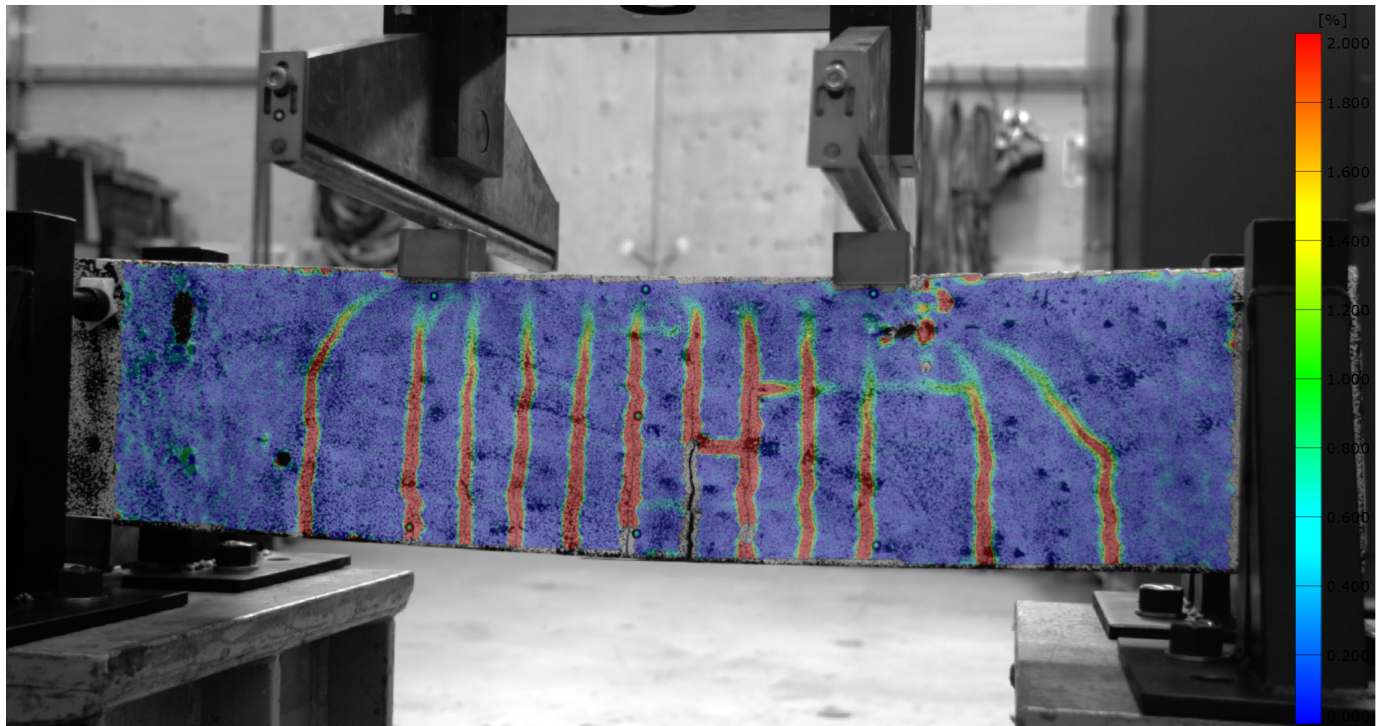




CHALMERS



Tunna textilarmerade betongplattor: Provmetod för belastning i planet

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

Almin Delibasic
Raia Hayatleh

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Betongbyggnad
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Examensarbete ACEX20-19-27
Göteborg, Sverige 2019

Tunna textilarmerade betongplattor:

Provmetod för belastning i planet

Examensarbete i höskoleingenjörprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Almin Delibasic

Raia Hayatleh

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Konstruktionsteknik

Betongbyggnad

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2019

Tunna textilarmerade betongplattor:
Provmethod för belastning i planet

*Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

Almin Delibasic

Raia Hayatleh

© ALMIN DELIBASIC/RAIA HAYATLEH, 2019

Examensarbete ACEX20-19-27

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola 2019

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Konstruktionsteknik
Betongbyggnad
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2019

Tunna textilarmerade betongplattor: Provmetod för belastning i planet

Examensarbete i högskoleingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

Almin Delibasic

Raia Hayatleh

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Konstruktionsteknik

Betongbyggnad

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Betong har låg draghållfasthet i förhållande till dess tryckhållfasthet och brukar därför armeras. Den vanligaste typen av armering är stålarmring, men det finns andra mer hållbara alternativ, så som textilarmering. Kolfibernet, en sorts textilarmering, är ett lovande alternativ med många positiva egenskaper. Det används främst idag som förstärkning av befintliga betongkonstruktioner och mera sällan som huvudarmering. Det har dock potential att kunna användas som huvudarmering. Det finns en hel del försök utförda på textilarmerad betong belastad i enaxiellt drag, utdragsförsök och böjning av tunna plattor. Det finns dock få arbeten gjorda kring tvåaxiell böjning samt plattor belastade med böjning i planet.

Syftet med detta arbete var att få en bättre uppfattning av beteendet hos en textilarmerad betongplatta (TAB-platta) när den belastas i planet. Målet var att experimentellt kunna studera sprickbildning och brott i en TAB-platta belastad i planet. Detta gjordes genom att en provmetod för ett fyrapunkts böjprov togs fram och genomfördes. Arbetet avgränsades till fyrapunkts böjprov och endast en typ av textilarmering (kolfibernet).

Inför provbelastningen utfördes konstruktionsberäkningar. Kriterier som styr utformningen av provuppställningen ställdes upp, och kontrollerades. Dimensionerna för plattan justerades utifrån kriterierna. Provbekastningarna gjordes på tre likadana plattor med samma dimensioner och antal armeringsnät. Arbetet, som innefattade allt från att tillverka formar och placera armering, gjuta, såga och måla provkropparna, till att utföra fyrapunkts böjprov, gjordes på Konstruktionstekniks laboratorium på Chalmers tekniska högskola. Där tillverkades även alla ingående komponenter i provuppställningen.

Resultaten från fyrapunkts böjproven gav sprickbildning på samtliga provkroppar, följt av böjbrott. Sprickbildningarna var tydliga att följa och kunde analyseras. Resultaten från provbelastningarna av de tre provkropparna jämfördes med varandra samt med teoretiskt beräknade värden. Provernans sprick-, brott- och maxlast var relativt lika, med endast mindre avvikelser. Det generella mönstret för sprickbildningen var desamma, men antal sprickor och avstånden mellan dem varierade något mellan de tre provkropparna. I teoretiska beräkningar av momentkapacitet används en utnyttjandefaktor på kolfibernetets hållfasthet, och olika källor rekommenderar olika faktorer. I arbetet användes faktorerna 0,2 och 0,52. Detta gav stor skillnad på beräknad maxlast, och i försöken blev maxlasten mellan de båda beräknade. Detta visar på att det saknas tillräcklig information för att utföra korrekta konstruktionsberäkningar för textilarmerad betong. Den framtagna provmetoden kan bidra till en ökad kunskap.

Nyckelord: Textilarmeradbetong (TAB), Textilarmering, Kolfiberarmering, Kolfibernet,
Tunna betongelement, Fyrapunkts böjprov.

Thin textile-reinforced concrete slabs: Test method for in-plane loading

Degree Project in the Engineering Programme Civil and Environmental Engineering

Almin Delibasic

Raia Hayatleh

Department of Architecture and Civil Engineering

Division of Structural Engineering

Concrete Structures

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Concrete has low tensile strength in relation to its compressive strength and is therefore usually reinforced. The most common type of reinforcement is steel bars, but there are other more sustainable options, such as textile reinforcement. Carbon fiber grid, a type of textile reinforcement, is a promising alternative with many positive features. It is used primarily for strengthening of existing concrete structures and rarely as main reinforcement. However, it has the potential to be used as main reinforcement. There are lots of experiments done on textile reinforced concrete loaded in uniaxial tensile testing, pull out testing and bending of thin slabs. However, there are few studies done on biaxial bending and slabs loaded with bending in-plane.

The purpose of this work was to get a better understanding of the behavior of textile reinforced concrete slabs (TRC-slabs) when loaded in-plane. The goal was to be able to experimentally study cracking and failure in TRC-slabs loaded in-plane. This was done by developing a test set-up for a four-point bending test. The work was limited to four-point bending tests and only one type of textile reinforcement (carbon fiber grid).

Before the structural tests, design calculations were performed. Criteria governing the design of the test set-up were set up and checked. The dimensions of the slab were adjusted based on the criteria. Three identical slabs with the same dimensions and number of reinforcement grids were structurally tested. The work, which included everything from making molds and placing reinforcement, casting, sawing and painting the specimens, to performing four-point bending tests, were made at the Construction Engineering Laboratory at Chalmers University of Technology. All components included in the test set-up were also manufactured there.

All four-point bending tests resulted in cracking of the specimens, followed by bending failure. The cracking process could be followed and analyzed in detail. The results from the tests of the three specimens were compared with each other, as well as with theoretically calculated values. The cracking, failure and maximum loads of the specimens were relatively similar, with only minor deviations. The general pattern for the crack formation was the same, but the number of cracks and the distances between them varied between the three specimens. In theoretical calculations of moment capacity, a utilization factor of the strength of the textile carbon fiber is used; different sources recommend different factors. Factors 0.2 and 0.52 were used in this study. This resulted in a large difference on the calculated maximum load, and in the test the maximum load was in between the two calculated. This shows that there is insufficient information to perform correct design calculations for textile reinforced concrete. The developed test method can contribute to increased knowledge.

Key words: Textile reinforced concrete (TRC), Textile reinforcement, Carbon fiber grid, Thin concrete elements, four-point bending test.

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	III
INNEHÅLL	II
FÖRORD	IV
BETECKNINGAR	V
1 INTRODUCTION	1
1.1 Inledning	1
1.2 Syfte och mål	1
1.3 Frågeställning	1
1.4 Metod	2
1.5 Avgränsningar	2
2 TEXTILARMERAD BETONG	3
2.1 Textilarmerad betong	3
2.2 Betong	3
2.3 Textilarmering av kolfiber	3
2.4 Kolfiber	4
2.4.1 Brandegenskaper	4
2.4.2 Tillverkare	5
3 ÖVERVÄGANDEN	6
3.1 Kriterier	6
3.2 Spricklast och brottlast	6
3.2.1 Dimensionerande moment	6
3.2.2 Sprickmoment	7
3.3 Knäckning	7
3.4 Lokal krossning	8
3.5 Livtryckbrott	8
3.6 Val av dimensioner	8
4 UTFÖRANDE	10
4.1 Provkroppar	10
4.1.1 Gjutform	10
4.1.2 Fibernätets placering i formen	10
4.1.3 Betongegenskaper	12
4.1.4 Kolfibernetets egenskaper	13
4.1.5 Gjutning	13

4.1.6	Förberedelser	14
4.2	Provuppställning	16
4.2.1	Mått	16
4.2.2	Horisontalstöd	17
4.3	Provning	18
5	RESULTAT	20
5.1	Last och deformation	20
5.2	Sprickbildningen	22
5.2.1	Provkropp 1	23
5.2.2	Provkropp 2	24
5.2.3	Provkropp 3	26
5.3	Sprickvidd	28
6	DISKUSSION	30
6.1	Provmetod	30
6.2	Teoretiska beräkningar jämfört med verklighet	30
6.3	Variation mellan provkroppar	31
6.4	Felkällor	33
7	SLUTSATSER OCH FÖRSLAG TILL VIDARE ARBETE	34
7.1	Slutsatser	34
7.2	Förslag till vidare arbete	35
8	REFERENSER	36
9	APPENDIX	38

Förord

Detta examensarbete har utförts på Chalmers Tekniska Högskola, mellan januari och juni 2019 och omfattar 15 Hp. Till hjälp hade vi Karin Lundgren som handledde oss i rätt riktning, och som även är vår examinator. Även Sebastian Almfeldt hjälpte oss att göra provförsöken genomförbara.

Vi vill därmed rikta ett stort tack till Karin Lundgren och Sebastian Almfeldt. Vi tackar även Fredrik Larsson för hjälp och engagemang under projektets gång, och Carlos Gil Berrocal för att ha målat provkropparna åt oss.

Göteborg maj 2019
Almin Delibasic
Raia Hayatleh

Beteckningar

Latinska versaler

A_{c0}	tryckarea
A_{c1}	fördelningsarea
C_{eff}	utnyttjandefaktor för kolfibernetets hållfasthet
EI	böjstyvhet
F_{ct}	dragkraft i betong
F_{Rdu}	lokalkrossningskraft
G	egentyngd
I	tvärsnittets tröghetsmoment
L	längd
M_{cr}	sprickmoment
M_{Ed}	dimensionerande böjmoment, lasteffekt
M_d	dimensionerande momentkapacitet
P	last
P_{E2}	knäcklast enligt Euler fall 2
$V_{Rd,max}$	dimensionerande tvärkraftskapacitet med avseende på livtrycksbrott

Latinska gemena

a	längd från upplag
b	bredd
b_0	punktlastens bredd
b_1	fördelningsareans bredd
d	effektiv höjd
d_0	punktlastens längd
d_1	fördelningsareans längd
f_{cd}	dimensioneringsvärde för betongens tryckhållfasthet
f_{ck}	karaktäristiskt värde för betongens tryckhållfasthet
f_{cm}	medelvärde för betongens tryckhållfasthet
$f_{cm,cube}$	medelvärde för betongens kubtryckhållfasthet
f_{ct}	betongens draghållfasthet
$f_{ct,fl}$	betongens böjdraghållfasthet
g	permanent last
h	höjd
k	koefficient; faktor
z	hävarmen för de inre krafterna i ett tvärsnitt

Grekiska gemena

α_{cc}	faktor som beaktar reduktionen av betongens tryckhållfasthet p.g.a. långvarig belastning
	partialkoefficient
γ_c	partialkoefficient för betong, som även beaktar modellosäkerheter och variationer i tvärsnittsmått
ρ	densitet

1 Introduktion

1.1 Inledning

Betong är ett vanligt byggmaterial som funnits i flera tusen år och har många goda egenskaper (Esping, 2017). En typisk egenskap för betong är att tryckhållfastheten är betydligt högre än draghållfastheten. Vid belastning av en betongkonstruktion kommer dragpåkänningar att uppstå, som kan resultera i sprickor. För att konstruktionen skall vara i jämvikt efter sprickbildningen gjuts armering in i betongen (Al-emrani m.fl. 2013). Den vanligaste typen av armering är armeringsstål. Kombinationen av betongens höga tryckhållfasthet och armeringens höga draghållfasthet leder till att konstruktionen som helhet får en hög hållfasthet.

En annan typ av armering är textilarmering. Textilarmerad betong (TAB) är ett lovande alternativ med mindre miljöpåverkan än traditionella byggmaterial och metoder, som erbjuder många positiva egenskaper. TAB är exempelvis korrosionsbeständigt, slankt, lätt och modulärt. Textilarmering består vanligtvis av tvådimensionella öppna textilnät med avstånd 1–5 cm, som man kan kombinera med finkornig betong för att få konstruktionsmaterialet TAB (Brameshuber, 2006b). Materialvalet är dock inte en självklarhet för byggherrarna då standarder för dimensionering saknas, vilket behövs för att textilarmerad betong ska ses som ett pålitligt konstruktionsmaterial. (Williams Portal m.fl, 2017). De flesta försöken som utförts med TAB har varit enaxiella dragförsök, utdragsförsök och tunna plattor belastade i enaxiell böjning (Contamine m.fl, 2011). Det finns endast ett fåtal arbeten gjorda med tvåaxiell böjning samt plattor belastade med böjning i planet. De flesta försöken som utförts med TAB har varit enaxiella dragförsök, utdragsförsök och tunna plattor belastade i en axiell böjning (Contamine m.fl, 2011). Det finns endast ett fåtal arbeten gjorda med tvåaxiell böjning samt plattor belastade med böjning i planet.

