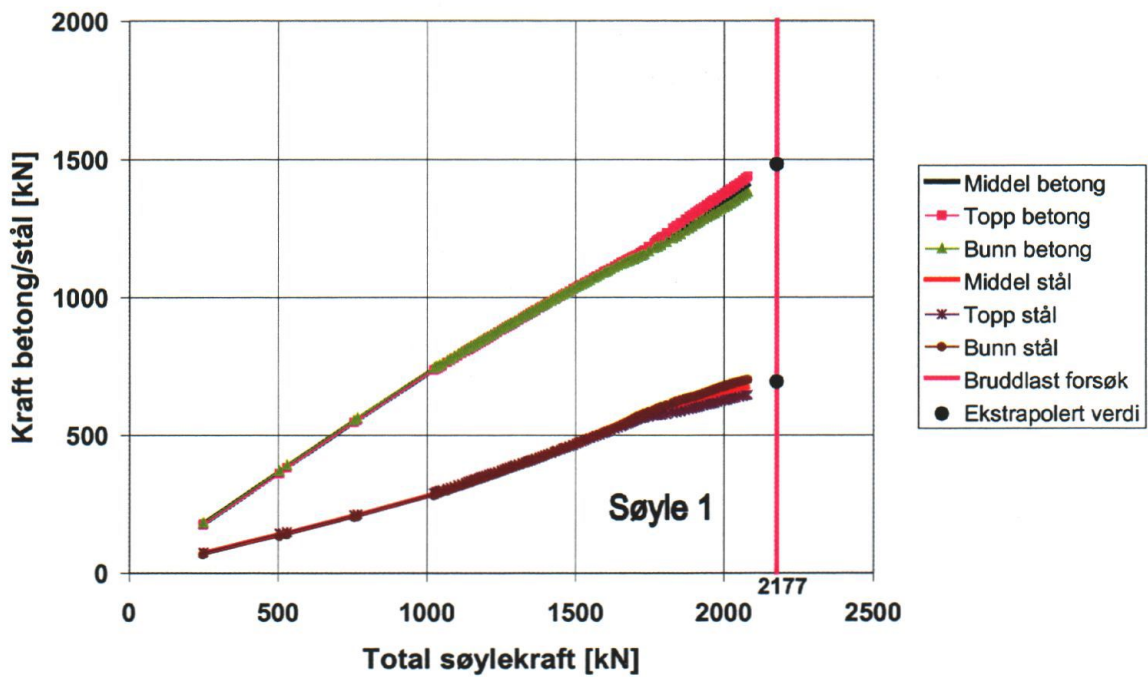


Fig 6 Bidrag til aksialkraft fra betong og armering i søyle S1

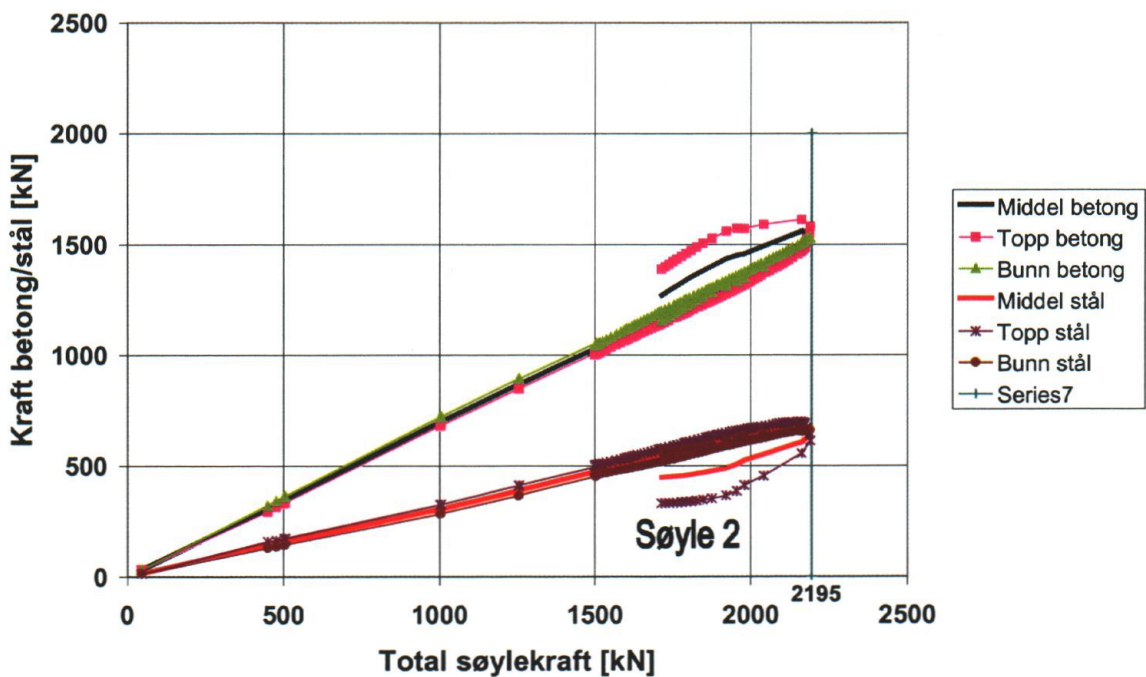


Fig 7 Bidrag til aksialkraft fra betong og armering i søyle S2

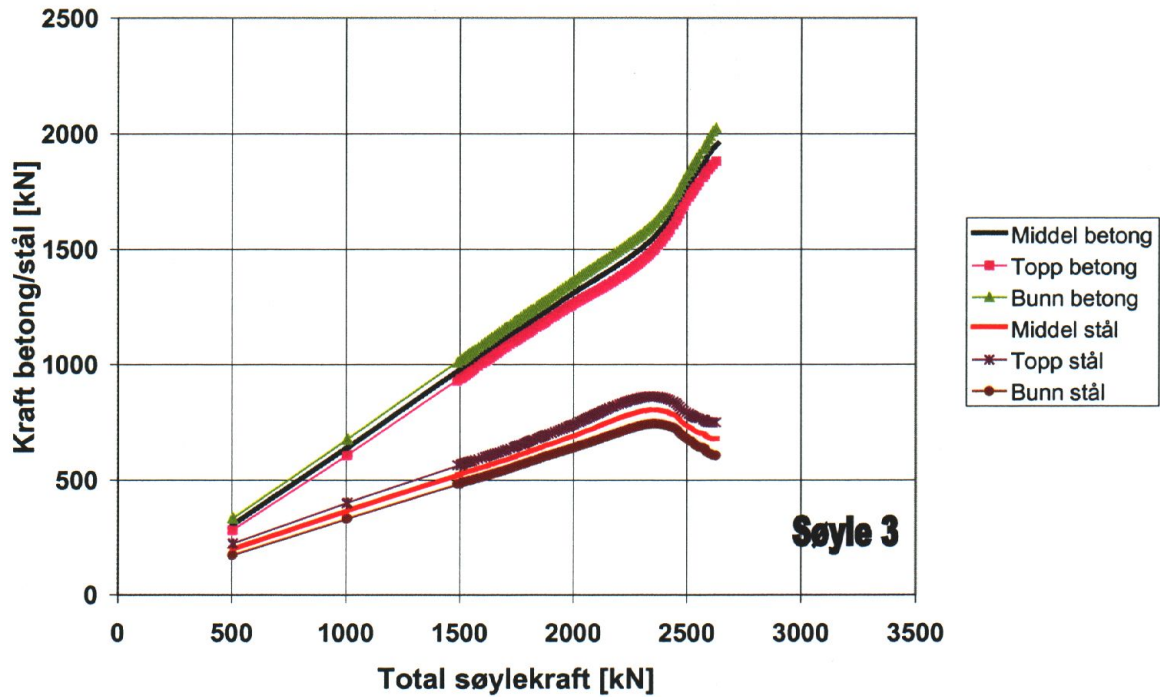


Fig 8 Bidrag til aksialkraft fra betong og armering i søyle S3

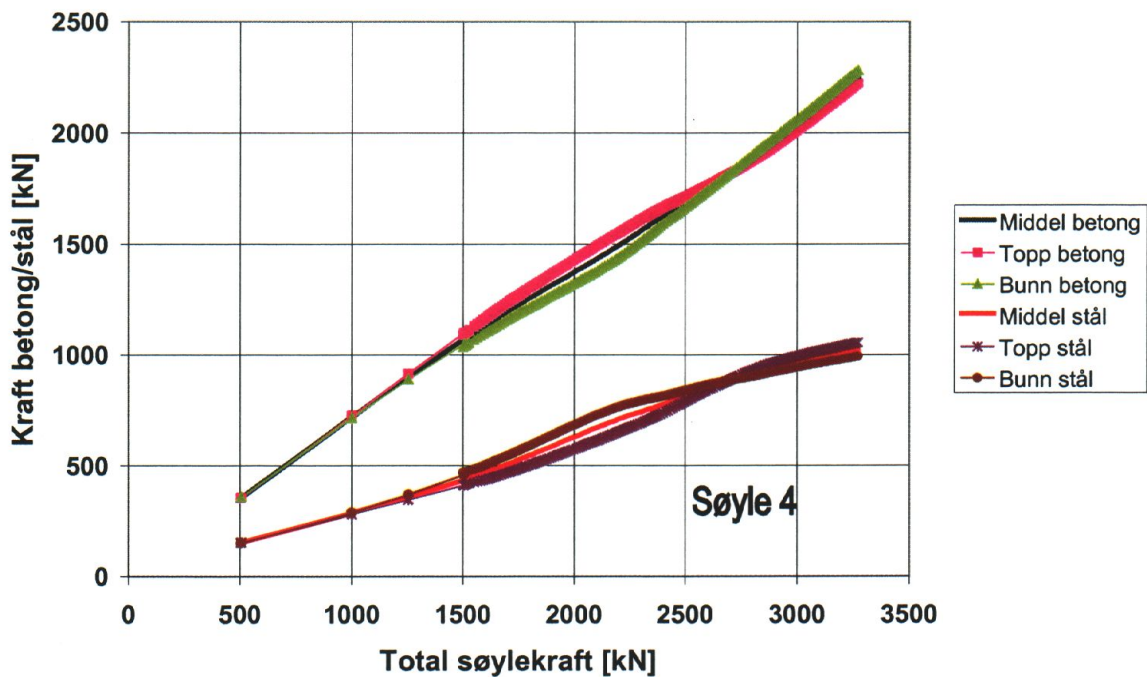


Fig 9 Bidrag til aksialkraft fra betong og armering i søyle S4



Fig 10 Søyle S3 med ett lag karbonfiberrev etter brudd



Fig 11 Søyle S4 med to lag karbonfiberrev etter brudd

4 Diskusjon av resultater

4.1 Direkte sammenligning av kapasiteter

De observerte lastkapasiteter og forholdet mellom kapasiteten for de enkelte forsterkede søyler og søyle S1 uten bøyer eller fiberomvikling i skjøtområdet er vist i tabell 4.

Tabell 4 Forhold mellom kapasiteter

Søyle nr:	S1	S2	S3	S4	S2/S1	S3/S1	S4/S1
Bruddlast forsøk F_u	2177	2195	2633	3281	1,01	1,21	1,51
Stålkraft v/brudd F_{su}	693	636	677	1024	0,92	0,98	1,48
Betongkraft $F_c = F_u - F_{su}$	1484	1559	1956	2257	1,05	1,32	1,52
Maks stålkraft F_{smax}	693	678	801	1024	0,98	1,16	1,48

