



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**APLIKACE ČEDIČOVÉ PRUTOVÉ VÝZTUŽE V LEHKÝCH
KONSTRUKČNÍCH BETONECH**

THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF BASALT REINFORCEMENT IN LIGHTWEIGHT CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN JARNOT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL SCHMID, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Martin Jarnot
Název	Aplikace čedičové prutové výztuže v lehkých konstrukčních betonech
Vedoucí práce	doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Batelka, Michal. Využití umělého spékaného kameniva vyráběného z pevných energetických odpadů do betonu. Brno, 2015. 170 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Jiří Adámek, CSc.

W.YeihaJ., J.Changa, C.L.Tsai: Enhancement of the bond strength of epoxy coated steel by the addition of fly ash. Cement and Concrete Composites, Volume 26, Issue 4, , Pages 315-321, May 2004.

M.N Haque, H Al-Khaiat, O Kayali: Strength and durability of lightweight concrete. Cement and Concrete Composites, Volume 26, Issue 4, Pages 307-314, May 2004.

Jingjun Li, Jiangang Niu Chaojun Wan Xiaoqin Liu Zhiyi Jin: Comparison of flexural property between high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. Construction and Building Materials, Volume 157, , Pages 729-736, 30 December 2017.

Schmid, P. a kol. Základy zkušebnictví, FAST VUT v Brně

ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí

ČSN EN 1991 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí

ČSN EN 1992 Eurokód 2: Betonové konstrukce

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Na konstrukčním prvku z lehkého agloporitového betonu posoudit možnosti aplikace prutové čedičové výztuže. Na vyrobených zkušebních prvcích provést experimentální analýzu a zhodnotit možnosti návrhových metod posouzení shody mezi reálným chováním hodnoceného prvku a teoretickým výpočtem.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou aplikace prutové čedičové výztuže v lehkých konstrukčních betonech. V praktické části je experimentálně provedeno porovnání ocelové a čedičové výztuže v betonech z agloporitu a ocelové výztuže v betonu z Liaporu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lehký beton, kompozitní výztuž, ocelová výztuž, modul pružnosti, agloporit, liapor

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the application of basalt reinforcement in lightweight concretes. In the practical part, the comparison of steel and basalt reinforcement in concrete from agloporite and steel reinforcement in concrete from Liapor is performed experimentally.

KEYWORDS

Lightweight concrete, composite reinforcement, steel reinforcement, elastic modulus, agloporit, Liapor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Martin Jarnot *Aplikace čedičové prutové výztuže v lehkých konstrukčních betonech*. Brno, 2020. 111 s., 3 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Aplikace čedičové prutové výztuže v lehkých konstrukčních betonech* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Martin Jarnot
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Aplikace čedičové prutové výztuže v lehkých konstrukčních betonech* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2020

Bc. Martin Jarnot
autor práce

Poděkování:

Rád bych předně poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Pavlovi Schmidovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, pomoc a vstřícný přístup při vytváření mé práce. Dále bych poděkoval své rodině za podporu a důvěru, kterou do mě vložili. Také vývojové sekci firmy Svoboda a Syn, zvláště pak panu Ing. Martinu Lišovskému a Ing. Michalu Batelkovi, Ph.D. za pomoc při práci na praktické části této práce. V neposlední řadě chci poděkovat mé manželce Amálce za obrovskou podporu a trpělivost, kterou se mnou měla.

Obsah

1. Úvod	9
2. Cíle	10
3. Teoretická část.....	11
1. Beton	11
1.1. Složky betonu:	11
1.2. Zkoušení a požadavky čerstvého betonu:.....	17
1.3. Zkoušení a požadavky ztvrdlého betonu:.....	21
2. Výztuž.....	24
2.1. Kovová výztuž	24
2.2. Nekomová výztuž	32
4. Praktická část.....	33
1. Návrh zkušebních těles	33
2. Beton	36
3. Výroba forem a vyztužování	36
4. Betonáž	42
5. Odbednění.....	46
6. Skladování a zrání	47
7. Zkouška tříbodovým ohybem.....	49
8. Výsledky	50
8.1. Ocelová výztuž s aglobetonem	50
8.2. Kompozitní čedičová výztuž s Aglobetonem	72
8.3. Ocelová výtuž s liaporbetonem.....	89
8.4. Souhrnné výsledky	107
8.5. Porovnání statických dat.....	108
5. Závěr.....	109
6. Seznam použité literatury	110
1. Normy.....	110
2. Odborná literatura.....	110
3. Internetové zdroje	110
7. Seznam příloh	111