1.2 Syfte och mål

Syftet med examensarbetet var att få en bättre uppfattning av beteendet hos en TAB-platta när den belastas i planet. Målet är att experimentellt kunna studera sprickbildningen i en TAB-platta, vilket görs genom att ta fram en provmetod för ett fyrpunkts böjprov.

1.3 Frågeställning

Frågeställningarna som ställdes upp för detta examensarbete är:

- Vilka kriterier styr utformningen av provuppställningen?
- Hur kan lasten vid uppsprickning, brott, knäckning och lokal krossning beräknas eller uppskattas?
- Vilka dimensioner bör TAB-plattan ha för att uppfylla kriterierna?
- Hur skall TAB-plattan utformas och tillverkas?
- Hur bör TAB-plattan ställas upp för att kunna utföra ett fyrpunkts böjprov?
- Hur väl stämmer beräknade laster och försöksresultaten överens?
- Hur ser sprickbildningen ut?

1.4 Metod

Arbetet utfördes genom att kriterier för önskat provresultat sattes upp, och teoretiska beräkningar utfördes utifrån antagna dimensioner och antal armeringslager. Dessa justerades allteftersom för att uppnå önskat resultat. Det önskade resultatet var att sprickor uppstår vid en last som är lägre än den last som ger böjbrott. Lokal krossning, livtryckbrott och knäckning skulle undvikas, dvs de bör ske vid betydligt högre beräknad last. Beräkningarna utfördes i Excel för att underlätta framtagning av dimensioner för den textilarmerade betongplattan.

När dimensionerna på plattan bestämts kunde provkroppar gjutas för att sedan användas i ett fyrpunkts böjprov i olika omgångar. För att få ett lyckat böjprov krävdes det att delar som ingick i provuppställningen utformades. Vid provningen av TAB-plattan lades den upp på två stöd och utsattes för två punktlaster som gav ett böjande moment. Lasten påfördes deformationsstyrt och sprickbildningen följdes och analyserades med hjälp av ”Digital Image Correlation”. Försöket utvärderades för att se om provningen gav ett önskat resultat, annars krävdes förbättringar. Kolfibernetets placering såg lite olika ut för de olika provkropparna.

Efter utförda belastningsförsök på alla provkroppar, analyserades och diskuterades resultaten och förbättringsmöjligheter. Teoretiska beräkningar jämfördes med försöksresultaten och skillnader dokumenterades och analyserades.

1.5 Avgränsningar

Försöken begränsades till en typ av test: fyrpunkts böjprov. Det var även endast en typ av armering och betongblandning som provades. Detta på grund av att fokus var att kunna följa sprickbildningen och hur textilarmeringen uppför sig med en nyutvecklad provmetod. Fokus låg därmed främst på att utveckla provmetoden och inte på att jämföra olika material.

2 Textilarmerad betong

2.1 Textilarmerad betong

Textilarmering finns i två utformningar, två- eller tredimensionella textilnät som består av trådar av fibrer med ett sammanhållande material (Cementa AB m.fl, 2017). Kolfiber är ett av de fyra huvudmaterial av fibermaterial som kan används i betongkonstruktioner, de andra är stål, glas- och aramidfiber. En av de vanligare fiberarmerade betongen som används idag är glasfiberarmerad betong (GFB), som består av slumpmässigt placerade korta glasfibrer i betongen (Voss, 2006). Dock har det på senare tid forskats inom textilarmerad betong (TAB), där fibrerna är placerade i huvudspänningsriktningen vilket leder till en effektivisering jämfört med fiberarmerad betong. Med kolfibers höga draghållfasthet, töjbarhet och sprickkontroll i kombination med finkornig betong, som har en hög tryckhållfasthet, kan tunna och lätta konstruktioner framställas med höga tryck- och draghållfastheter (Brameshuber, 2006a).

2.2 Betong

Beroende på textilarmerings nätstorlek så begränsas betongens maximala ballaststorlek. Textilarmering används därav med finkornig betong vars ballaststorlek ligger mellan 2–4 mm (Cementa AB m.fl, 2017). Betong är i sig ett material som är väldigt sprött med en låg töjbarhet i drag - materialet är bra på att ta upp stora tryckkrafter men dålig på att ta upp dragkrafter. Därför krävs en komplettering i form av armering med en hög draghållfasthet (Folkerman & Eriksson, 2016).

2.3 Textilarmering av kolfiber

Kolfiberarmering är ett tvådimensionellt textilnät som består av vinkelräta trådar, varp och väft. Trådarna är av en fiberkomposit bestående av kolfiber tillsammans med ett sammanhållande matrismaterial, såsom epoxiplast. Matrisens syfte är att få fibrerna att samverka till en kontinuerlig tråd av fibrer, vilket gör att högre hållfasthet kan uppnås. Matrisen ger även ett skyddande lager mot mekaniska och kemiska angrepp (Cementa AB m.fl, 2017).

Den största fördelen med kolfiberarmering är att den inte korroderar, alltså ställs inga krav på hur tjockt det täckande betongskiktet skall vara utifrån beständighetsskäl. Dock finns flera fördelar samt nackdelar kring kolfiberarmering. Några av dessa listas nedan (Cementa AB m.fl, 2017) (Wallis, 2011).

Fördelar:

- Armeringen kan formas smidigt till komplexa former, vilket är svårare med traditionell armering, såsom stålstänger.
- Korroderar inte
- Mycket lång livslängd
- Ganska låg investeringskostnad för tillverkning av kolfiberarmering
- Hög utmattningstålighet

Nackdelar:

- Begränsad forskning kring kolfiberarmering: hållfasthetsberäkningar, simulationsverktyg och CAD-verktyg behöver utvecklas
- Hög materialkostnad
- Tidskrävande tillverkningsprocess
- Låg grad av automatisering

2.4 Kolfiber

Materialet kolfiber utvecklades under 50-talet och började användas inom industrier som bil- och flygindustrin i hopp om att kunna ersätta det tunga stålet med lättare material. Kolfiber är ett material som per definition skall bestå av 80–95% kol och har god beständighet mot vatten och kemiska lösningar. Materialet kolfiber har en hög draghållfasthet på grund av att kolatomernas starka bindning längs med fibrerna. Däremot är draghållfastheten ortogonalt fibrerna låg på grund av kolatomernas bindning vinkelrätt fibrernas längd bildar van der Waals-bindningar (Berggren, 2009).

Kolfiber kategoriseras som PAN (polyacrlonatril) eller Pitch (petroleum eller stenkol), PAN och Pitch har olika egenskaper och den som vanligtvis används i byggbranschen är PAN (Berggren, 2009).

Tabell 2.1. Vanliga egenskaper hos några olika material.

Material	E-modul (GPa)	Draghållfasthet (MPa)	Brottstukning (%)
Betong	20–50	1–4	-
Stål	200	200–2000	10
Kolfiber (PAN)	230–600	2500–6000	9–20
Kolfiber (Pitch)	200–800	2100–3100	2–9

Kolfiber kan ytterligare delas upp i klasser efter dess egenskaper. International Union Of Pure And Applied Chemistry (IUPAC) har tagit fram ett klassificeringssystem där följande tas kategorier tas fram (Wallis, 2011):

- High Tensile/Strength (HT/HS) – Kolfiber med draghållfastheten över 3 GPa.
- High Modulus (HM) – Kolfiber med elasticitetsmodul mellan 30–500 GPa.
- Ultra High Modulus (UHM) – Kolfiber med elasticitetsmodul över 500 GPa.

2.4.1 Brandegenskaper

Kolfiber är ett material som är känsligt för höga temperaturer och bör brandskyddas. Att gjuta in kolfiberarmeringen i betong ger ökad brandsäkerhet. Betongen fungerar då som ett brandskydd, då betong inte brinner och inte heller avger rök eller giftiga gaser. Samt att betongkonstruktionen behåller sin bärförmåga även vid brand. Vid behov går det även att använda brandskyddsskivor runt konstruktionen (Svensk Betong, 2018)

2.4.2 Tillverkare

Det finns en rad olika tillverkare av textilarmering. I Sverige finns det två ledande företag när det gäller tillverkning av kolfiberarmering, dessa är Sto Scandinavia AB och Sika Sverige AB. Förstnämnda företaget har en rad olika produkter kring kolfiber.

StoFRP är samlingsnamnet för Stos produkter som består av kolfiberförstärkning. Inom StoFRP finns **StoFRP Sheet** kolfiberväv, **StoFRP Plate** färdiga laminat, **StoBar** kolfiberstavar och **StoFRP Grid** armeringsnät. Enligt Stos rekommendationer skall ytan som utgör vidhäftningen bestrykas med primer innan användning av kolfiberförstärkning (Berggren, 2009).

Sika Sverige AB tillverkar kolfiberarmering i form av kolfiberband och kolfiberväv. **Sika CarboDur** är samlingsnamnet för dessa produkter, som är ett system med kolfiberarmering för konstruktiv förstärkning. Båda förtegen erbjuder även betongblandningar som är framtagna för just kolfiberarmering som har en hög vidhållhållfasthet med kolfiber (Sika Sverige AB, 2010).

3 Överväganden

Inför provningen skulle en provkropp med lämpliga dimensioner väljas utifrån ett antal kriterier. Fullständiga beräkningar finns i Appendix.

3.1 Kriterier

För att uppnå målet med examensarbetet, vilket var att kunna studera sprickbildningen hos en TAB-platta vid ett fyrpunkts böjprov, behövde ett antal kriterier ställas upp. Utifrån dessa kriterier bestämdes plattans dimensioner. Önskat utfall var att sprickbildning skulle ske för ökande last önskas fram till böjbrott. Risken för livtrycksbrott och knäckning av plattan skulle därmed minimeras. Även risken för lokal krossning av lasten skulle minimeras för ett lyckat resultat.

Kriterierna provkroppen skulle uppfylla var följande:

- Spricklasten skall vara lägre än böjbrottlasten.
- Minimera risken för knäckning.
- Minimera risken för lokal krossning eller livtrycksbrott.

3.2 Spricklast och brottlaster

För att teoretiskt säkerställa att spricklasten är lägre än brottlaster behöver sprickmomentet och det dimensionerande momentet beräknas, där sprickmomentet skall vara lägre än det dimensionerande momentet. Dessa jämfördes sedan med momentet som uppstår på grund av last för att kunna veta vid vilken last sprickmomentet och det dimensionerande momentet uppstår. Beräkningarna gjordes enligt Eurokod 2. Se Appendix för att följa fullständiga beräkningar.

3.2.1 Dimensionerande moment

Det dimensionerande momentet beräknas utan hänsyn till tryckarmering (se ekv. 3–1). Enligt det tekniska faktabladet för textilarmeringen (StoFRP Grid) så är draghållfastheten för armeringsnätet 5500N/fiberbunt. Dragzonen antogs verka på halva betongplattan och dragarmeringens area beräknas därför till hälften av den inlagda. Draghållfastheten hos textilarmeringen beräknades med två olika utnyttjandefaktorer: 0,2 respektive 0,52, vilket innebar att endast 20% respektive 52% av draghållfastheten antas vara användbar (Voss, 2006) (Triantafillou, 2016). För att öka det dimensionerande momentet ökades antalet armeringsnät, vilket innebar en ökning av dragkapaciteten. Därmed bestämdes det att 3 armeringsnät skulle placeras i provkroppen för att få lämplig momentkapacitet.

$$M_d = k * F_{ct} * z \quad (\text{ekv 3–1})$$

3.2.2 Sprickmoment

Sprickmomentet beräknas enligt (ekv 3–2).

$$M_{cr} = \frac{f_{ct,fl} * I}{h-x} \quad (\text{ekv 3–2})$$

Den dimensionerande tryckhållfastheten (f_{cd}) på betongen antogs till en början till 57 MPa, efter tryckprovning på kub av betongen framgick det att medelvärdet hos betongens tryckhållfasthet på kuber ($f_{cm,cube}$) blev 57 MPa. Ur tryckhållfastheten och provkroppens höjd beräknades medelvärdet på böjdraghållfasthet $f_{ct,fl}$ till 4,195 MPa, vilket användes i ekvationen för sprickmomentet.

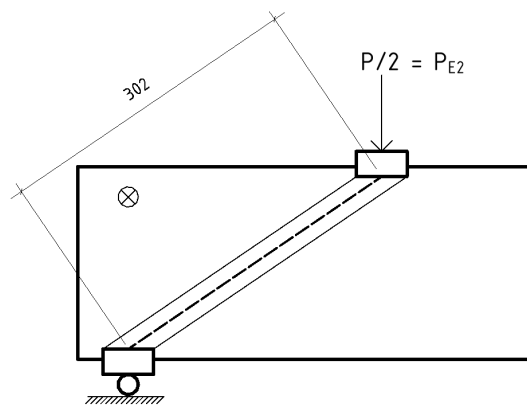
Yttröghetsmomentet påverkar sprickmomentet, ju större yttröghetsmoment desto större sprickmoment. För att minska sprickmomentet kunde alltså höjden och bredden på plattan minskas. Vid beräkningar antogs till en början en bredd och höjd, som efterhand justerades för att sprickmomentet skulle bli mindre än det dimensionerande momentet (med marginal).

3.3 Knäckning

Knäckning kontrollerades för att försöka minimera risken för detta att ske. Det beräknades med Eulers knäckfall 2.

$$P_{E2} = \frac{\pi^2 * EI}{L^2} \quad (\text{ekv 3–3})$$

Trycksträvan som beaktades var från upplagsstödet till lastens upplag, se Figur 3.1. Eftersom avståndet är längre jämfört med vertikal knäckning, och effekten av övriga delar av plattan försumrades, så har antaganden på säker sida gjorts. Enligt ekvationen kommer knäcklasten att minskas ju längre avstånd, och det som vill fås fram är minsta knäcklasten för att få en uppfattning när den möjligtvis uppkommer. Böjstyvheten I beror på tvärsnittets bredd samt last- och upplagsplattans längd. P För att minimera risken för knäckning kan dimensionerna för TAB-plattan ändras, genom att minska höjden och skjuvspannet kommer knäckningen ske vid högre laster.

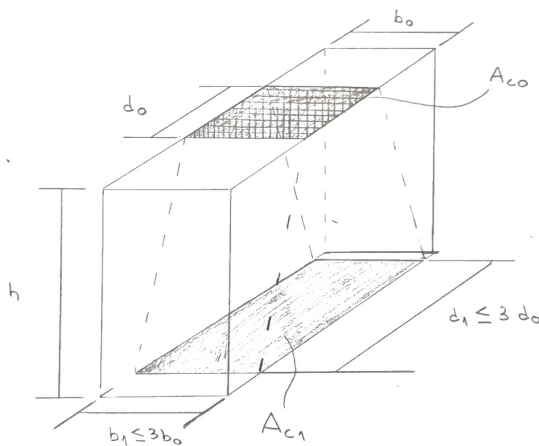


Figur 3.1 Trycksträvan som antogs vid beräkningar av knäckning[mm].