I tillegg til kapasitetene ved brudd, er maksimal stålkraft beregnet ut fra observerte maksimale tøyninger som ble observert på et noe lavere lastnivå for S2 og S3 medtatt i tabellen.

Det framgår av Tabell 4 at 3Ø8 mm bøyer i skjøtområdet i S2 hadde lite virkning på kapasiteten. Stålbidraget ved brudd var tvert imot noe mindre enn i S1 uten bøyer. På lastnivå 94 % av brudd var maksimal kraft i armeringen ved skjøtendene omtrent lik maksimalkraften i S1.

Kapasiteten av S3 med ett lag Sika Wrap med teoretisk fiberlagtykkelse 0,13 mm hadde 21 % høyere kapasitet enn S1. Dette skyldes særlig en økning av kapasiteten av betongen med 32 %, mens stålkraften ved brudd var på samme nivå som i S1 (98 %). På lastnivå 89 % av brudd var maksimal kraft i armeringen ved skjøtendene dog 16 % høyere enn maksimalkraften i S1.

Kapasiteten av S4 med to lag Sika Wrap hadde 51 % høyere kapasitet enn S1. Dette skyldes særlig en tilnærmet proporsjonal økning både av kapasiteten av betongen og armeringen. Maksimal kraft i armeringen ble oppnådd ved brudd.