1. Úvod

V dnešní době patří beton bezesporu k jednomu z nejpoužívanějších stavebních materiálů na světě. Ve spolupráci s vhodnou výztuží, která přenáší tahové napětí, které je prostý beton schopný přenést pouze v malé míře a ve stavebnictví se s pevností v tahu betonu nepočítá, tvoří fungující celek, jenž je použit v mnoha významných stavbách a konstrukcích po celém světě. Se zvyšujícími se nároky na budovy se ruku v ruce zvyšují nároky na samotný beton. Nedílnou součástí zatížení staveb je působení zatížení od vlastní tíhy. V tomto ohledu je snaha toto zatížení co nejvíce zmenšit, jednou z možností jak vylehčit samotný beton je používání lehkých umělých kameniv, které se výrazně podepisují na celkové objemové hmotnosti betonové konstrukce. Avšak nejen beton prochází vývojem. Ten je zaměřen i na samotné možnosti vyztužení. Sice stále je vyztužení v drtivé většině spjaté s ocelí, ale můžeme se setkat i s nekovovou výztuží, od skleněných vláken přes polymery až po kompozitní výztuže.

2. Cíle

Cílem této diplomové práce je posoudit možnost aplikace prutové kompozitní čedičové výztuže v konstrukčních prvcích z lehkého betonu. Na vyrobených zkušebních vzorcích provést experimentální analýzu a zhodnotit možnosti návrhových metod posouzení shody mezi reálným chováním hodnoceného prvku a teoretickým výpočtem.

3. Teoretická část

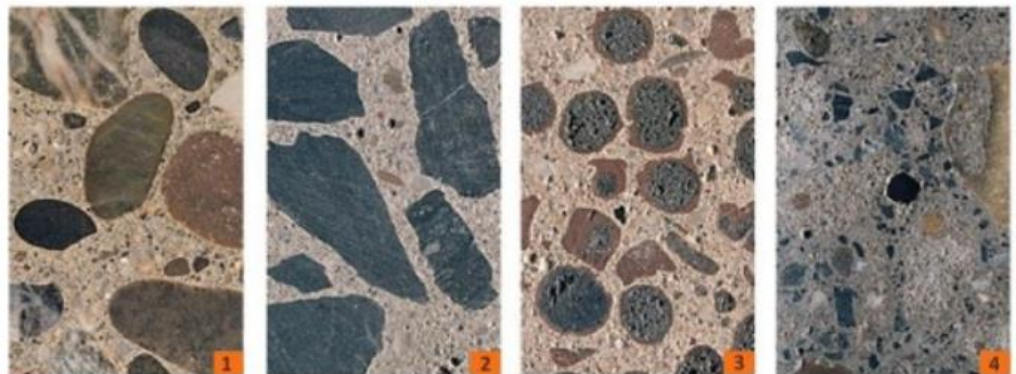
1. Beton

- Beton je kompozitní stavební materiál, který se skládá ze směsi plniva, pojiva a vody, dále může obsahovat přísady a příměsi pro zlepšení vlastností betonu. [1]

1.1. Složky betonu:

1.1.1. Plnivo (Kamenivo):

- Zrnitý materiál, používaný ve stavebnictví, může být přírodní, umělý nebo recyklovaný.
 - Přírodní kamenivo:
 - Kamenivo z nerostných zdrojů, které bylo vystaveno jen mechanickému zpracování.
 - Umělé kamenivo
 - Kamenivo nerostného původu, které je výsledkem průmyslového zpracování při tepelném nebo jiném režimu.
 - Recyklované kamenivo
 - Kamenivo získané zpracováním anorganického materiálu dříve použitého v konstrukci. [1]



Obr. 1 Řezy betonem s různými druhy kameniva 1 - přírodní těžené, 2 - přírodní drcené, 3 - umělé, 4 – recyklované [7]