3.4 Lokal krossning

För att undvika att punktlasten krossar provkroppen lokalt, beräknas kapaciteten för lokal krossning (se ekv 3–4). Lokal krossning kommer ske vid en högre last ju större ytan där lasten placeras är, därmed kan detta undvikas med en större lastyta. Lastytans area bestämdes därmed till 0,02x0,05 m. Då krossning skulle undvikas, användes den dimensionerande tryckhållfastheten. Denna beräknades till 26,3 MPa utifrån medelvärdet hos betongens tryckhållfasthet på kuber (57 MPa).

$$F_{Rdu} = A_{c0} * f_{cd} * \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3 * f_{cd} * A_{c0} \quad (\text{ekv. 3–4})$$



Figur 3.2 Modell av tryckarean och fördelningsarean.

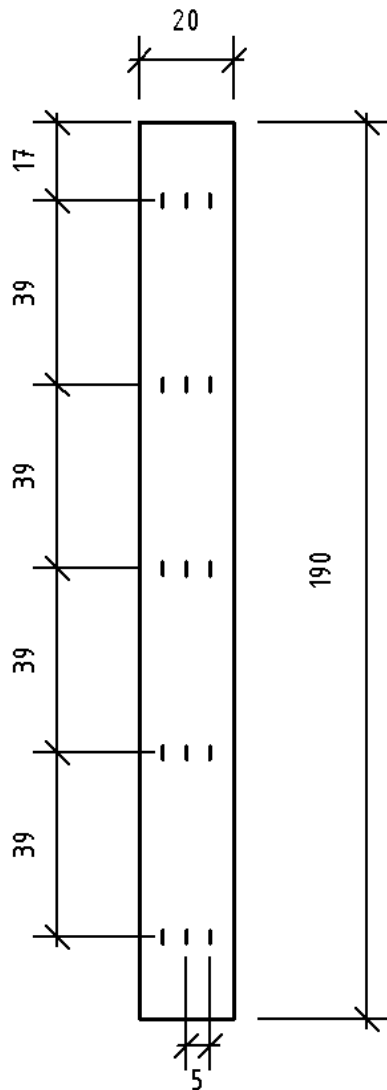
3.5 Livtryckbrott

Livtryckbrott är ett av två brott som kan uppstå i betong på grund av en tvärkraft (Pettersson, 2014). Därför gjordes en kontroll för livtrycksbrott där det ficks fram vid vilken last brottet teoretiskt uppstod. Ekvationen är beroende av plattans dimensioner och ju större dimensioner desto mindre risk för livtryckbrott vid en viss last. Även i denna beräkningen var det den dimensionerande tryckhållfastheten (26,3 MPa) som beaktades.

$$V_{Rd,max} = 0,5 * v * f_{cd} * b * d \quad (\text{ekv. 3–5})$$

3.6 Val av dimensioner

Efter beräkningar kontrollerades om kriterierna uppfylldes med antagna dimensioner. Därefter fick dimensionerna justeras allt eftersom. Detta gjordes i ett Exceldokument. Provkroppens dimensioner valdes slutligen till $LxBxH = 0,9 \times 0,02 \times 0,19 \text{ m}^3$. Det valdes även att 3 lager armeringsnät skulle placeras i provkroppen med 5 mm avstånd från varandra, se Figur 3.3.



Figur 3.3. Planerad armeringsplacering i provkroppens tvärsnitt [mm]

Tabell 3.1. I tabellen redovisas vid vilken last varje fenomen förvänts inträffa

	Förväntas uppstå vid lasten [kN]
Dimensionerande moment	16,5
Sprickmoment	4
Livtrycksbrott, $V_{rd,max}$	17,3 (med dim. tryckhållfasthet)
Lokal krossning under punktlast	45,6 (med dim. tryckhållfasthet)
Knäckning	64,64

4 Utförande

I följande kapitel beskrivs utförandet av laborationen, från det att formen för att gjuta betong i byggdes, till det att experimentet utförts och ett resultat erhöles.

4.1 Provkroppar

4.1.1 Gjutform

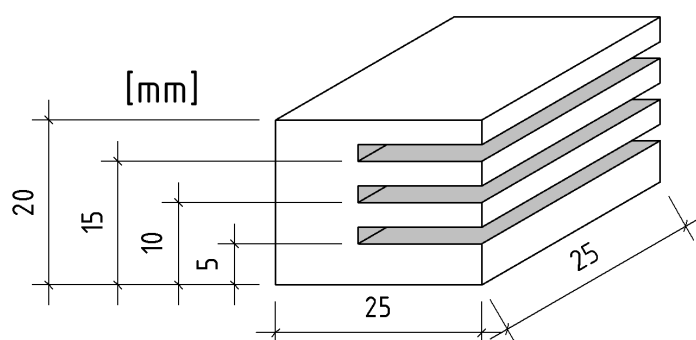
Provkropparna gjöts liggande. För att provkropparna skulle kunna gjutas så, byggdes en form av trä med innermått enligt Tabell 4.1. Formens dimensioner gjordes så att fyra provkroppar kunde få plats, där den sista provkroppens höjd (Provkropp 4) var högre än den bestämda höjden ifall en annan dimension skulle vilja provas. De andra tre provkropparna hade de valda dimensionerna utifrån beräkningar (se Tabell 4.1). Betongen gjöts alltså som en stor liggande platta som sågades i delar, som därefter restes upp och provades stående.

Tabell 4.1. I tabellen redovisas innermått för formen som det gjöts i, samt provkropparnas mått efter sågning.

	Längd [m]	Bredd [m]	Höjd [m]
Hela formen	0,90	1,20	0,020
Provkropp 1–3	0,90	0,020	0,19
Provkropp 4	0,90	0,020	0,45

4.1.2 Fibernätets placering i formen

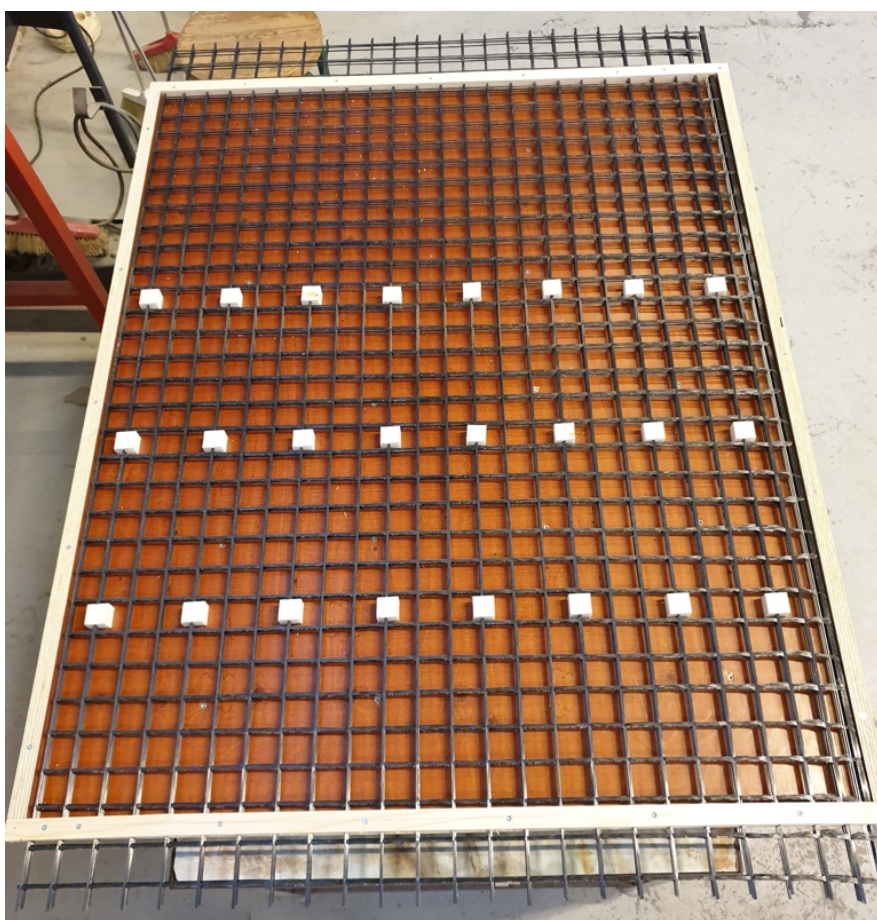
De tre kolfibernetlagrena placerades med 5 mm distans i betongen. Detta gjordes genom att först skruva fast ena änden av nätet i formen med 5 mm distans mellan varje lager. Distansklossar enligt Figur 4.2 placerades i formen efter dimensioner på provkroppar (se Figur 4.3–4.4), klossarna hjälpte även till att hålla upp nätet då det fanns risk att det skulle sjunka vid gjutning. Nätet drogs åt och spändes upp med hjälp av plastkilar och skruvades fast i andra änden av formen (se Figur 4.5).



Figur 4.2. Distansklossarnas utformning.



Figur 4.3. Distansklossarna bar upp armeringsnäten innan och under gjutning.



Figur 4.4. Distansklossarnas placering i formen (planerad kapning längs med distansklossarna i horisontalled).



Figur 4.5. Kilar som spände upp armeringsnätet inför skruvning och gjutning.

4.1.3 Betongegenskaper

Eftersom armeringsnäten låg med 5 mm distans krävdes det att betongen bestod av finkornigt material med högsta kornstorlek om 3-4mm. Betongen bör även vara relativt flytande för att den enkelt ska kunna komma igenom och emellan näten. Betongen behövde även ha en hög vidhäftningsförmåga för att fästa i armeringen. Utifrån dessa krav valdes betong ”StoCrete R 40” med kornstorleken 3 mm (se även Tabell 4.2).

StoCrete R 40

- Enkomponent.
- Hög vidhäftningsförmåga.
- Låg krymp- och sprickbenägenhet.

Tabell 4.2. StoCrete R 40 3 mm, egenskaper enligt tillverkaren

Elasticitetsmodul	Tryckhållfasthet (28 dygn)	Densitet	Vidhäftnings- förmåga	Bearbetbarhet/ flytvärde
E_{cm}	f_{cd}	ρ	-	-
GPa	MPa	kg/m³	MPa	mm
30,7	72,3	2257	3,2	145 (5 min) 128 (15min) 120 (30 min)

4.1.4 Kolfibernetets egenskaper

Kolfiberarmeringen som användes var ”StoFRP Grid 1000 C 390” (se Tabell 4.3). Rutstorleken från det tekniska faktabladet stämde inte riktigt med den verkliga rutstorleken då den varierade mycket med en marginal på ± 5 mm. Dessutom stämde inte faktabladets bredd på armeringen med den verkliga bredden. Faktabladet angav en bredd på 1 meter medan den verkliga bredden mättes till 0,9 meter.

Tabell 4.3. Tekniska data för StoFRP Grid 1000 C 390 enligt tillverkaren.

Fibertyp	Rutstorlek	Draghållfasthet	Elasticitetsmodul	Brottstukning	Tjocklek
-	-	f_{td}	E_{cm}	f	-
-	mm	N/fiberbunt	GPa	%	mm
Höghållfast kolfiber	39	5500	242	17	1,2

4.1.5 Gjutning

Vid gjutning saknades fullt tillträde till all utrustning på grund av renovering och betongen kunde därför inte blandas i en riktig betongblandare. Betongen blandades istället i plasthinkar med handhållen färg-/cementblandare (se Figur 4.6). Ett problem som uppstod var att betongen inte blandades tillräckligt i botten i hinken, vilket insågs efter att första betongblandningen hälldes i formen. Betongen blev inte som förväntat och inte lika flytande som den skulle varit. Betongblandning gjordes i tre omgångar och samma problem uppstod varje gång. Mer vatten tillsattes för att få betongen mer flytande. Detta kan ha medfört att hållfastheten varierade beroende på var i formen de olika blandningarna hälldes i.



Figur 4.6. Blandning av betong i hink med handhållen blandare.

4.1.6 Förberedelser

Betongplattan fick stå och härda täckt med plast under 14 dagar. Genom att täcka betongplattan undviks plastiska krympsprickor under härdning eftersom avdunstningen av vattnet i betongen minskar. Dessutom vattnas plattan med jämna mellanrum för att försäkra att cementet i betongen har tillräckligt med vatten att reagera med (Cementa AB, 2015).

Efter härdning av betongen användes en betongsåg för att såga den stora betongplattan till valda dimensioner (se Figur 4.7). Remsor av betongen där distansklossarna var placerade sågades bort, för att undvika inverkan av dessa under provningen. Provkropparna mättes efter sågning för kontroll av dimensioner. Skillnaden på varje sida av provkroppen var högst 3 mm. Armeringens placering efter sågning var därmed inte exakt som antagen i Figur 3.3, utan som visas i Figur 4.16-4.18.

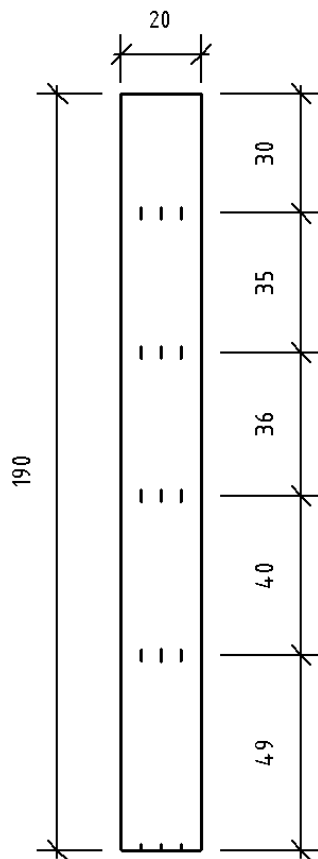


Figur 4.7. Sågning av den stora betongplattan till flera provkroppar.

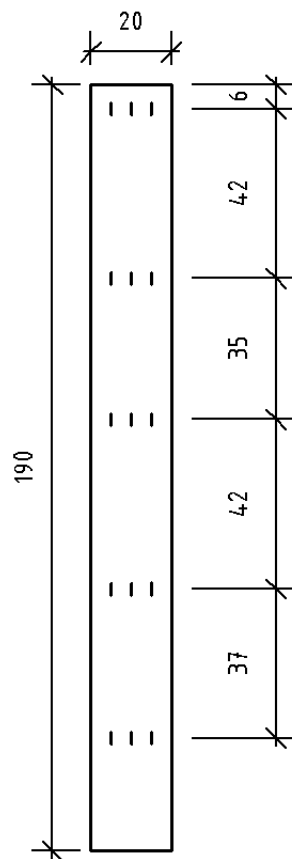
Provkropparna målades i svartvit färg enligt Figur 4.8 för att kunna analysera sprickbildningen med hjälp av bildbehandling.



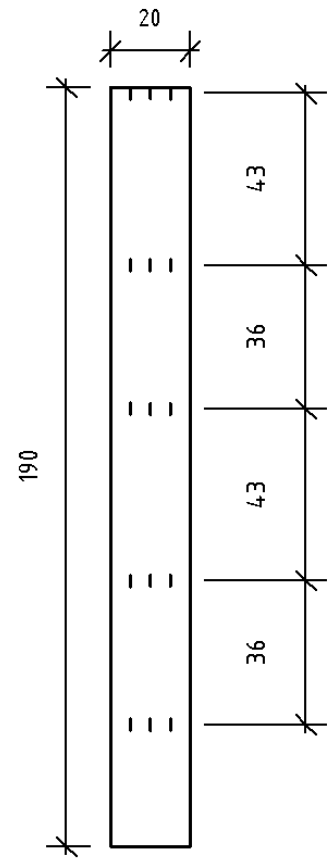
Figur 4.8. Provkropparna efter målning.



Figur 4.16. Verklig position för armeringen i Provkropp 1.



Figur 4.17. Verklig position för armeringen i Provkropp 2.