4.2 Sammenligning med beregning

Kapasitetsberegningen baseres på observert trykkfasthet for referansesyndre. Syndrene er lagret sammen med søylene og prøvet ved samme alder og har diameter/lengdeforhold ca 3,0. Det er derfor antatt at syndrene gir et godt uttrykk for søylebetongens en-aksiale fasthet. Da syndrene er prøvet med en spenningshastighet i betongen som er ca 60 ganger større enn søylene, er det likevel forventet at søylene får noe mindre bruddfasthet i betongen.

I beregningene er antatt en bruddfasthet lik 95% av sylindrefastheten, dvs $24 \cdot 0,95 = 22,8$ MPa

Forankringskapasiteten for omfaringskjøten er beregnet etter reglene i NS3473 med konstruksjonsfasthet for strekk $f_{tn} = 1,7$ MPa. Detaljerte beregningsparametre er gitt i tabell 5.

Tabell 5 Detaljerte beregningsparametre

SØYLER med omfarings skjøt	enhet	Verdi
Søylediameter	mm	328
Brutto areal	mm ²	84496
Sylinderfasthet Ø100/300	MPa	24
Fasthet	MPa	22,80
Armering diameter	mm	25
Antall stenger		6
Arm areal	mm ²	2945
Flytegrense	MPa	550
Overdekning L-arm	mm	30
Senteravstand L-arm	mm	127
Fri avstand	mm	77
Konstr fasthet strekk	MPa	1,70
Konstr fasth heft f_{bc}	MPa	2,70
Omfaringslengde	mm	300
Forankring F_{bc}	kN	381
Bøylediameter	mm	8
Bøyleavstand	mm	130
Antall bøyer		3
Faktor k_3		40
Tillegg heftfasthet f_{bs}	MPa	0,80
Tillegg forankring F_{bs}	kN	114
Omsnringsarmering		
Bøyer	mm ² /mm	0,39
Fibertykkelse 1 lag	mm ² /mm	0,13
Fibertykkelse 2 lag	mm ² /mm	0,26

Tabell 6 Beregnet kapasitet

Beregnet kapasitet	Enhet	Uten skjøt	Skjøt u/ bøyer	Skjøt m/bøyer
Betongkap F_c (kN)	kN	1859	1859	1859
Armeringskap F_s (kN)	kN	1620	381	495
Sum F_{tot} (kN)	kN	3479	2240	2354
F_s % av F_c	%	87,1 %	20,5 %	26,6 %

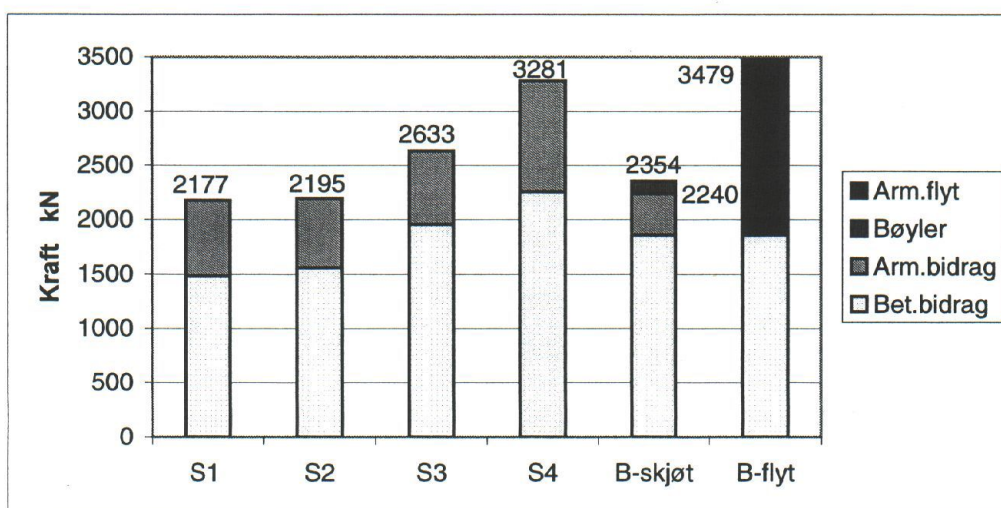
Beregningen av forventet kapasitet med og uten bøyer og teoretisk kapasitet for armert søyle uten armeringsskjøt i tabell 6 er basert på den enkle forutsetning at addisjonsloven gjelder, dvs at kapasiteten av armeringen med kort omfaringslengde kan adderes til betongtverrsnittets kapasitet.

Tabell 7 Sammenligning mellom beregnet kapasitet og observerte kapasiteter ved brudd

	Beregning /u bøylar F_{bu}	S1 F_{S1}/F_{bu}	S3 F_{S3}/F_{bu}	S4 F_{S4}/F_{bu}	Beregning /m bøylar F_{bm}	S2 F_{S2}/F_{bm}
Betong F_c	1859	0,79	1,05	1,21	1859	0,84
Skjøtarmering F_{sb}	381	1,82	1,78	2,69	495	1,28
Total kapasitet	2240	0,97	1,18	1,46	2354	0,93

I tabell 7 er kapasitetene for S1, S3 og S4 sammenlignet med beregning uten bøylar i skjøt-området, mens S2 er sammenlignet med beregning med bøylar.

En grafisk sammenligning mellom observerte og beregnet kapasiteter er vist i fig 12.


Fig 12 Observerte og beregnede aksialkraft kapasiteter

Det framgår av linje 1 i tabellen at både S1 og S2 viste et betongbidrag til kapasiteten som er mindre enn teoretisk kapasitet av betongtverrsnittet, henholdsvis 0,79 og 0,84 %. Dette indikerer at den konsentrerte trykkpåkjenningen på betongen ved stangendene gir merkbar skade på betongen ved omfarings-skjøter som er vesentlig kortere enn armeringsstengenes forankringslengde og at addisjonsloven dermed ikke gjelder.

Skaden er tolket til å være litt mindre for S2 med bøylar. Skaden kunne antagelig vært ytterligere redusert dersom det hadde vært plassert bøylar i de kritiske områder like utenfor skjøten, som anbefalt i enkelte betongstandarder. I S2 er avstanden fra skjøtenden til første bøyle utenfor skjøten på ca 100 mm antagelig for stor til å gi optimal effekt.

For S1 var bidraget fra armeringen vesentlig større enn beregnet kraftoppbygging ved heft over skjøtlengden etter NS 3473. (Faktor 1,82). Dette medfører at samlet kapasitet for S1 likevel nærmer seg beregnet kapasitet basert på addisjon av armering og full betongkraft. (Faktor 0,97).