1.1.1.1. Přírodní kamenivo:

- Lze rozdělit dle vzniku a velikosti zrn:
 - Přírodní drcené:
 - Vzniká drcení přírodního kamene
 - Drobné – Zrno do 4mm, frakce 0-4
 - Hrubé – Zrno nad 2 mm, frakce 2-63
 - Štěrkodrt – Směs hrubého a drobného kameniva
 - Filler – Kamenná moučka, frakce do 0,063mm
 - Přírodní těžené:
 - Kamenivo se zaobleným tvarem vzniklé přírodním rozpadem horniny
 - Drobné – Zrna do 4mm
 - Hrubé – Zrna nad 4mm
 - Štěrkopísek – Směs hrubého a drobného kameniva [3]

1.1.1.2. Umělé kamenivo:

- Vyrábějí se druhotným zpracováním průmyslových odpadů, jakým jsou například popílky, cihelná drť, škvára, struska. [3]

1.1.1.2.1. Keramzit

- Liapor je lehký granulát z expandovaných jílu pro stavební účely, obecně známý jako keramzit. Téměř kulovitá zrna různých velikostí jsou lehká, a přesto neobyčejně pevná. Díky své keramické podstatě jsou také chemicky stálá a ekologická.
- Je skvělou náhradou běžného kameniva. Pro své tepelně-izolační kvality je ideální na zásyp stropů nebo střech, na vyrovnávací podsyp podlah, do lehkých tepelně-izolačních betonů a malt a pro řadu dalších aplikací. [8]



Obr. 2 Liapor [8]

1.1.1.2.2. Agloporit

- Agloporit je lehké umělé pórovité kamenivo vyráběné spékáním černouhelných, případně antracitických popílků a jiných korekčních přísad. Je vhodný jak pro výrobu izolačních betonů, tak i pro betony konstrukční. Z obzvláště pevného agloporitu můžeme vyrobit železobetonové i předpjaté konstrukční prvky. Výhodou agloporitu je nízká objemová hmotnost, objemová a teplotní stálost, rychlá nasákavost a poměrně vysoká pevnost. [9]



Obr. 3 Agloporit [9]

1.1.2. Pojivo

- Pojiva jsou organické nebo anorganické látky, které se mísí s plniva na směsi mající vhodnou tvárnost pevnost a požadované vlastnosti.
- Rozdělení pojiv:
 - Mechanická pojiva
 - Chemická pojiva
 - Zvláštní pojiva [3]

1.1.2.1. Pojiva mechanická:

- Při pojení nedochází k chemické reakci.
- Asfalty, lepidla, hlína. [3]

1.1.2.2. Pojiva chemická

- Při pojení dochází k chemické reakci.
- Lze rozdělit na:
 - Vzdušná
 - Hydraulická [3]

1.1.2.2.1. Vzdušná pojiva

- Taková pojiva, která po smíšení s vodou tuhnou a tvrdnou pouze na vzduchu
- Vzdušné vápno, sádra [3]

1.1.2.2.1.1. Sádra

- Sádra je anorganické práškové pojivo, získané tepelným zpracováním sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (dihydrátu) částečným nebo úplným odvodněním nebo připravená z přírodního anhydritu CaSO_4 .
- Sádra tuhne různou rychlostí, záleží na způsobu přípravy, např. větší množství vody oddaluje počátek tuhnutí.
- Lze ji snadno zpracovat a přizpůsobit různým stavebním účelům.
- Malé objemové změny při procesu tvrdnutí.
- Nevýhodou je citlivost na vlhkost a ztráta pevnosti ve vlhkém prostředí. Při 1% vlhkosti se může snížit pevnost až o 40%.
- Oproti cementu tuhne a tvrdne rychle. [3]

1.1.2.2.1.2. Vzdušné vápno

- Je to technický název pro oxid vápenatý CaO s různým obsahem oxidu hořečnatého MgO vyráběného pálením vysokoprocentních vápenců nebo dolomitických vápenců při teplotách mezi 1000 až 1250°C (mez slinutí).
- Dle obsahu MgO dělíme na:
 - o Vzdušné bílé vápno $\text{MgO} \leq 7\%$
 - o Vzdušné dolomitické vápno $\text{MgO} \geq 7\%$ [3]