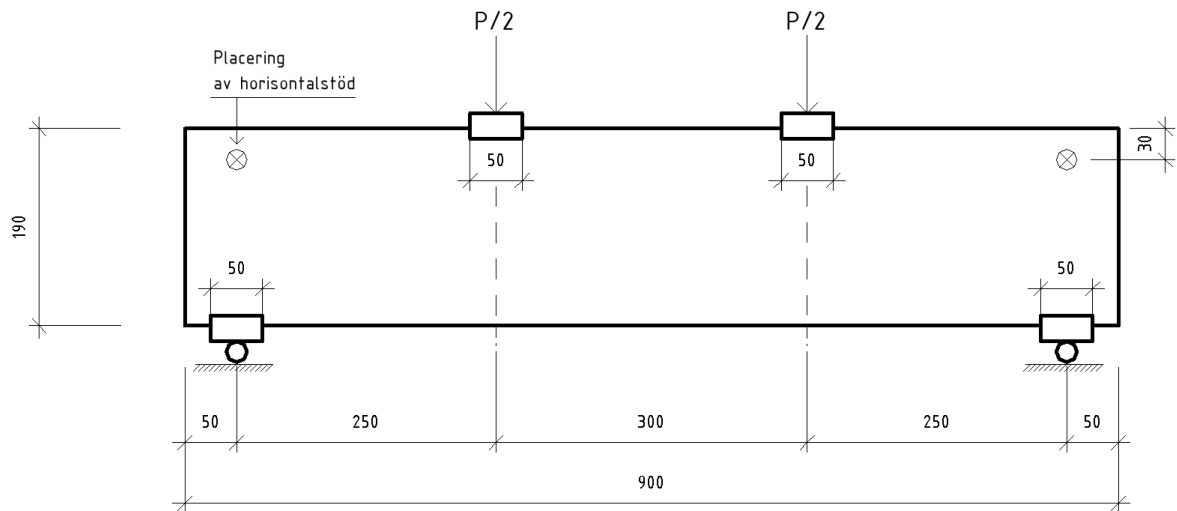


Figur 4.18. Verklig position för armeringen i Provkropp 3.

4.2 Provuppställning

4.2.1 Mått

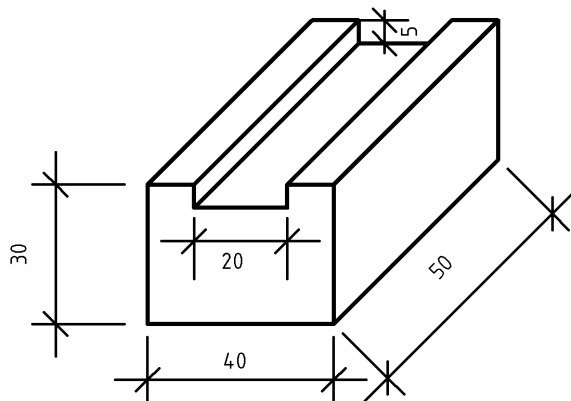
Ett fyrapunktsböjprov utfördes med uppställning och mått enligt Figur 4.9. Två laster placerades en tredjedel av provkroppens längd från varje kant. Provkroppen ställdes på två upplag med rullstöd 50 mm från varje kant.



Figur 4.9. Provuppställning, mått i mm.

Upplagsstöd och laststöd tillverkades av aluminium enligt Figur 4.10-4.11.

Utformningen av stöden gjordes så att plattan kunde vila där. Det hjälpte även plattan att hållas på plats när lasten fördes på.



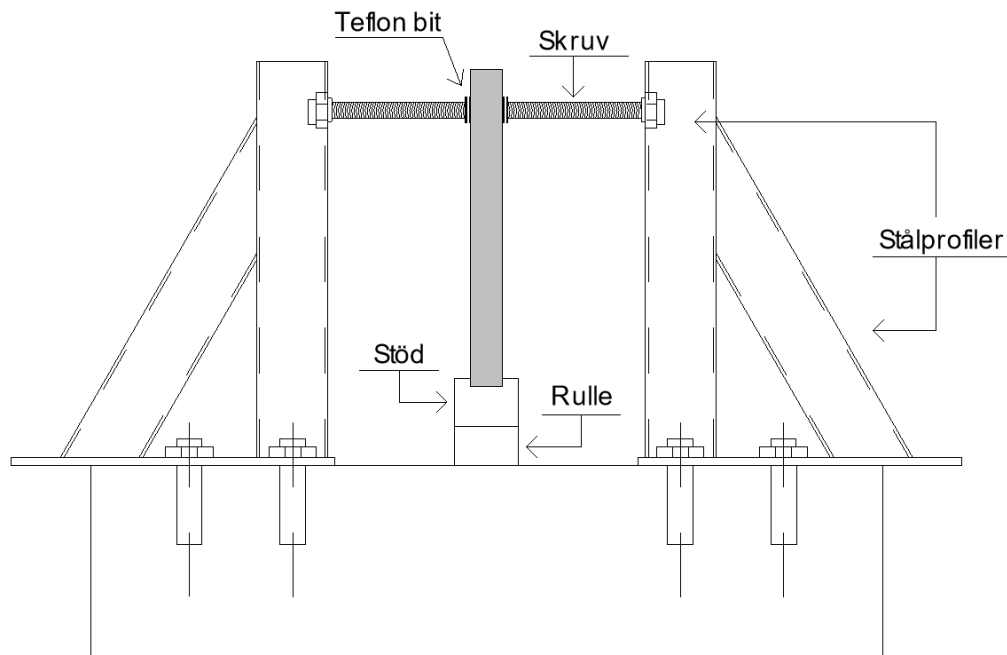
Figur 4.10. Last- och upplagsstöd, mått i mm.



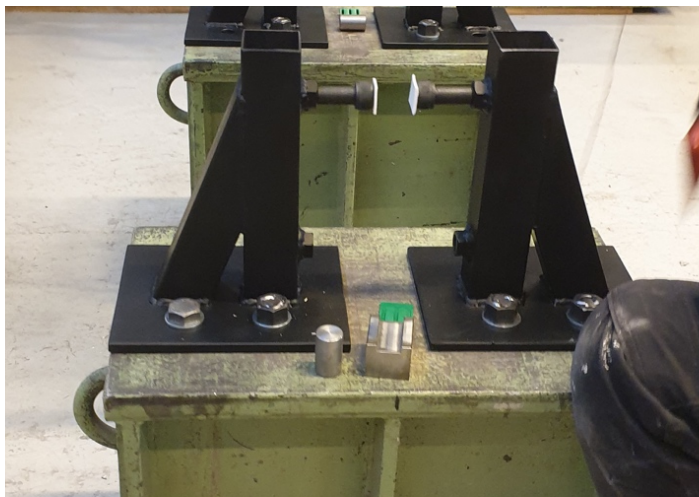
Figur 4.11. Foto på last- och upplagsstöd.

4.2.2 Horisontalstöd

Eftersom provkroppen endast var 20 mm tjock men 190 mm hög fanns det risk för vältning vid pålastning. Olika lösningar diskuterades och en lösning togs fram med fyra stöd i sidled som undviker att plattan välter (se Figur 4.12) - ett horisontalstöd vid varje sida på samma avstånd från kant som upplagsstöden. Avsikten med stöden var att hålla plattan på plats samtidigt som de tar vertikala krafter som kan uppstå vid pålastning av provkroppen. Horisontalstöden tillverkades med VKR-rör (50x50x4 mm) som svetsades ihop (se Figur 4.13).

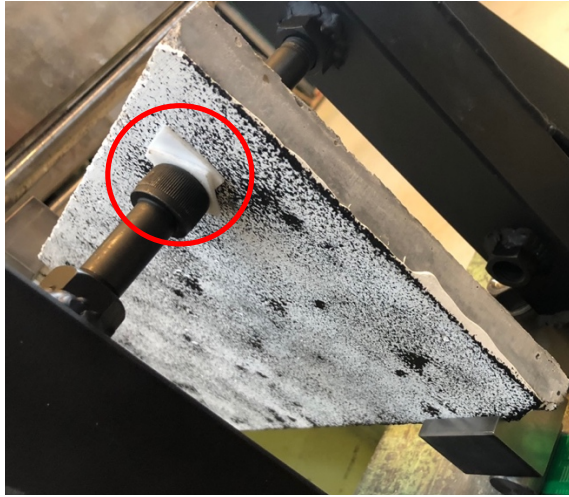


Figur 4.12. Tvärsnittsbild av plattans uppställning.



Figur 4.13. Bild på horisontalstöden.

För att undvika att horisontalstöden påverkar rullning och vinkeländring i horisontalled användes teflon i kontaktytan: En teflonbit på varje skruv som tryckte mot provkroppen och en på betongen på samma plats, så att kontaktytan minimerar friktionen (se Figur 4.14).



Figur 4.14. Teflonbitarnas placering.

4.3 Provning

Provningarna utfördes likadant för alla tre provkropparna, som också hade samma dimensioner. En provning påbörjades med att en provkropp ställdes upp på de specialgjorda upplagsplattorna, på rullstöd. Horisontalstöden justerades efterhand och skruvades åt tillräckligt för att inte provkroppen skulle välta, men inte för hårt utan att provkroppen kunde röra sig i sidled. Här var det viktigt med noggrannhet då provkropparna skulle vara helt vertikala och att last- och upplagsplattorna skulle vara i linje samt att alla mått stämde överens med Figur 4.12. Uppställningen visas i Figur 4.15.



Figur 4.15. Provuppställningen. Kilarna som syns vid upplagen i bilden (gröna) användes för att hålla provkroppen på plats tills cirka 1 kN hade lastats på. Därefter plockades de bort.

Lasten var deformationsstyrd mot deformationen i domkraften. Den ökades inledningsvis med 0,25 mm/min och efter ca 20 minuter av provförloppet, då sprickbildningen var avklarad, så ökades hastigheten till 1 mm/min tills dess att brott uppstod. Provningarna på de tre första likadana provkropparna ansågs vara tillräckliga för att få ett resultat, därför provades inte Provkropp 4 med justerbar höjd.

För att analysera nedböjningen och sprickbildningen med noggrannhet användes ”Digital Image Correlation (DIC)”. Med hjälp av programvara kunde sprickbildningsmönster och sprickvidd spelas in. Inför provning ställdes programmet in med en insamlingshastighet på 1/10 Hz, det vill säga vart 10 sekund togs en bild. DIC använder sig av ett kamerasystem som är framtaget av ARAMIS. Som nämnts tidigare så färgades balkarna i vitt och svart för att ge ett slumpmässigt mönster för att möjliggöra att denna bildbehandlingsanalys. Efter utförd provning analyserades den insamlade datan i programmet ”GOM Correlate”. Där kunde provförloppet följas och data som analyserades vidare togs fram.

5 Resultat

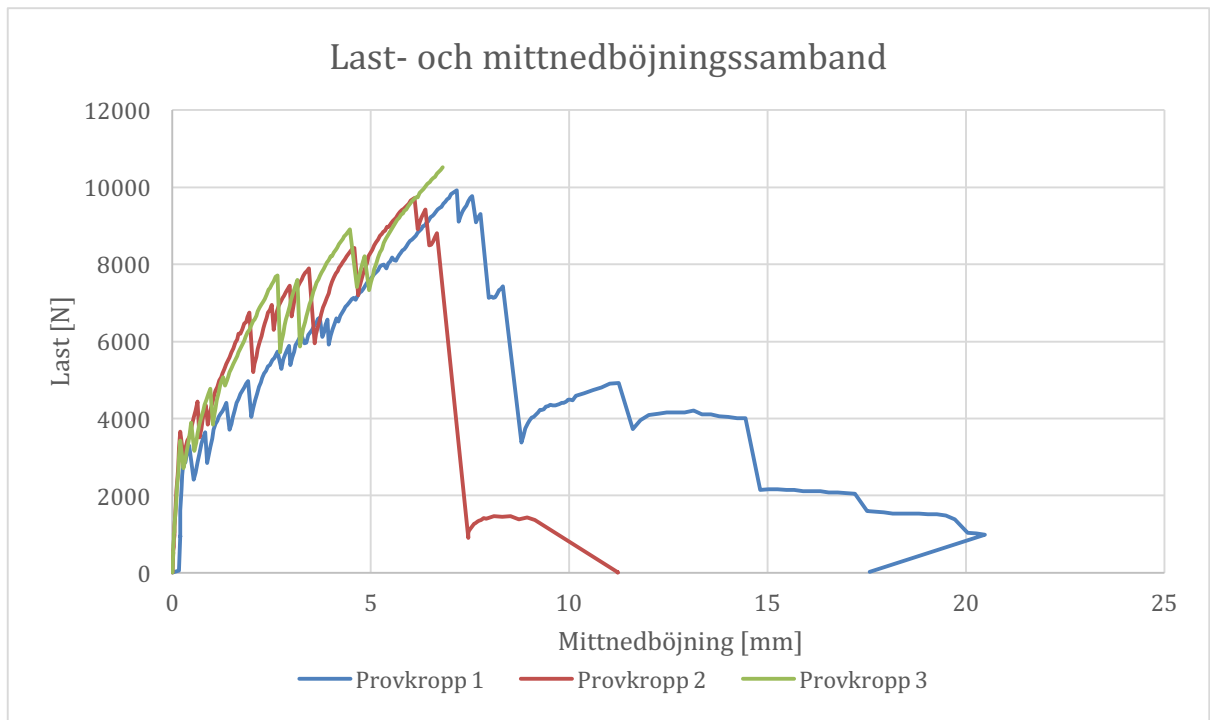
Uppställningen med valda dimensioner samt upplags- och horisontalstöden fungerade precis som önskat. Det framtagna fyrpunktsböjprovet fungerade bra och gav resultat för samtliga provkroppar med sprickbildningar som kunde följas och analyseras.

5.1 Last och deformation

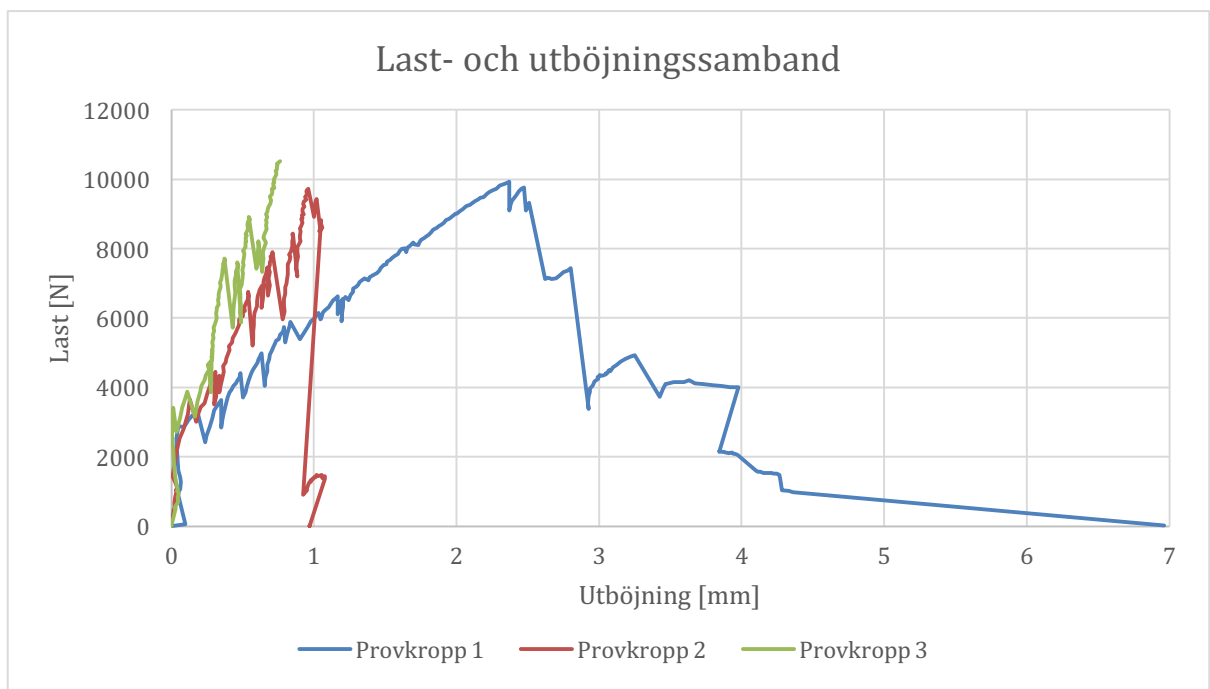
Efter utförda fyrpunkts böjprov på samtliga tre provkroppar sammanställdes resultaten i ett diagram med last mot mittnedböjning, se Figur 5.1. Det som kan läsas av i diagrammet är bland annat att fler sprickor uppkom vid en ökande belastning. Första och andra provkroppen betedde sig mest likt varandra gällande lastökningen, jämfört med första provkroppen där sprickorna bildades vid lägre laster.