Det var noe overraskende at bøylene hadde så liten virkning på kapasiteten. Den beregningsmessige effekt av bøylar $\varnothing 8c130$ på heftkapasiteten av omfarings-skjøten etter NS 3473 er dog i utgangspunktet forholdsvis beskjeden (114 kN). Det skal derfor lite til av eksentrisk last eller imperfeksjoner i utstøpingen i skjøtområdet for å overskygge denne virkningen. Som det framgår

av fig A-2 i appendix A, var det relativt stor spredningen i de registrerte betongtøyningene på overflaten like utenfor skjøtområdet for S2.

Fiberomviklingen av S3 og S4 var i begge tilfeller tilstrekkelig til å kompensere for skaden på betongen og i tillegg gi en generell forsterkning av betongtverrsnittet i forhold til beregnet kapasitet med henholdsvis 5 og 21 %. For S4 med to lag fiber fikk man i tillegg en vesentlig økning av armeringsskjøtens effektivitet.

Kapasiteten av S4 var mindre enn beregnet kapasitet for den armerte søylen med gjennomgående armering uten skjøt. Forsøksresultatet for S4 viser dermed det fulle forsterkningspotensiale for fiberomviklingen uten å være influert av den øvre begrensning for kapasiteten som addisjonsloven med flytekraft i armeringen representerer. Valget av omfaringslengde for armeringen i forsøket kan dermed sies å være vellykket.

Sammenligning mellom beregning og forsøk indikerer at karbonfiberomviklingen har gitt en betydelig fasthetsøkning på grunn av omsnøringseffekt. Et hovedspørsmål ved bruk av fiberarmering som passiv omsnøring er hvor store spenninger som kan utnyttes effektivt. Tøyninger i ringretningen er ikke målt. En vurdering av dette må derfor bli basert på enkle overslagsberegninger.

En enkel formel tilsier at betongsøylens aksielle trykkfasthet øker med 5 ganger den radielle spenningen. Den observerte økningen er beregnet til å tilsvare 21% av betongens en-aksiale fasthet for søyle S4 med 2 lag fibervev. Dette gir

$$\text{Radiell betongspenning: } \sigma_r = 0,21 \cdot 22,8 / 5 = 0,96 \text{ MPa}$$

$$\text{Spenning i fiber: } \sigma_f = \sigma_r R / t_f = 0,96 (328/2) / (2 \cdot 0,13) = 605 \text{ MPa}$$

$$\text{Tøyning i fiber: } \epsilon_f = \sigma_f / E_f \approx 605 / 230.000 = 2,6 \text{ o/oo}$$

Betongens middeltøyning i lengderetningen er ifølge tabell 3 målt til 5,1 o/oo før brudd. Det er ofte observert at betong før brudd kommer i en tilstand av volumutvidelse, det vil si at tverrutvidelseskoeffisienten overstiger 0,5. Det beregnede resultat er derfor ganske rimelig.

En sammenligning mellom søylenes respons og en mer avansert modell for virkning av omsnøring (confinement) av søyler uten armering er vist i Appendix C. Analysen gir god overensstemmelse mellom observert lengdetøyning/betongspenning ved brudd for S4 (basert på bruddlast minus bidrag fra lengdearmering) og beregnet tøyning/spenning i betongsøyle med 2 lag fibervev når tøyningen i karbonfibrene er lik ca 2,0 o/oo. Analysemodellen forutsetter fortsatt økning av kapasiteten inntil brudd i fiberomviklingen. Forsøk med betongsylindrer viser at brudd i fiberlaget oppstår ved målte tøyninger som er mindre enn teoretisk bruddtøyning for fiber materialet. Grenseverdien er material- og dimensjonsavhengig og bør bestemmes ved relevante forsøk. Foreslått størrelsesorden er ca 50 % av teoretisk verdi, som for Sika Wrap vil si ca 8 o/oo.

Den teoretisk beregnede tøyning i fiberlaget ved brudd i søylen på ca 2 o/oo er bare ca 1/4 av den tøyning som er forventet for en uarmert søyle med karbonfiberlag. I de aktuelle søyler har fiberomviklingen også kompensert for den antatte skade av størrelsesorden 20 % som søylen uten fiberomvikling fikk i følge tolkningen av resultatene og samtidig gitt en økning av den skjøtte lengdearmeringens kapasitet med 50 % for S4. Det er rimelig å anta at det er den lokale spreng-

virkning og spalterissene langs armeringen som fører til brudd i fiberlaget. En kan derfor si at effekten av fiberomviklingen likevel har vært forholdsvis stor for S4.

For søyler med andre dimensjoner kan en antagelig vente samme effekt dersom fiberameringsprosenten er lik.

Fiberarmeringsprosent for S4: $t \pi D / \pi R^2 = 4 t / D = 4 \cdot 0,26 / 328 = 0,0032 = 0,32 \%$

Ved halvparten så stor fiberprosent i S3 ble også skaden kompensert, men beregnet forsterkning av betongen ut over dette var bare ca 5 %. Forsøkene indikerer derfor at en sikker forsterkning først kan forventes ved fiberprosent av størrelsesorden 0,2 %. For en søyle med diameter 800 mm, som er tilfelle for Elgeseter bru, tilsvarer dette ca 0,4 mm fibertykkelse, eller ca 3 lag fibervev.

4.3 Duktilitet

De fiberforsterkede søylene fikk en betydelig øket duktilitet i den forstand at betongtøyningene ved brudd i kritisk område øket fra ca 1,5 o/oo i søyle S1 og S2 til over 5 o/oo i S4.

På den annen side fikk de fiberforsterkede søylene et betydelig mer eksplosivt brudd, særlig i forhold til S2 med innvendige bøyler hvor bruddutviklingen gikk mer gradvis og rolig for seg.

Det er tvilsomt om konsekvensene av brudd i sterkt aksialbelastede søyler vil være noe særlig influert av selve bruddets karakter. Bruddtendenser i form av rissdannelser i overflaten kan sees på søyler uten fiberlag, men det vil vel oftest være slik at dette ikke oppdages og registreres som et bruddvarsel. Muligheten for å gripe inn med lastreduksjon slik at brudd ikke oppstår eller ved sikring av verdier og personell slik at bruddkonsekvensene kan reduseres er derfor i alle fall sterkt begrenset.

Den hørbare knitring i fiberomviklede søyler ved laster fra ca 80 – 90 % av bruddlast for henholdsvis S4 og S3 gir en form for bruddvarsel. Fenomenet er tolket som brudd i enkeltfiber eller små fiberbunter og er dermed også et tydelig tegn på at lokale tøyninger og fiber materialets sprøhet spiller en betydelig rolle for søylens kapasitet og duktilitet.