1.1.2.2.2. Hydraulická pojiva

- Taková pojiva, která po smíšení s vodou tuhnou a tvrdnou na vzduchu i pod vodou
- Hydraulické vápno, cement [3]

1.1.2.2.2.1. Hydraulické vápno

- Je to pojivo vzniklé pálením vápenců, dolomitických vápenců a nebo vápnitých slínů s obsahem hydraulických součástí pod teplotou slinutí 1250°C a nebo semletím vzdušného vápna s množstvím hydraulických přísad která zaručí hydraulické vlastnosti.
- Hydraulické vápno musí obsahovat alespoň 10% hydraulických složek
- Dle způsobu výroby dělíme:
 - Přírodní – pálení základních surovin (vápenec, dolomitický vápenec, slíny)
 - Umělé – vzdušné vápno + přísady [3]

1.1.2.2.2.2. Cement

- Je to hydraulické pojivo pálené nad mez slinutí tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou v důsledku hydratačních reakcí a procesů tuhne a tvrdne a po zatvrdnutí zachová svoji pevnost a stálost jak na vzduchu tak ve vodě.
- Rozdělení:
 - I. Portlanský cement
 - II. Portlanský cement směsný
 - III. Vysokopeční cement
 - IV. Pucolánový cement
 - V. Směsný cement
- Třídy cementů
 - Dělí se dle nejnižší pevnosti po 28mi dnech
 - 22,5
 - 32,5
 - 42,5
 - 52,5
 - Pro třídy 32,5 a výš se přidává označení R (rapid), např. 32,5 R pro cementy s vyššími počátečními pevnostmi. [3]

1.1.2.2.3. Zvláštní pojiva

- Řadí se zde například žáruvzdorná pojiva, se zvýšenou chemickou odolností, těžké cementy pro ochranu před radioaktivním zářením, rozpínavá a těsnící pojiva. [3]

1.1.3. Záměsová voda

- Poskytuje čerstvému betonu poddajnost a tím pomáhá zpracování a hutnění.
- Pro hydratační proces je potřeba 20-25% vody z hmotnosti cementu, tato voda je spotřebována na úplnou hydrataci cementu, dalších cca 15% je fyzikálně vázáno ve ztvrdlém betonu.
- Voda musí vyhovovat ČSN 732028.
 - o Čistá
 - o Nepříliš tvrdá
 - o Vhodné teploty (cca 15°C)
 - o Nesmí obsahovat nežádoucí organické látky – huminové kyseliny, tuky, oleje, řašeliny, fenolické látky.
 - o Chloridy – max 0,05% (při předpjatém betonu) [4]

1.1.4. Přísady

- Účelem přidávání přísad do betonu je zlepšení vlastností buď čerstvého nebo ztvrdlého betonu
- Množství přísad ve směsi se musí řídit maximálním doporučeným množstvím dle výrobce a zároveň nesmí překročit 50gpřísady na 1kg cementu
- Přísady lze dělit na:
 - o Plastifikátory
 - o Ztekucovače
 - o Zpomalovače tuhnutí
 - o Urychlovače tuhnutí
 - o Provzdušňovací přísady [4]

1.1.4.1. Plastifikátory

- Přispívají ke snížení množství použité vody a k lepšímu zpracovatelnosti čerstvého betonu.
- Snižují povrchové napětí mezi přísadou ve vodě a zrnem cementu. [4]

1.1.4.2. Ztekucovače

- Jedná se o vyvinutou plastifikační přísadu.
- Má velmi silný ztekucovací účinek, ale pouze po určitou krátkou dobu cca 40 minut.
- Snižuje množství potřebné vody, tím zvýší jakost betonu, zvýší počáteční pevnosti a ulehčí ukládání čerstvého betonu. Také umožňuje výrobu vysokopevnostních betonů. [4]

1.1.4.3. Zpomalovače

- Uplatňují se tam, kde je potřeba zaručit delší dobu zpracování než je normální. [4]

1.1.4.4. Urychlovače

- Uplatňují se tam, kde je potřeba urychlit tvrdnutí např.: stříkané betony, místa kde dochází k výronům vody, dále pak při zvýšení třídních pevností a pro ochranu povrchu betonu proti zmrznutí. [4]