I diagrammet i Figur 5.1 kan även brottlasten och maxlasten läsas av. Maxlasten är den högsta lasten som uppnås under provningen, och inträffade oftast då en av sprickorna uppkom. Vid brottlasten däremot slets armeringen förmodligen av. För alla tre provkroppar hamnade brottlasten mellan 8–10 kN. Vid brottlasten kollapsade Provkropp 3, medan de andra provkropparnas last endast avtog drastiskt. För första och andra provkroppen är maxlasten inte samma som brottlasten, utan högre. För exakta värden på sprick-, max- och brottlaster se Tabell 5.1. Teoretiskt beräknad brottlast med utnyttjandefaktor 0,2 hamnar relativt nära verkliga brottlaster.

Första provkroppen böjdes i sidled mer än önskat på grund av att den inte var tillräckligt inspänd i horisontalstöden. Detta justerades genom att spänna till horisontalstöden inför de två andra provkropparnas böjprov. I diagrammet i Figur 5.2 redovisas samtliga provkroppars utböjning i sidled. Där kan det läsas av att maximala sidoutböjningen var 1 mm för Provkropp 2 och 3, medan första provkroppen böjde ut så mycket som 7 mm.



Figur 5.1 Diagrammet visar lasten som en funktion av mittnedböjningen för samtliga provkroppar.



Figur 5.2. Diagrammet visar lasten som en funktion av utböjningen för samtliga provkroppar.

Tabell 5.1. Tabellen redovisar verkliga och teoretiska sprick-, brott- och maxlaster för samtliga provkroppar.

	Spricklast [kN]	Brottlast [kN]	Maxlast [kN]
Provkropp 1	3,06	9,207	9,927
Provkropp 2	3,66	8,814	9,723
Provkropp 3	3,42	10,526	10,526
Teoretiskt beräknat med faktor 0,52	4,0	16,5	-
Teoretiskt beräknat med faktor 0,2	4,0	6,5	-

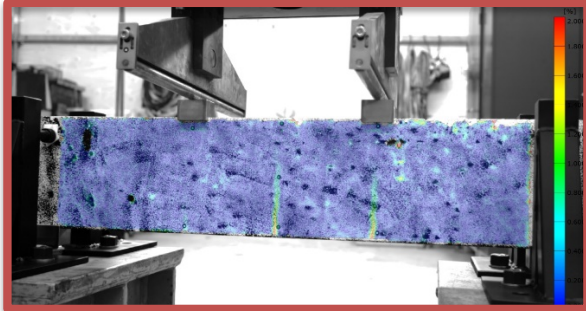
5.2 Sprickbildningen

Sprickbildningen på provkropparna är framtagna med hjälp av programmet ”GOM Correlate”. För samtliga provkroppar visas ett antal bilder för att visa sprickorna som uppkom under försökets gång. För respektive bild med x antal sprickor presenteras en punkt i last- och nedböjningsdiagrammet för att enklare kunna förklara sambandet mellan sprickorna och grafen. Vid varje lastminskning (dropp) i last- och deformationsdiagrammen uppstod någon form av deformation.

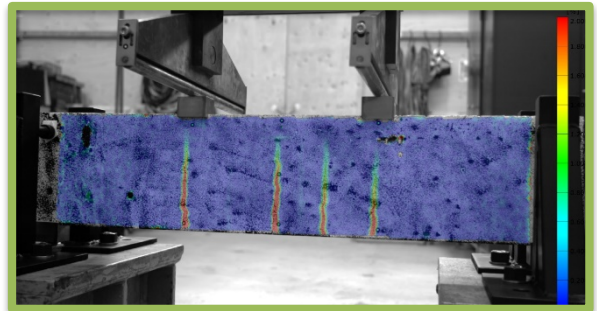
5.2.1 Provkropp 1

För Provkropp 1 nådde brottlasten 9,2 kN, och 12 lodräta sprickor hade uppkommit då. Första provkroppen böjde ut mest i sidled och samtidigt hade den flest sprickor och tydligast sprickbildning av samtliga provkroppar.

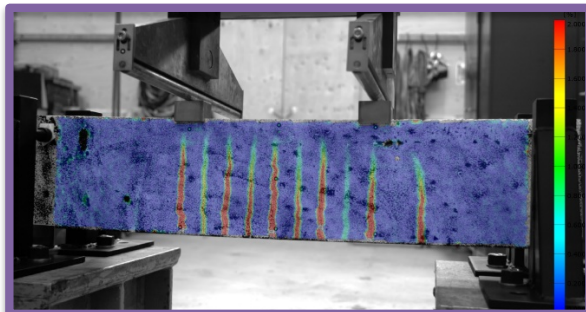
I last- och mittnedböjningsdiagrammet (Figur 5.7) kan man följa när sprickorna i Figur 5.3–5.6 uppstod.



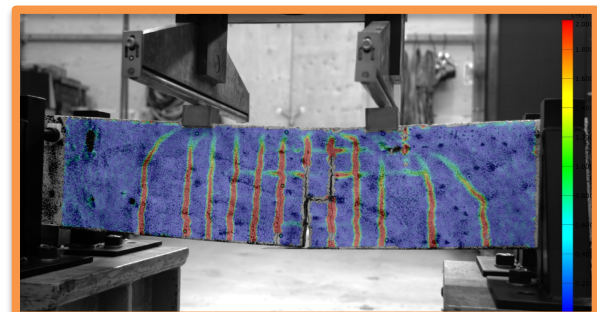
Figur 5.3. Vid mittnedböjningen 0,43 mm och lasten 3,3 kN initieras spricka nr. 2.



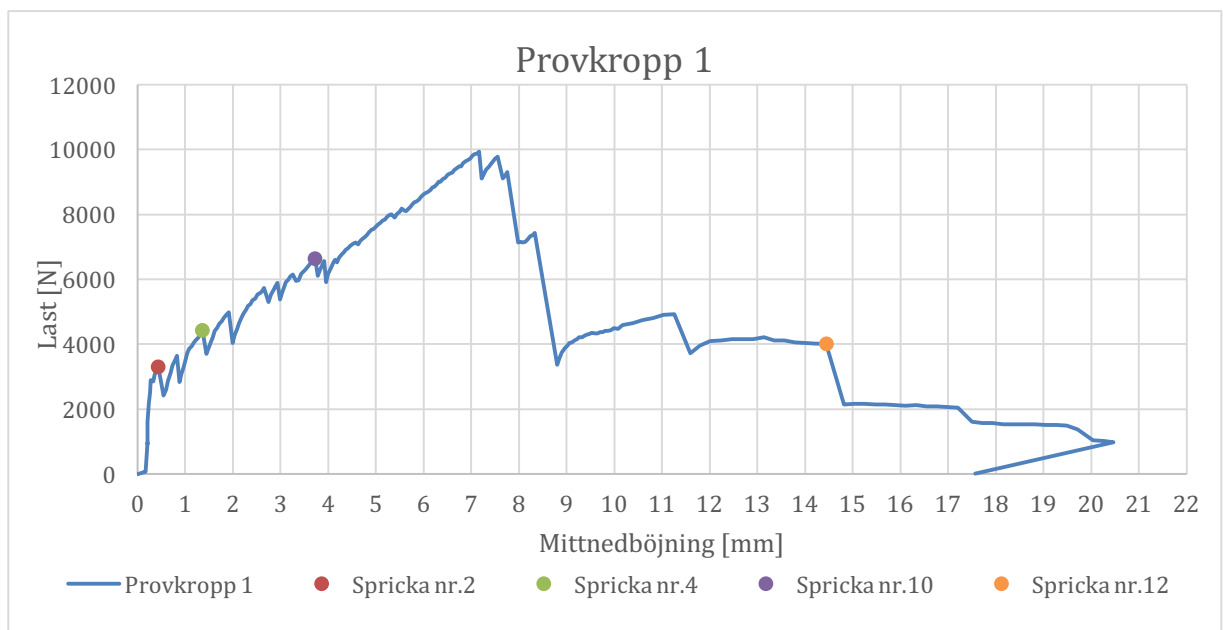
Figur 5.4. Vid mittnedböjningen 1,36 mm och lasten 4,4 kN initieras spricka nr. 4.



Figur 5.5. Vid mittnedböjningen 3,7 mm och lasten 6,6 kN initieras spricka nr. 10.



Figur 5.6. Vid mittnedböjningen 14,4 mm och lasten 4,0 kN initieras spricka nr. 12.

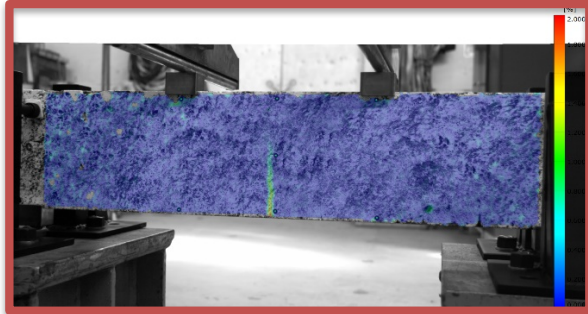


Figur 5.7. Last- och mittnedböjningsdiagram för Provkropp 1. Punkterna representerar sprickuppkomst.

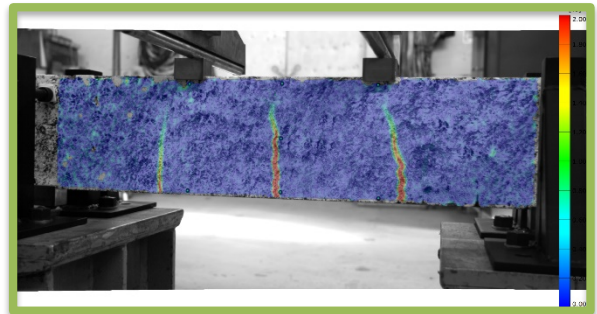
5.2.2 Provkropp 2

Vid provningen av Provkropp 2 var sprickbildningen inte lika tydlig som för första provkroppen. Sprickorna var mer separerade och 8 lodräta sprickor uppkom sammanlagt innan brottlasten vid 8,8 kN. Maxlasten nådde upp till 9,72 kN.

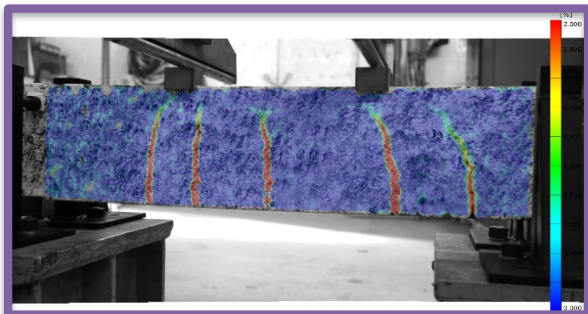
I last- och mittnedböjningsdiagrammet (Figur 5.14) kan man följa när sprickorna i Figur 5.8–5.13 uppstod.



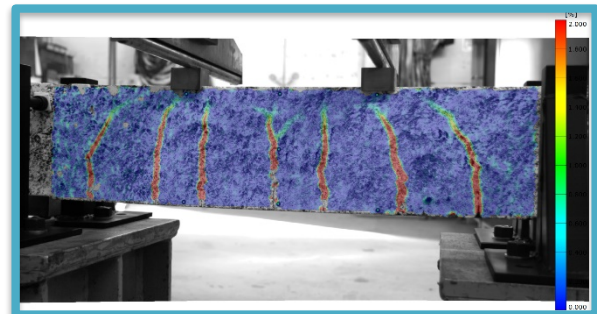
Figur 5.8. Vid mittnedböjningen 0,19 mm och lasten 3,6 kN initieras spricka nr. 1.



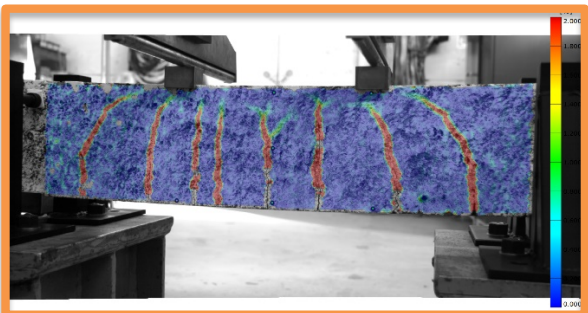
Figur 5.9. Vid mittnedböjningen 0,84 mm och lasten 4,3 kN initieras spricka nr. 3.



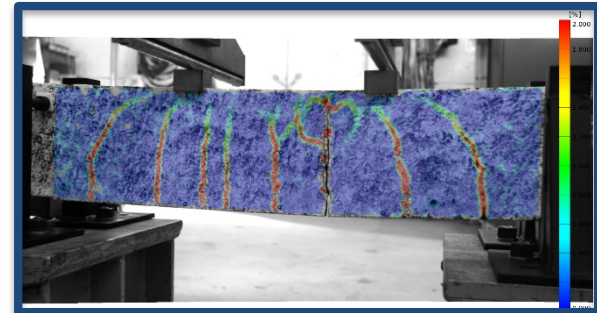
Figur 5.10. Vid mittnedböjningen 2,5 mm och lasten 6,9 kN initieras spricka nr. 5.