De fiberforsterkede søylenes generelt økede tøyningsevne gir imidlertid økede muligheter for gunstig kraftomlagring i konstruksjonen med en positiv virkning for sikkerheten. Dette vil særlig være tilfelle for søyler som i tillegg til aksialkraft er påkjent av moment på grunn av påførte deformasjoner, hvor en forventet økning av rotasjonskapasitet på grunn av fiberforsterkning kan føre til både momentomlagring og reduksjon av momentene i bruddgrensetilstand.

4.4 Erfaring med utførelse av fibervevforsterkning

Monteringen av fiberveven ble utført ved først å foreta en maskinell prikkhamring av overflaten for å sikre god limheft. Før limingen ble startet ble fuktinnholdet i betongen kontrollert med enkel generell fuktmåler. Kriteriet maksimum 5 % ble ikke oppfylt ved måling ca 2 døgn etter avforming. Ved ytterligere uttørking i vanlig inneklime i ca 1 uke visste ny måling at kriteriet var oppfylt.

Lim med relativt lav viskositet ble lagt på søylen med sparkel i ca 2 mm tykkelse.

Fibervev med bredde 300 mm ble deretter lagt rundt søylen med overlapp ca 100 mm.

Limet ble deretter presset gjennom fiberveven ved bearbeiding med en liten rull.

Området ble utvidet ved å legge neste vev kant i kant.

For søyle S4 ble lag nummer to lagt på umiddelbart uten vesentlig påføring av nytt lim og bearbeidet med rull slik at limet kom igjennom også dette laget.

Arbeidet var relativt enkelt å utføre. Det var viktig å legge fiberveven plant på med litt strekk slik at det ikke oppstår folder som kan være vanskelige å jevne ut med rullen etterpå.

Vanlige sikkerhetstiltak er bruk av hansker og briller.

5 Konklusjoner

- Forsøkene viste noe overraskende at den moderate mengde innvendige stålbøyer hadde liten innvirkning på søylens kapasitet. Bruddet ble imidlertid mer duktilt enn uten bøyer i omfarings-skjøtområdet.
- Virkningen av ekstern fiberarmering var betydelig. Økningen av kapasiteten var ca 20 % ved ett lag fibervev og 50 % ved to lag.
- Ved ett lag fiber skyldes økningen særlig omsnøringseffekten på betongen. Ved to lag fibervev øket både armeringens og betongens bidrag til kapasiteten med ca 50 %
- Sammenligning med beregning indikerer at armeringens bidrag til kapasiteten var større enn beregnet forankringskapasitet for aktuell skjøtlengde etter NS3473. For søyler uten ekstern forsterkning indikerer forsøkene at betongtverrsnittet skades når det oppstår glidning mellom betong og armering i områdene utenfor den korte omfarings-skjøten, slik at addisjonsloven ikke gjelder.
- For S1 uten bøyer indikerer forsøkene at betongens kapasitet reduseres med vel 20 %. På grunn av øket armeringsbidrag var kapasiteten likevel 97 % av beregnet etter addisjonsloven
- For S2 med bøyer indikerer forsøkene en mindre skade på betongen enn for S1. Da armeringens kapasitet ikke øket ved bruk av bøyer ble totalkapasiteten likevel relativt sett mindre i forhold til beregning (93 %)
- Fiberomviklingen av S3 og S4 var i begge tilfeller tilstrekkelig til å kompensere for den antatte skade av betongtverrsnittet og ytterligere øke kapasiteten av betongen med henholdsvis ca 5 % og 20 %. Ved 2 lag fibervev øket også armerings-skjøten kapasitet.
- De fiberarmerte søylene fikk en betydelig øket duktilitet i form av øket tøyningsevne før brudd. På den annen side hadde selve bruddet en betydelig mer eksplosiv karakter.
- Påføringen av fibervev viste seg å være en relativt enkel arbeidsoperasjon.

6 Forskningsbehov

De relativt enkle søyleforsøkene demonstrerte at det kan oppnås en betydelig forsterkning både av armeringens forankring og bæreevnen av sentrisk belastede sirkulære betongtverrsnitt ved omvikling med moderate mengder karbonfiber av størrelsesorden 0,2 – 0,3 % av tverrsnittet.

Utvikling av beregningsmodeller som mer generelt kan forutsi hvor stor forsterkning og duktilitetsøkning som kan oppnås, forutsetter en nærmere forståelse av fiberomviklingens virkemåte.

Hovedspørsmålet som gjenstår ubesvart, er om de observerte brudd i fiberomviklingen i hovedsak skyldes en radikal økning av generell tverrutvidelse i forbindelse med trykkbrudd i betongen med en overskridelse av fibernes bruddtøyning av størrelsesorden 15 ‰ som resultat, eller om lokal tøyning i fiber som krysser spalteriss langs armeringsskjøten har spilt en betydelig rolle. De godt hørbare knitrelyder ved lastnivåer over 80 – 90 % av bruddlasten for S3 og S4 kan tyde på tidlig brudd i fiber-filamenter nærmest betongoverflaten ved rissdannelsen, men dette var ikke synlig, og kan muligens skyldes andre effekter (dannelse av strekkrikk i lim eller lokale heftbrudd).

Supplerende forsøk fiberforsterket søyle med en relativt tett instrumentering med strekkklapper i ringretningen kan gi svar på om store lokale tøyninger utvikles tidlig i forbindelse spaltevirkningen fra armeringsskjøten. Et tilleggsforsøk med fiberforsterket søyle hvor armeringen er gjennomgående vil gi verdifullt sammenligningsgrunnlag med mulighet for å skille mellom skade på grunn av armeringsskjøtens spaltevirkning og generell bruddutvikling i en omsnørt armert søyle.

Utvikling av beregningsmodeller for forsterkning av søyler med eksentrisk last og/eller andre tverrsnittsformer bør baseres på en kombinasjon av videre studie av internasjonal litteratur, numerisk analyse og supplerende forsøk.

Fiberomviklingens virkning på rotasjonskapasiteten av søyler med kombinasjon av aksialkraft og påført krumning/vinkelendring vil ha særlig interesse for rehabilitering/sikring av Elgeseter bru, hvor brubanens forlengelse på grunn av alkalireaksjoner påfører søylene ved den ene enden av brua betydelige forskyvninger i toppen.