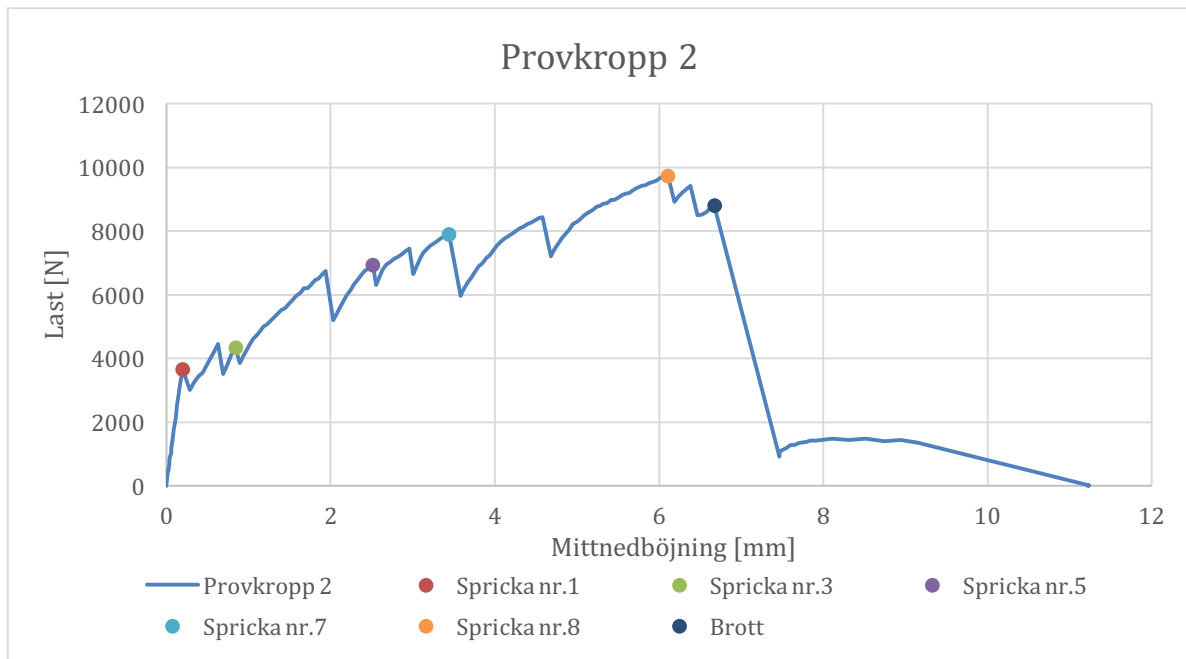
Figur 5.11. Vid mittnedböjningen 3,4 mm och lasten 7,9 kN initieras spricka nr. 7.



Figur 5.12. Vid mittnedböjningen 6,1 mm och lasten 9,7 kN initieras spricka nr. 8.



Figur 5.13. Vid mittnedböjningen 6,7 mm och lasten 8,8 kN uppstod brott.

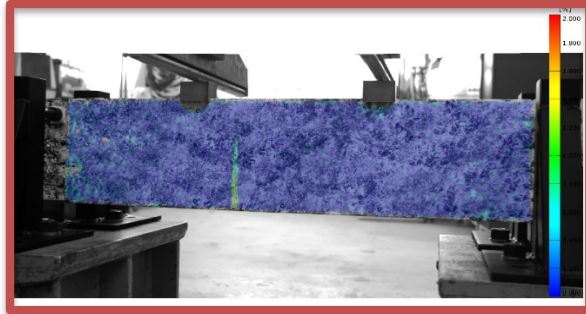


Figur 5.14. Last- och mittnedböjningsdiagram för Provkropp 2. Punkterna representerar sprickuppkomst.

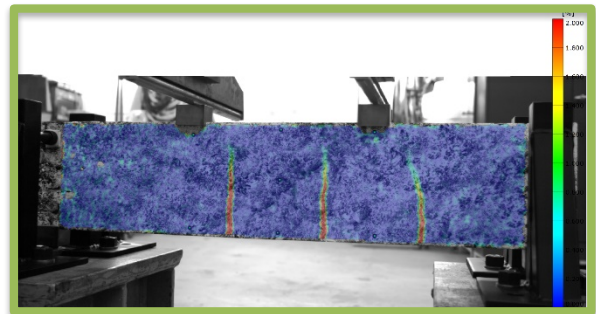
5.2.3 Provkropp 3

I den sista provkroppen uppkom det totalt 8 vertikala sprickor. Därefter kollapsade balken vid 10,5 kN. Maxlasten nådde 10,5 kN vilket var det högsta av alla tre försök. Dock blev brottet mycket sprött vid denna last.

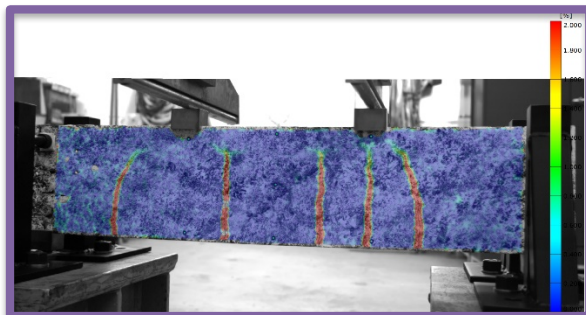
I last- och deformationsdiagrammet (Figur 5.21) kan man följa när sprickorna i Figur 5.15–5.20 uppstod.



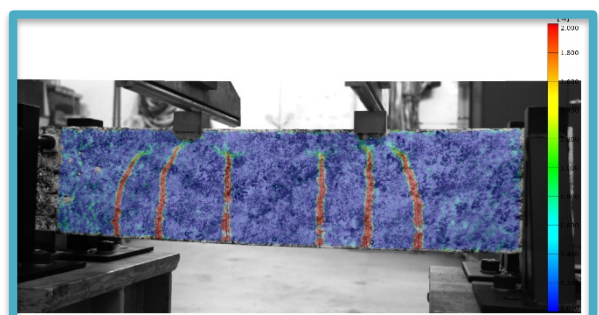
Figur 5.15. Vid mittnedböjningen 0,2 mm och lasten 3,4 kN initieras spricka nr. 1.



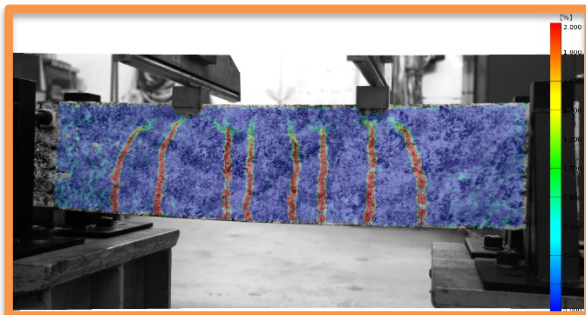
Figur 5.16. Vid mittnedböjningen 0,96 mm och lasten 4,7 kN initieras spricka nr. 3.



Figur 5.17. Vid mittnedböjningen 2,6 mm och lasten 7,7 kN initieras spricka nr. 5.



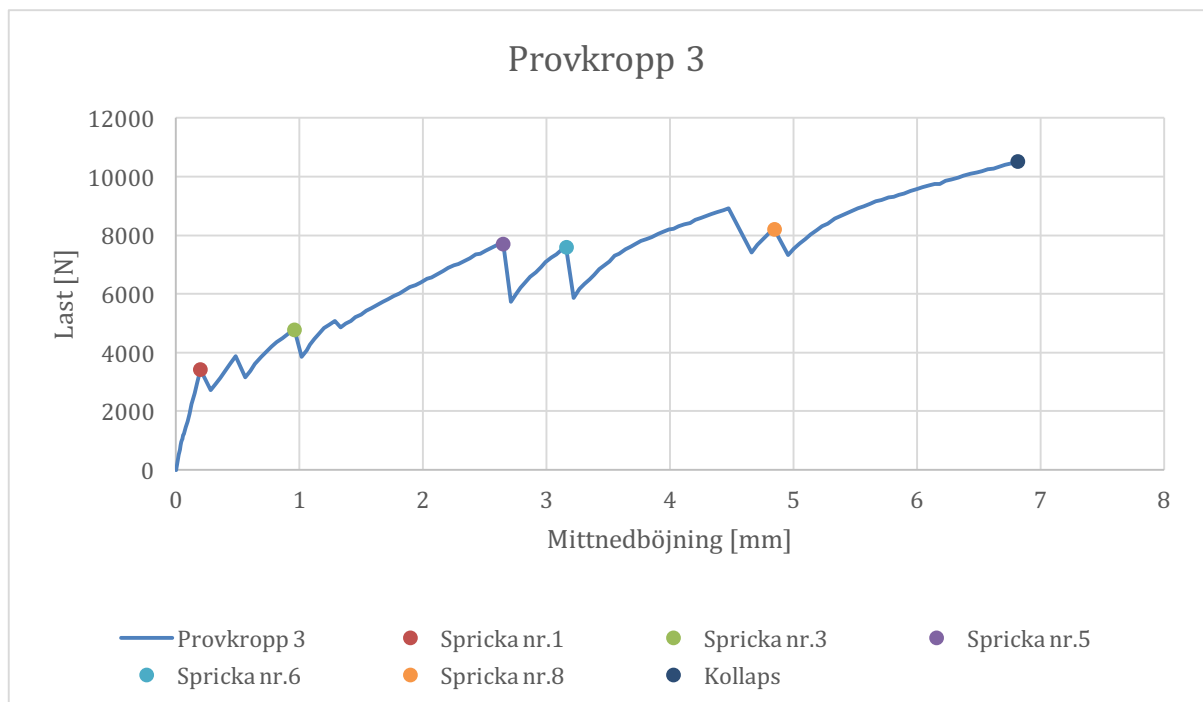
Figur 5.18. Vid mittnedböjningen 3,2 mm och lasten 7,6 kN initieras spricka nr. 6.



Figur 5.19. Vid mittnedböjningen 4,8 mm och lasten 8,2 kN initieras spricka nr. 8.



Figur 5.20. Vid lasten 10,5 kN kollapsade balken.

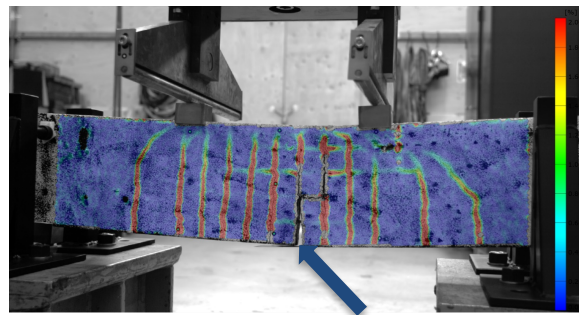


Figur 5.21. Last- och mittnedböjningsdiagram för Provkropp 3. Punkterna representerar sprickuppkomst.

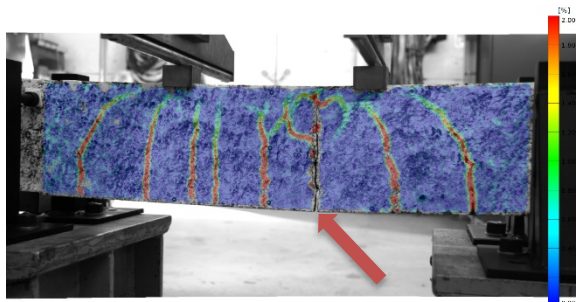
5.3 Sprickvidd

En spricka valdes på varje provkropp utifrån vilken som var störst efter försöket (se Figur 5.22-5.24). Den kunde sedan följas i programmet "GOM Correlate". Lasten plottades som en funktion av sprickvidden i diagrammet i Figur 5.22. De tre sprickorna som valdes plottades tillsammans i ett diagram för att få en överblick på hur bredden varierade mellan provkropparna. Den största sprickbredden fick i det första försöket och hamnade på ca 14 mm. För den tredje provkroppen kunde inte sprickan följas helt då provkroppen kollapsade. För Provkropp 1 och 2 ökade sprickvidden med minskande last efter maxlast.

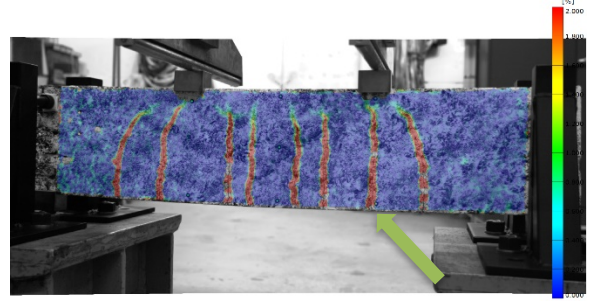
Början av grafen (de två första millimetrarna av sprickvidden) förstoras för att tydligare kunna se ett mönster (se Figur 5.26). Det som kan nämnas är att lasterna varierade för provkropparna för att uppnå en viss sprickvidd. Det kan bero på att sprickorna som valdes att beaktas inte är i samma position på provkropparna. Detta kan ha påverkat lastens förhållande till sprickvidden.



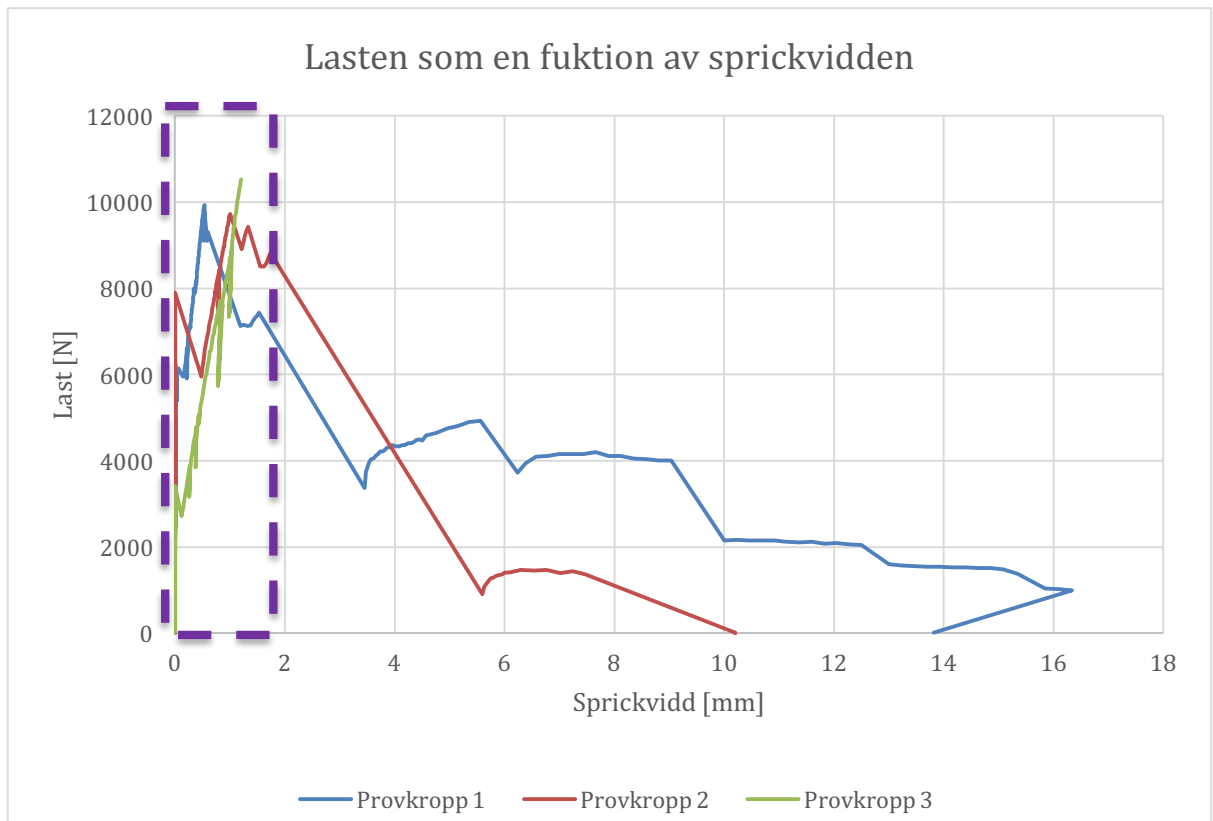
Figur 5.22. Pilen visar sprickan som beaktas vid framtagning av sprickvidd på Provkropp 1



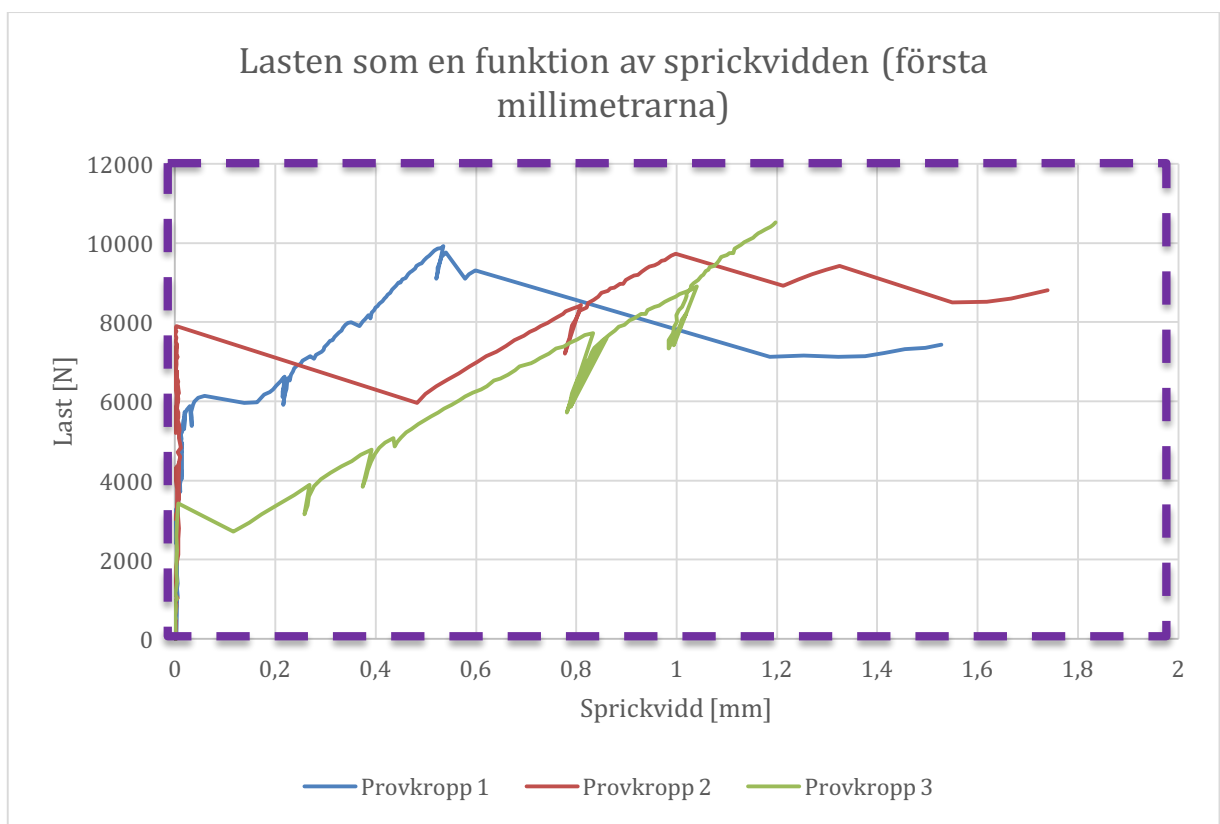
Figur 5.23. Pilen visar sprickan som beaktas vid framtagning av sprickvidd på Provkropp 2



Figur 5.24. Pilen visar sprickan som beaktas vid framtagning av sprickvidd på Provkropp 3



Figur 5.25. Lasten som en funktion av sprickvidden för alla tre provkroppar



Figur 5.26. Inzoomad graf på de 2 första millimetrarna

6 Diskussion

6.1 Provmetod

Huvudsyftet med detta arbete var att ta fram en fungerande provmetod för att utföra ett fyrapunkts böjprov av tunna textilarmerade betongplattor belastade i planet. Provmetoden som togs fram blev lyckad och gav sprickbildningar som gick att följa på tre provkroppar. Provmetoden inkluderar framtagna horisontal- och upplagsstöd. Horisontalstöden var avgörande för en lyckad provmetod eftersom plattan var väldigt tunn, och annars kunde vält under böjprovet. Dock behövde man vara noga med att inte spänna alltför hårt eftersom det då skulle motverka att provkroppen kan röra sig fritt i längsled. Det var även därför teflonbitar sattes vid kontaktytan för att minska friktionen.

Upplagsstöden var traditionella rullstöd med en fördjupning i plattorna som provkroppen kunde vila i. Dessa upplagsstöd fungerade bra för denna provmetod.

Det i provmetoden som fungerade mindre bra var sågningen av betongen i den stora formen till mindre provkroppar. Det var onödigt jobbigt och svårt. Formen var alldeles för lång och bred - sågningen tog lång tid och resulterade i att en av provkropparna blev sned. Med facit i hand är utformningen av formen det som bör ändras på till nästa försök. Provkropparna borde inte göras lika breda, för enklare sågning. Alternativt kan en form skapas för varje provkropp.

6.2 Teoretiska beräkningar jämfört med verklighet

Precis som beräknat så skedde inte lokal krossning, knäckning eller livtrycksbrott.

Spricklasten däremot var lägre i verkligheten än vad den var beräknad till. Den var beräknad till cirka 4–4,5 kN - dock skedde den första verkliga sprickan på alla tre provkropparna vid 3–4 kN. Beräkningarnas resultat stämde inte riktigt överens med verkligheten men var relativt nära.

Maxlasten beräknades med utnyttjandefaktorer för textilarmeringen på 0,52 och 0,2. Beräkningen med en utnyttjandefaktor på 0,2 gav en maxlast på 6,5 kN, medan faktorn 0,52 gav 16 kN. Provkropparnas verkliga maxlaster hamnade på ungefär 9–10 kN. Alltså hamnade det verkliga resultatet mellan värdena utnyttjandefaktorerna gav. Dock var utnyttjandefaktorn på 0,2 en aning närmre.

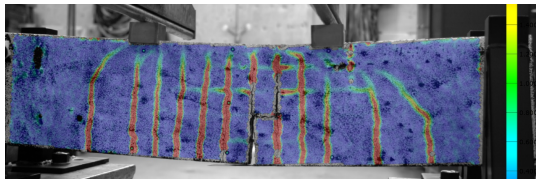
6.3 Variation mellan provkroppar

I helhet varierade inte provkropparna så mycket i sprick-, brott- och maxlast. Den lilla variationen kan bero på att provkropparna inte var helt identiska, främst på grund av sågningen och gjutningen.

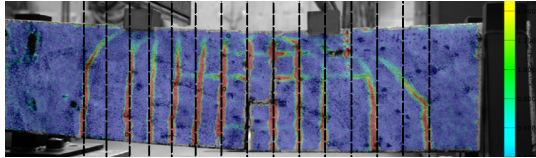
Den första sprickan på samtliga provkroppar uppkom vid en last mellan 3–4 kN. Den första provkroppen sprack vid den lägsta lasten (se Tabell 6.1), medan Provkropp 2 tålde mest. Det skiljde sig dock endast 0,6 kN mellan högsta och lägsta spricklasterna.

Trots att Provkropp 2 var den som fick sin första spricka vid den högsta lasten, var det även den provkroppen som fick lägst brottlast. Brottlasten för Provkropp 2 var 8,8 kN, medan Provkropp 3 gick till brott vid 10,5 kN. Skillnaden mellan högsta och lägsta brottlasterna var alltså 1,7 kN. Även maxlasten var högst hos Provkropp 3 och lägst hos Provkropp 2.

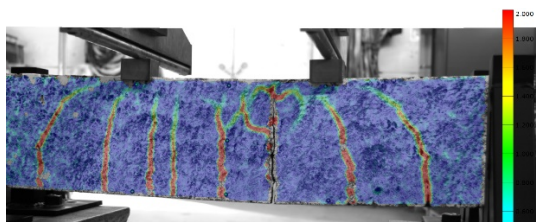
För Provkropp 1 och 2 uppkom en spricka vid maxlasten medan brott skedde vid en lägre last. För Provkropp 3 kollapsade provkroppen vid den högsta lasten - den hade alltså samma brottlast och maxlast.



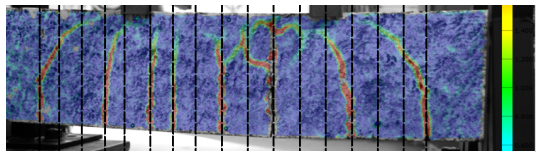
Figur 6.1. Sprickbildningen för Prov kropp 1



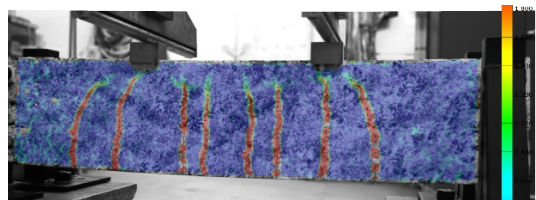
Figur 6.2. Vertikala armeringsstänger i förhållande till sprickbildningen



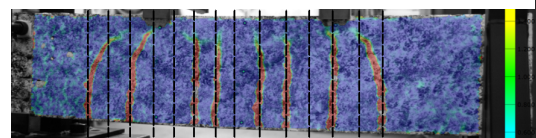
Figur 6.3. Sprickbildningen för Prov kropp 2



Figur 6.4. Vertikala armeringsstänger i förhållande till sprickbildningen



Figur 6.5. Sprickbildningen för Prov kropp 1



Figur 6.6. Vertikala armeringsstänger i förhållande till sprickbildningen

Sprickbildningen för provkropparna såg relativt olika ut. Första provkroppen fick flest och jämnast sprickor. De följde armeringsnätet och var därför enkla att läsa av. Samtidigt var provkroppen den som böjde ut mest i sidled.

Horisontalstöden var inte lika spända som för de andra provkropparna, vilket kan ha påverkat resultatet. Det uppkom även sprickor i horisontalled som följde armeringsnätet.

För andra provkroppen var sprickbildningen mer utspridd, speciellt på höger sida. Som den nedre bilden visar så uppstod sprickorna vid varje, varannan och var tredje vertikal armeringssträng. Det var inget tydligt mönster på sprickorna som uppkom - detta kan bero på ojämnheter i betongen. Utöver de vertikala sprickorna bildades det inga horisontella sprickor, utan endast en hjärtformad spricka.

Den tredje provkroppen fick en sprickbildning som var tydligare än Prov kropp 2. De vertikala sprickorna uppkom vid varje, varannan och var tredje vertikal armeringssträng även här. Likt Prov kropp 2 var placeringen på sprickornas uppkomst inte förutsägbara. Inga horisontella sprickor uppkom, och sprickorna var färre än i den första provkroppen.

6.4 Felkällor

De komplikationer som uppstod under arbetets gång var bland annat att betongen inte fick härda i 28 dygn, utan endast 14 dygn. Därmed har inte betongens maximala hållfasthet uppnåtts. Att den inte fick härda i 28 dygn berodde på begränsad tillgång till laboratoriet som skulle renoveras. Renoveringen av laboratoriet gjorde även att det var begränsad tillgång till utrustning, vilket innebar att vi inte kunde använda en riktig betongblandare vid gjutningstillfället. Betongen fick istället blandas manuellt för hand med en handhållen betongblandare i tre omgångar. Den förväntade konsistensen av betongen uppnåddes inte och det var svårt att få en jämn blandning då det fastnade torrt bruk i botten av hinken. Det resulterade förmodligen i tre olika blandningar med olika hållfasthet och kan ha påverkat resultatet. De tre provkropparna har förmodligen varierande hållfasthet.

Armeringens placering var inte samma i alla provkroppar. Beräkningarna gjordes med 5 buntar per provkropp, dock visade det sig efter sågning att provkropparna innehöll 5–5,5 buntar per provkropp. Vissa buntar i underkant av provkroppen var helt eller delvis avsågade.

Den sista provkroppen var inte sågad helt rakt och skiljde cirka 4 mm från ena sidan till den andra. Detta på grund av att det var svårt att hantera en så pass stor betongplatta som skulle sågas i mindre provkroppar. Sågbordet var inte tillräckligt stort för sågen att såga igenom hela plattan (1,2 meter) och man fick därför såga ena sidan, sedan vända på plattan och såga resten. Det gjorde processen väldigt komplicerad, speciellt i början när plattan var som störst.

7 Slutsatser och förslag till vidare arbete

7.1 Slutsatser

Den främsta slutsatsen som kan dras är att provmetoden som togs fram fungerade väl. Frågeställningarna som ställdes upp har kunnat besvaras.

Första frågeställningen behandlade vilka kriterier som styr utformningen av provuppställningen. Dessa ställdes upp i kapitel 3, och utifrån dessa kunde dimensioner för provkroppen tas fram. Utifrån antagna dimensioner kunde sprick-, brott- och knäcklasten beräknas och även risken för lokal krossning. Dimensionerna justerades för att uppfylla kriterierna. Den valda provkroppen, efter justeringar, hade dimensionerna 900x190x20 mm med tre lager kolfiberarmering fördelad i provkroppen.

Tre likadana provkroppar tillverkades. De gjöts i en stor form och sågades därefter. Detta visade sig vara tämligen komplicerat, och i framtida arbete rekommenderas att istället gjuta mindre plattor, en för varje provkropp. Dels för att slippa sågningen, som var väldigt komplicerat, men också för att undvika att såga av textilarmeringen. Då kan man placera den precis som tänkt utan avklippta armeringsstänger.

Under provningen var noggrannhet väldigt viktigt vid uppställning. Mått på last- och stödupplag sattes noga ut, även horisontalstöden. Det var även viktigt att uppspänningen av horisontalstöden var lagom spända. Inte för hårt spända för att undvika motstånd i horisontalled, men inte heller för löst, för att undvika utböjning.

Efter utförd provning kunde verkliga resultatet jämföras med teoretiska beräkningar. De teoretiskt beräknade spricklasterna var aningen högre än verkliga lasterna, men rimligt nära. Vad gäller kolfiberarmeringens hållfasthet så rekommenderar olika forskare olika utnyttjandefaktorer. Det är tydligt att hela kolfiberarmeringens hållfasthet inte kan tas användas, utan en utnyttjandefaktor behövs. Slutsatsen i detta fall var att faktorn på 0,2 gav ett resultat som stämde bättre med verklig maxlast. Utnyttjandefaktorn på 0,52 gav alltför hög maxlast jämfört med försöksresultaten. En viktig slutsats som kan dras utifrån genomfört arbete är därför att det idag är svårt att utföra beräkningar med textilarmering av kolfibrer. Utnyttjandefaktorer varierar och tillräcklig med information om kolfiberarmeringen saknas.

7.2 Förslag till vidare arbete

För att kunna kombinera vidare experimentellt arbete inom området med modellering vore det värdefullt att utföra en kombination av försök med samma material: drag-, utdrags- och fyrapunkts böjprover. Det hade också varit intressant med en universell provuppställning som ger utrymme till att kunna prova textilarmerade betongplattor med olika dimensioner. Den provuppställning som framtagits i detta arbete är ganska begränsad till våra dimensioner.

Andra typer av försök kan vara att dimensionera annorlunda och/eller ha fler armeringsnät. Exempelvis kan man ha samma dimensioner på betongplattan med dubbla nät, totalt 6 stycken. Det vill säga att istället för att ha ett nät med 5 mm distans till nästa nät så har man två ihopsatta nät med 5 mm distans till nästa två nät. Därigenom kan tjockleken hållas konstant, men dubbla antal armeringsnät medverkar.

Eftersom textilarmering är så pass flexibelt kan icke-traditionella konstruktioner utformas. Det vore intressant att prova bärförmågan på sådana konstruktioner. Ett exempel är böjda balkar.