Appendix A - Betongtøyninger

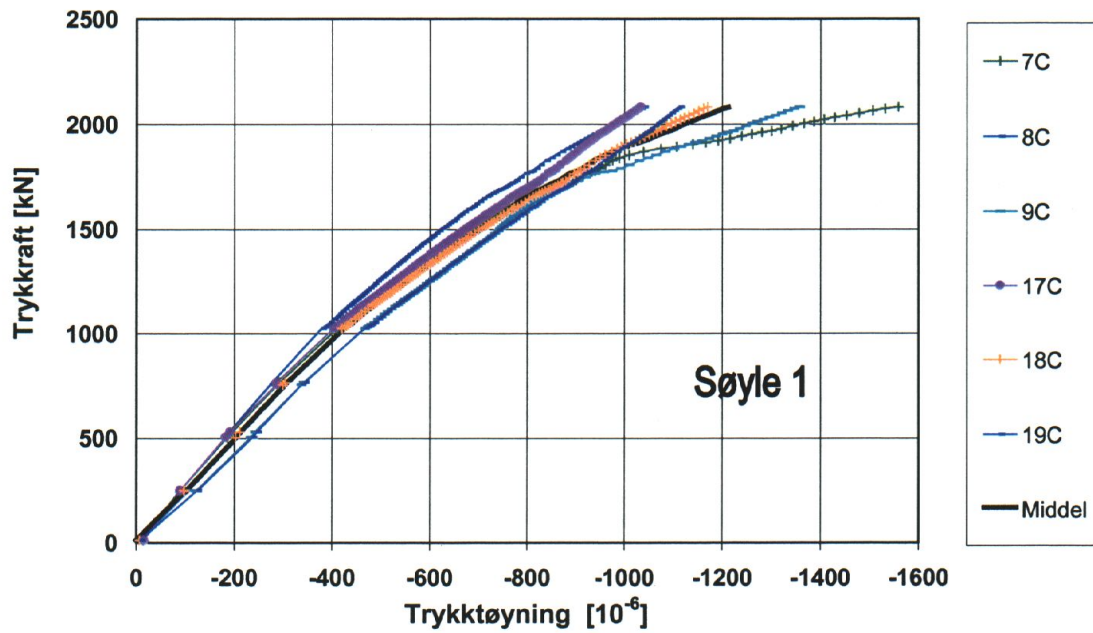


Fig A-1 Betongtøyninger i søyle S1

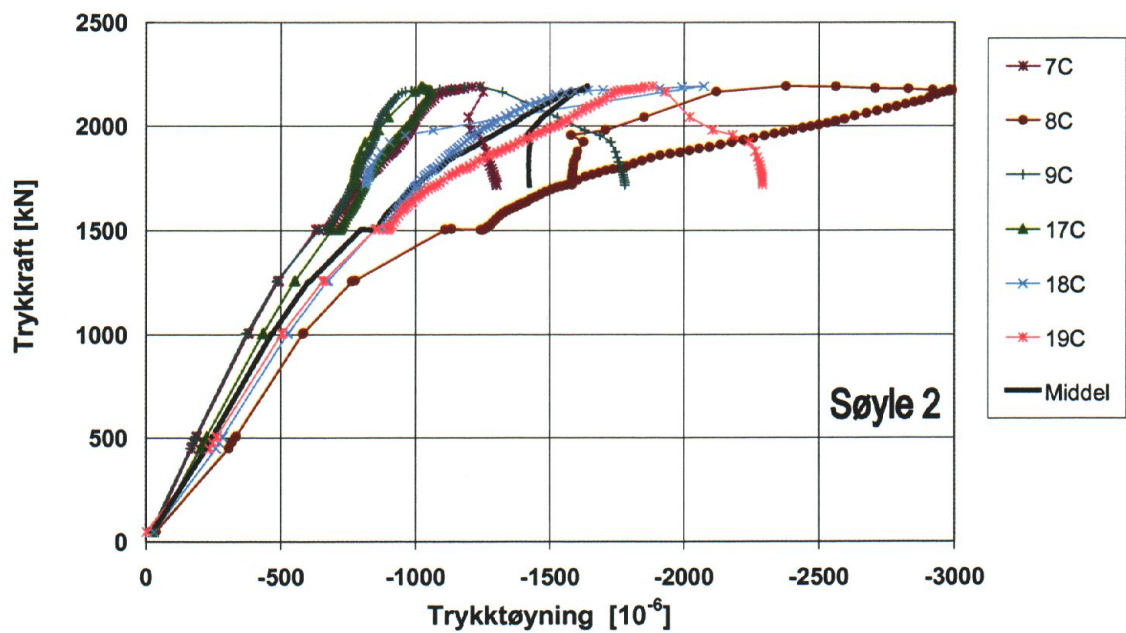


Fig A-2 Betongtøyninger i søyle S2

For plassering og nummerering av strekkklapper, se fig 3.

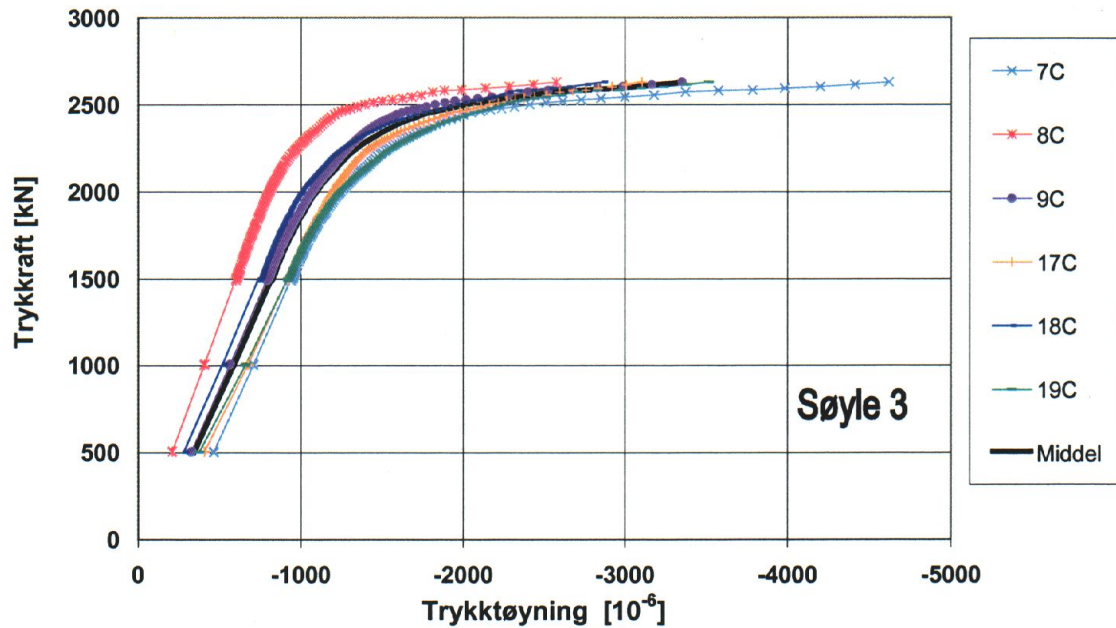


Fig A-3 Lengdetøyninger i søyle S3. Streklapper utenpå fiberlag

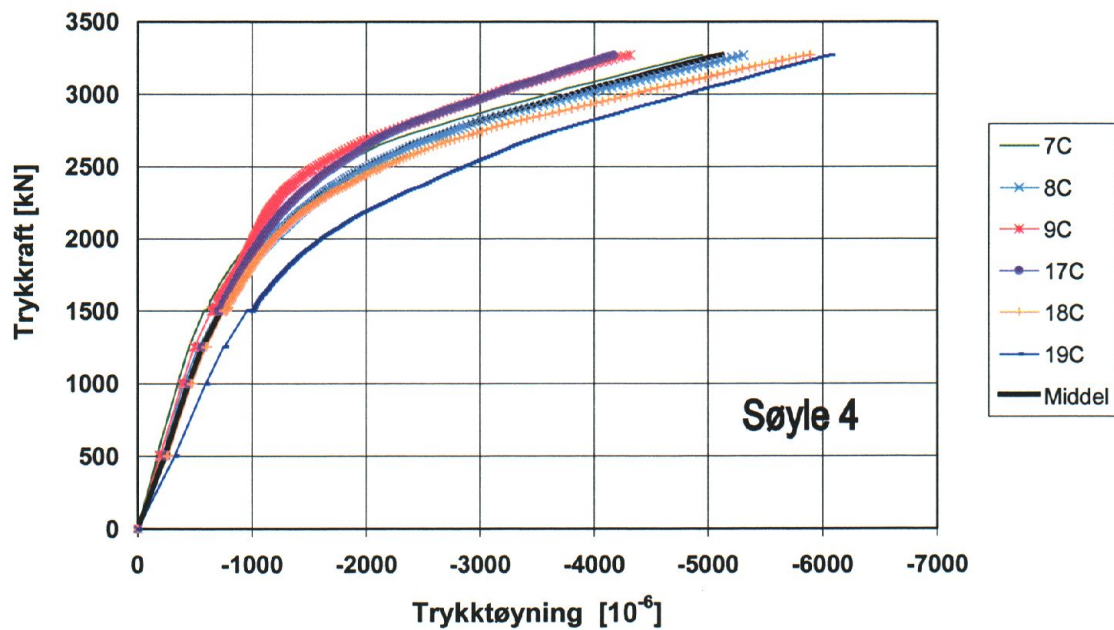


Fig A-4 Lengdetøyninger i søyle S4. Streklapper utenpå fiberlag

For plassering og nummerering av streklapper, se fig 3.

Appendix B - Bilder



Fig B-1 Eksplosivt brudd i søyle S3



Fig B-2 Nærbilde av bruddsone i søyle S3

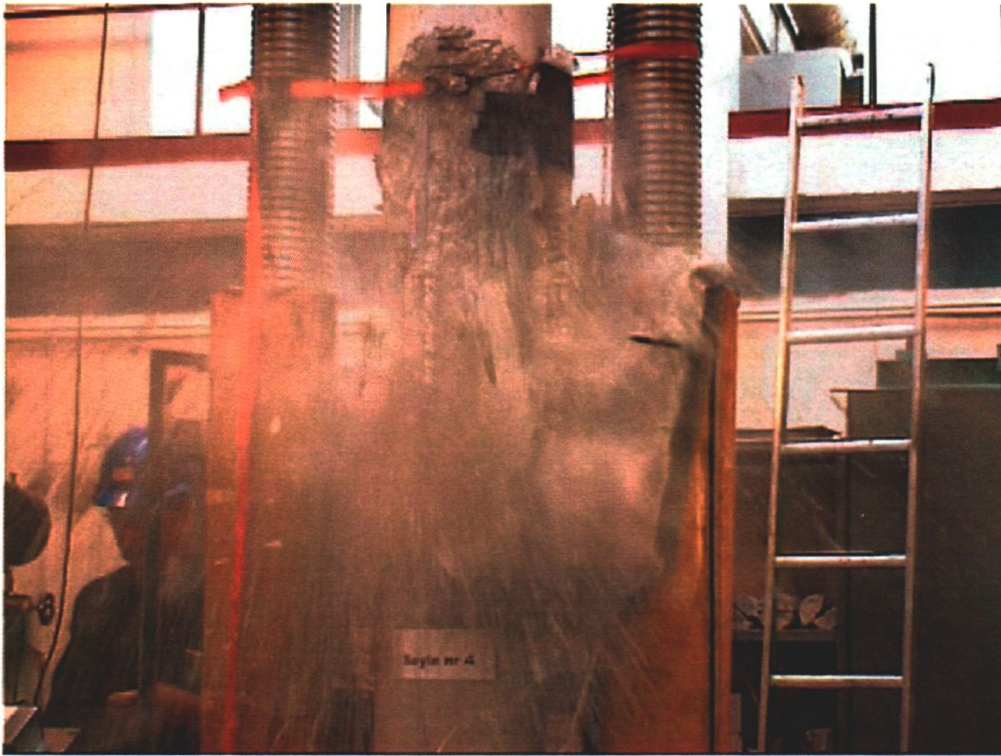


Fig B-3 Eksplosivt brudd i søyle S4



Fig B-4 Søyle S4 etter brudd



Fig B-5 2-lags fibervev spaltet av fra søyle S4 ved brudd

Fig B-5 viser at brudd i fiberlaget har oppstått langs en vertikal generatrise. Ved den dynamiske avspaltingen av fiberlaget i forbindelse med bruddet i S4 har fiberlaget revet med seg hele overdekningslaget på begge sider av bruddet og et tynt lag betong rundt resten av periferien. I det tynne betonglaget finnes fordelte små groper hvor epoxylimet er synlig.