8 Referenser

- Al-emrani, M., Engström, B., Johansson, M., & Johansson, P. (2013). *Bärande konstruktioner*. (Rapport, 2013:1). Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Sika CarboDur Band Tekniskt datablad. (2010). Spånga: Sika Sverige AB
- Berggren, P. (2009). *Dimensioneringshjälp vid konstruktion av kolfiberförstärkning på enkelspänd bjälklagsplatta i ett fack* (Examensarbete). Stockholm: Institution för brobyggnad, Kungliga tekniska högskola. Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:431639/FULLTEXT01.pdf>
- Brameshuber, W. (2006a). Introduction. *Seventh International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS)*, 1–3.
- Brameshuber, W. (2006b). Report 36: Textile Reinforced Concrete-State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC. Retrieved from RILEM publications website: <https://books.google.se/books?id=nV4JmLPlqV0C&lpg=PA1&ots=hVKqYGhoN&dq=report 36 textile&lr&hl=sv&pg=PR20#v=onepage&q=report 36 textile&f=false>
- De första viktiga timmarna. (2015). Stockholm: Cementa AB. Tillgänglig: https://www.cementa.se/en/system/files_force/assets/document/b7/31/det_forsta_viktiga_timmarna_2015_web.pdf?download=1
- Cementa AB, & Svensk Byggtjänst. (2017). *Betonghandbok Material. Del 1*. Stockholm: Svensk Byggtjänst.
- Contamine, R., Si Larbi, A., & Hamelin, P. (2011). Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites. *Materials Science and Engineering A*, 528(29–30), 8589–8598. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.009>
- Esping, O., Concrete, T., & Betong, T. (2017). Betongens framställning och historia. *Betong.Se*, 1. Retrieved from <http://betong.se/2017/05/26/fraga-experten-betongens-framstallning-och-historia/>
- Folkerman, P., & Eriksson, A. (2016). *Tre-punkts balkförsök av fiberarmerad betong* (Examensarbete). Göteborg: Avdelning för konstruktionsteknik, Chalmers tekniska högskola. Tillgänglig: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/248954/248954.pdf>
- Pettersson, F. (2014). *Tvärkraftsdimensionering av armerad betong* (Examensarbete). Uppsala: Institutionen för teknikvetenskaper, Tillämpad mekanik, Byggt teknik, Uppsala Universitet. Tillgänglig: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:752618/FULLTEXT01.pdf>
- Svensk Betong. (2018). *Betong begränsar bränder*. Tillgänglig: <https://www.svenskbetong.se/bygga-med-betong/bygga-med-prefab/brand>

- Triantafillou, T. (2016). *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. Retrieved from
https://books.google.se/books?id=yM4HBgAAQBAJ&pg=PA250&lpg=PA250&dq=koefficient+textile+reinforcement+bending&source=bl&ots=tDzBgj_Fip&sig=ACfU3U3y2TL8N9ZVfsQbaov8pMDkMcIF_A&hl=sv&sa=X&ved=2ahUKEwj9tP6Q_MfhAhUCsKQKHbefAfAQ6AEwD3oECAgQAQ#v=onepage&q=koeffi
- Voss, S. (2006). *Dimensioning of textile reinforced concrete structures*. 151–160.
 Tillgänglig: <https://doi.org/10.1617/2351580087.015>
- Walles, H. K. (2011). *Karosser av kolfiberarmerad epoxi* (Kandidatuppsats). Stockholm: Institutionen för industriell ekonomi, Integrerad produktion, Kungliga tekniska högskolan. Tillgänglig: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:477620/FULLTEXT01.pdf>
- Williams Portal, N., Flansbjer, M., Zandi, K., Wlasak, L., & Malaga, K. (2017). Bending behaviour of novel Textile Reinforced Concrete-foamed concrete (TRC-FC) sandwich elements. *Composite Structures*, 177, 104–118.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.051>

9 Appendix

Moment och tvärkraft p.g.a. last

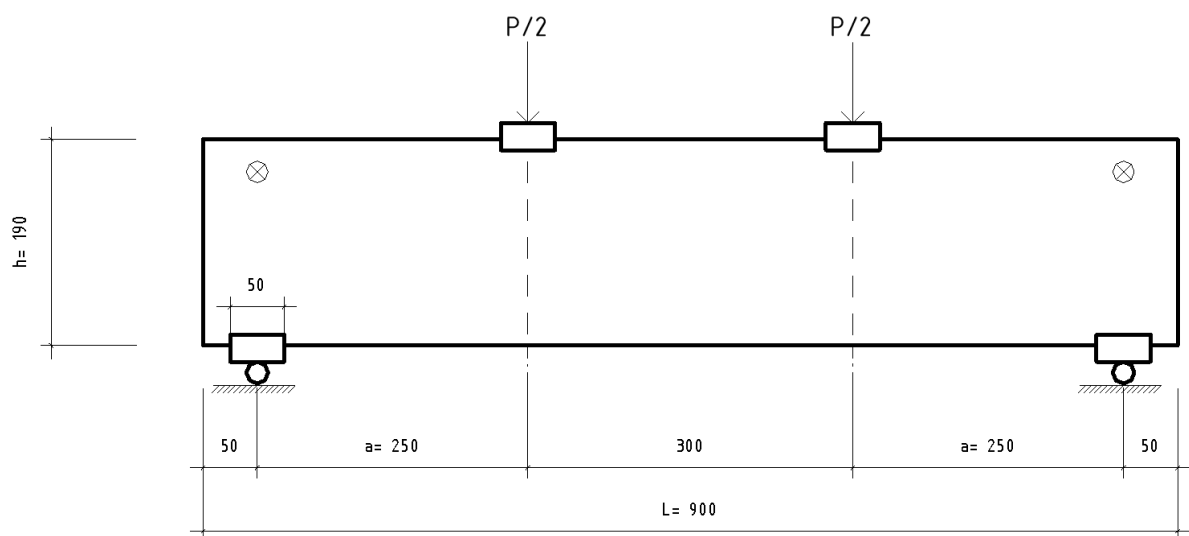
Momentet på grund av laster beräknas enligt:

$$M_{Ed} = \frac{G * L}{8} + \frac{P}{2} * a$$

Tvärkraften på grund av laster beräknas enligt:

$$V_{Ed} = \frac{P}{2} + \frac{G * L}{2}$$

$$G = L * b * h * \rho * g = 0,0806 \text{ kN}$$



Där:

$$L = 0,9 \text{ m}$$

$$b = 0,02 \text{ m}$$

$$h = 0,19 \text{ m}$$

$$\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,82 \text{ m/s}^2$$

$$a = 0,25 \text{ m}$$

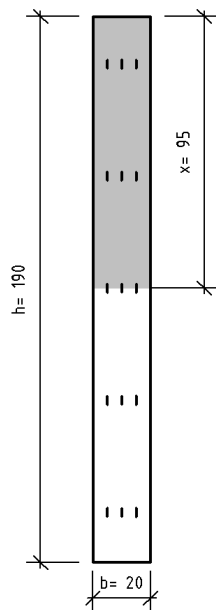
Momentet och tvärkraft beräknas för olika laster P och presenteras i tabellen nedan:

Last, P [kN]	Moment vid last [kNm]	Tvärkraft vid last [kN]
0.5	0,063003766	0,286271
1	0,125503766	0,536271
1.5	0,188003766	0,786271
2	0,250503766	1,036271
2.5	0,313003766	1,286271
3	0,375503766	1,536271
3.5	0,438003766	1,786271
4	0,500503766	2,036271
4.5	0,563003766	2,286271
5	0,625503766	2,536271
5.5	0,688003766	2,786271
6	0,750503766	3,036271
6.5	0,813003766	3,286271
7	0,875503766	3,536271
7.5	0,938003766	3,786271
8	1,000503766	4,036271
8.5	1,063003766	4,286271
9	1,125503766	4,536271
9.5	1,188003766	4,786271
10	1,250503766	5,036271
10.5	1,313003766	5,286271
11	1,375503766	5,536271
11.5	1,438003766	5,786271
12	1,500503766	6,036271
12.5	1,563003766	6,286271
13	1,625503766	6,536271
13.5	1,688003766	6,786271
14	1,750503766	7,036271
14.5	1,813003766	7,286271
15	1,875503766	7,536271
15.5	1,938003766	7,786271
16	2,000503766	8,036271
16.5	2,063003766	8,286271

Sprickmoment

Vid beräkning av sprickmoment används följande ekvation:

$$M_{cr} = \frac{f_{ct,fl} * I}{h - x}$$



Utifrån givet värde på hållfastheten från betongmixen beräknas sprickmomentet med följande värden:

$$f_{cm,cube} = 57 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} \approx \frac{f_{cm,cube}}{1,2}$$

$$f_{cm} = 47,5 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} = 39,5 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\alpha_{cc} = 1,0$$

$$\gamma_c = 1,5 \text{ (normala fall)}$$

$$f_{cd} = 26,33 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,fl} = f_{ctm} * k$$

$$k = 1,6 - \frac{h}{1000} \text{ (Höjden } h \text{ i mm)}$$

$$f_{ctm} = 0,3 * f_{cd}^{\frac{2}{3}} = 2,65 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,fl} = 4,195 \text{ MPa}$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} \text{ m}^4$$

$$b = 0,02 \text{ m}$$

$$h = 0,19 \text{ m}$$

$$x = x_{tp} = 0,095 \text{ m}$$

Sprickmomentet beräknas till:

$$M_{cr} = 0,505 \text{ kNm vilket motsvarar en totalt pålagd last på cirka 4 kN}$$

Dimensionerande moment

Det dimensionerande momentet beräknas utan tryckarmering, ger följande ekvation:

$$M_d = C_{eff} * F_{ct} * z$$

Där:

$$F_{ct} = f_{ct} * n_{nät} * n_{buntar} \text{ (Draghållfastheten för antal lager armeringsnät)}$$

$$f_{ct} = 5500 \text{ N/fiberbunt}$$

$$n_{nät} = 3 \text{ (Antal lager armeringsnät)}$$

$$n_{buntar} = 3 \text{ (Antal fiberbuntar)}$$

$$F_{ct} = 49500 \text{ N}$$

$$C_{eff} = 0,2 \text{ \& } 0,52$$

$$z = 0,08 \text{ m}$$

Dimensionerande momentet beräknas till:

$$M_{d,0,52} = 2,0592 \text{ kNm motsvarar en total pålagd last på cirka } 16 \text{ kN}$$

$$M_{d,0,2} = 0,792 \text{ kNm motsvarar en total pålagd last på cirka } 6 \text{ kN}$$

Knäckning

Knäckningen beräknas med följande ekvation:

$$P_{E2} = \frac{\pi^2 * EI}{L^2}$$

$$E = 32 \text{ GPa}$$

$$L = 0,302 \text{ m (från provkroppens höjd och skjuvspann)}$$

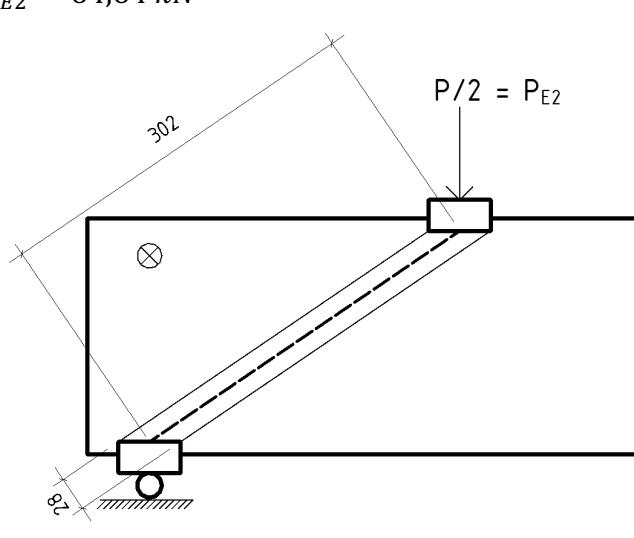
$$I = \frac{b * h^3}{12} \text{ m}^4$$

$$b = 0,028 \text{ m (trycksträvans bredd)}$$

$$h = 0,02 \text{ m (provkroppens tjocklek)}$$

Knäckningen beräknas till:

$$P_{E2} = 64,64 \text{ kN}$$



Lokal krossning

Lokal krossning under punktlasten beräknas enligt följande:

$$F_{Rdu} = A_{c0} * f_{cd} * \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3 * f_{cd} * A_{c0}$$

Där

$$f_{cd} = 26,3 \text{ MPa}$$

$$A_{c0} = b_0 * d_0 \text{ m}^2 \text{ (Tryckarea)}$$

$$A_{c1} = b_1 * d_1 \text{ m}^2 \text{ (Fördelningsarea)}$$

$$b_0 = 0,02 \text{ m}$$

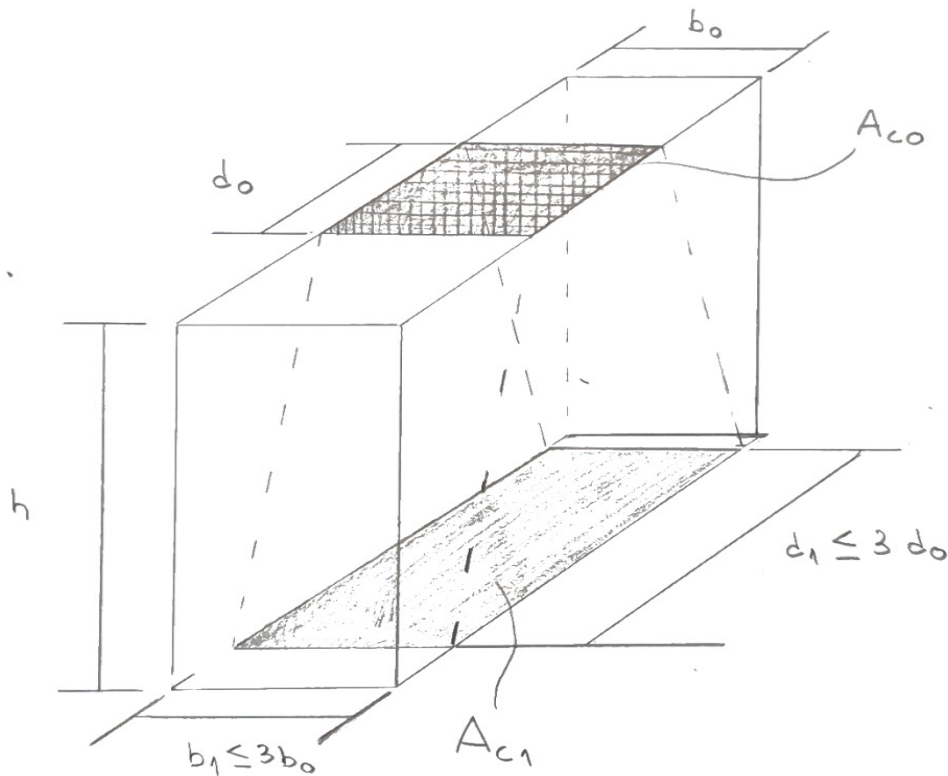
$$d_0 = 0,05 \text{ m}$$

$$b_1 = 0,02 \text{ m}$$

$$d_1 = 0,15 \text{ m}$$

Kraften beräknas till:

$$F_{Rdu} = 45,61 \text{ kN}$$



Livtrycksbrott

Livtrycksbrott för plattan beräknas med ekvationen:

$$V_{Rd,max} = 0,5 * v * f_{cd} * b * d$$

Där:

$$v = 0,6 * (1 - \frac{f_{ck}}{250})$$

$$f_{ck} = 39,5 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = 26,3 \text{ MPa}$$

$$b = 0,02 \text{ m}$$

$$d = 0,130 \text{ m}$$

$$V_{Rd,max} = 17,295 \text{ kN vilket motsvarar en totalt pålagd last på cirka 35 kN}$$