Appendix C - ANALYSE

SAMMENLIGNING MED “CONFINEMENT”-MODELL

Tøyning-spenningsdiagram [Popovics (1973)] :

$$\sigma_c = f_{cc} \times r / (r - 1 - x^r)$$

$$x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}, \quad \epsilon_{cc} = \epsilon_{co} (1 + 5(f_{cc} / f_{co} - 1)), \quad r = E_c / (E_c - E_{sec}), \quad E_{sec} = f_{cc} / \epsilon_{cc}$$

Fasthet som funksjon av en konstant radiell spenning σ_{rad} : [Mander et al (1988)]

$$f_{cc}(\sigma_{rad}) / f_{co} = 2,254(1 + 17,94 \sigma_{rad} / f_{co})^{0,5} - 2\sigma_{rad} / f_{co} - 1,254$$

Sammenheng mellom tøyning og spenning for confined concrete: [Pantazopoulou (1995)]

$$\epsilon_{rad} = (E_c \epsilon_c - \sigma_c) / (2\beta \sigma_c) \quad \beta = 5700 / f_{co}^{0,5} - 500$$

Generell sammenheng mellom spenning i fiberomvikling og radiell spenning/tøyning i betong:

$$\sigma_f = \epsilon_{rad} E_f \quad \sigma_{rad} = 0,5 \rho_f E_f \epsilon_{rad} \quad \rho_f = 4 t_f / d_j$$

Figur C1 og C2 viser beregnet sammenheng mellom spenning og tøyning i betongen i søyler med forskjellige grader av confinement sammenlignet med observert lengdetøyning ved økende betongspenning for søyle S3 og S4.

Beregnet respons for søyler med omsnøringsarmeringsprosent henholdsvis CF = 0,16 % og CF = 0,32 % som for søyle S3 og S4 er basert iterativt løsning av ovenstående ligninger for betong med fasthet 22,8 MPa og fibermateriale med E-modul 230.000 MPa. I tillegg er responsen beregnet for uarmert betong og for betong med konstant radiell spenning 0,36 og 0,9 MPa tilsvarende ett lag fiberomvikling med konstant tøyning 0,002 resp 0,005 for S3 og 0,73 og 1,46 MPa tilsvarende to lag fiberomvikling med konstant tøyning 0,002 resp 0,004 for S4.

De observerte verdier er basert på målte midlere tøyninger i betongen og lengdearmeringen i maksimalt påkjent snitt ved enden av omfarings skjøten. Spenningen i betongen er beregnet som last minus kraft i lengdearmeringen dividert på tverrsnittsarealet.

Det framgår av figurene at det er god overensstemmelse mellom beregnet og observert spenning/tøyning i lengderetning ved brudd i søylene. Bruddet oppstår imidlertid ved en beregnet radiell tøyning (= tøyning i fiber i ringretning) lik ca 1,5 o/oo for S3 og 2 o/oo for S4. mens modellen forutsetter at spenningen kan øke videre inntil brudd i fiberlaget ved antatt tøyingsnivå ca 50 % av teoretisk bruddtøyning, som for Sika Wrap er ca $0,5 * 15 = 7,5$ o/oo.

Det antas at lokale tøyninger på grunn av armeringens sprengvirkning og spalting av betongen er hovedårsak til det tidlige bruddet i fiberomviklingen. Tøyninger i fiberlaget i ringretning er ikke målt.

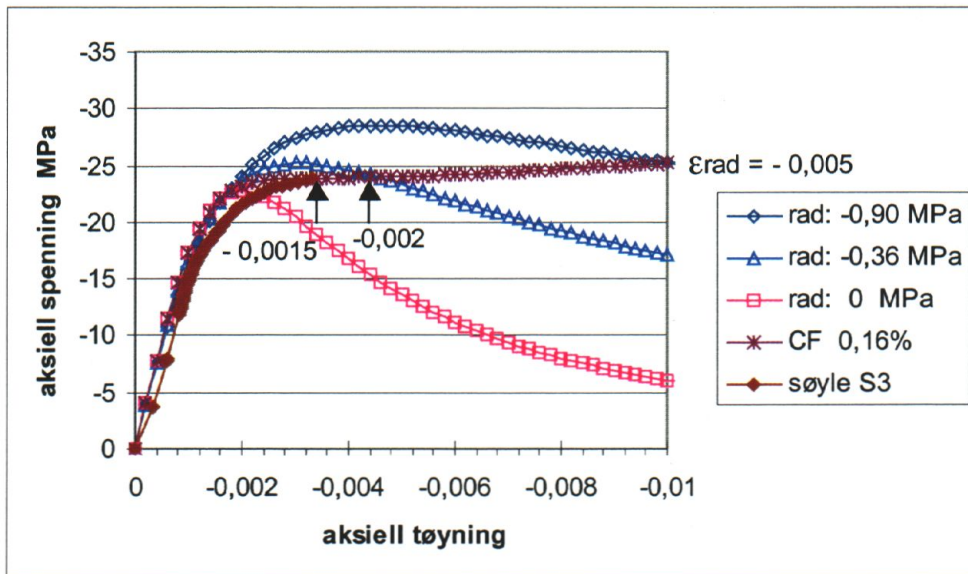


Fig C-1 Søyle S3

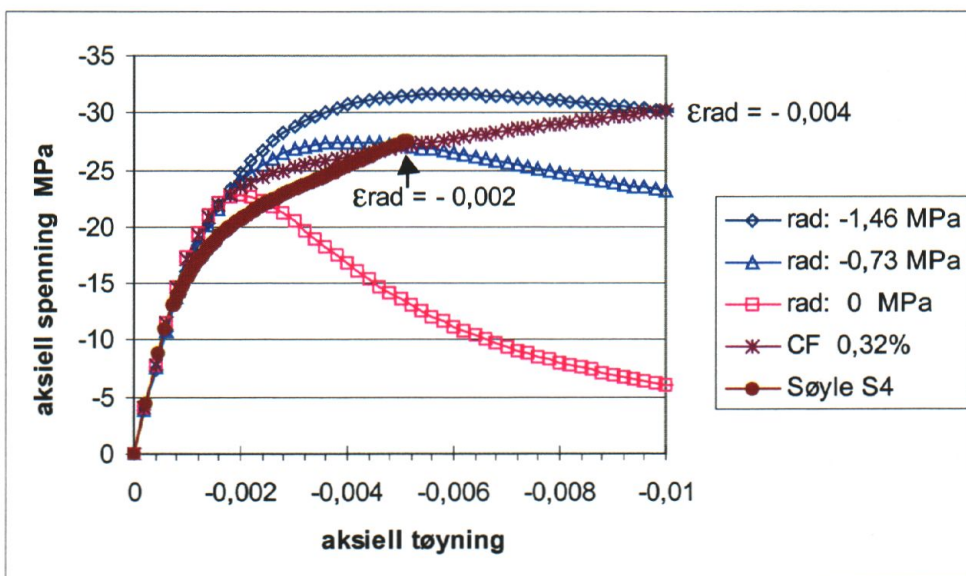


Fig C-2 Søyle S4