1.1.4.5. Provzdušňovací přísady

- Nejčastěji ve vodním, mostním a silničním stavitelstvím a tam, kde je konstrukce vystavena účinkům mrazu a působením solí.
- Použitím provzdušňovacích přísad vznikají v betonu mikropóry (menší než 0,3mm), které nejsou vzájemně propojené.
- Odolnost proti mrazu spočívá v tom, že pomocí mikropórů vzniká prostor pro expanzi zamrzlé vody.
- Optimální provzdušnění je něco mezi 4,0% a 7,0%. [4]

1.1.5. Příměsi

- Jedná se o práškové materiály přidávány do betonu se záměrem zlepšení některých vlastností nebo docílení speciálních vlastností.
- Mezi příměsi můžeme zařadit barevné pigmenty, mleté horniny a přírodní moučky.
- Nejčastější použití příměsí je za účelem výroby samozhutnitelných betonů. [4]

1.2. Zkoušení a požadavky čerstvého betonu:

1.2.1. Konzistence čerstvého betonu

- Vyjadřuje hodnotu zpracovatelnosti. Zpracovatelnost se měří několika fyzikálními metodami, které jsou založeny na rychlosti přetvoření, rozlití nebo sednutí těles z čerstvého betonu.
- Rozeznáváme tyto zkoušky konzistence:
 - Zkouška sednutím
 - Zkouška VeBe
 - Zkouška stupně zhutnitelnosti
 - Zkouška rozlitím [4]

1.2.1.1. Zkouška sednutím

- Hodnota zpracovatelnosti je dána v mm poklesem výšky (sednutím) kužele po odformování.
- Pro spíše řidší směsi.
- Stupně S1 – S4 [4]

Sednutí kužele ČSN EN 12350-2	
Označení stupně sednutí	Hodnotna sednutí [mm]
S1	10-14
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥220

Tabulka 1 Stupně konzistence sednutí kužele

1.2.1.2. Zkouška VeBe

- Udává hodnotu zpracovatelnosti v sekundách tzn. jaká doba je nutná k transformování čerstvé směsi z tvaru komolého kužele, do tvaru válce, za pomoci vibrací.
- Pro hustší směsi.
- Stupně V0 – V4 [4]

Zkouška Vebe ČSN EN 12350-3	
Označení stupně přeformování	Hodnota přeformování [s]
V0	≥31
V1	30-21
V2	20-11
V3	10-6
V4	5-3

Tabulka 2 Stupně konzistence Vebe

1.2.1.3. Zkouška stupně zhutnitelnosti

- Index zhutnitelnosti dle EN 12350-4
- Stupně C0-C3 [4]

Index zhutnitelnosti ČSN EN 12350-4	
Označení stupně zhutnění	Hodnota zhutnění [x/y]
C0	≥1,46
C1	1,45-1,26
C2	1,25-1,11
C3	1,10-1,04

Tabulka 3 Stupně konzistence dle indexu zhutnitelnosti

1.2.1.4. Zkouška rozlitím

- Je dán průměrem rozlití v mm
- Stupně F1 – F6
- U samozhutnitelných betonů dělíme dle rozlití na stupně SF1-SF3 [4]

Rozlití kužele ČSN EN 12350-5	
Označení stupně rozlití	Hodnota rozlití [mm]
F1	≥340
F2	350-410
F3	420-480
F4	490-550
F5	560-620
F6	630-750
F7	760-850

Tabulka 4 Stupně konzistence dle rozlití kužele

Rozlití kužele ČSN EN 12350-8	
Označení stupně rozlití	Hodnota rozlití [mm]
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850

Tabulka 5 Stupně konzistence dle rozlití kužele pro samozhutnitelné betony

1.2.2. Obsah vzduchu v čerstvé směsi

- Obsah vzduchu se stanoví dle EN 12350-7 u obyčejného a těžkého betonu. PU lehkých betonu se obsah vzduchu stanoví dle ASTM V 173.
- Množství vzduchu je stanoveno nejmenší hodnotou. Horní mez je stanovena nejmenší hodnota + 4% absolutní. [2]

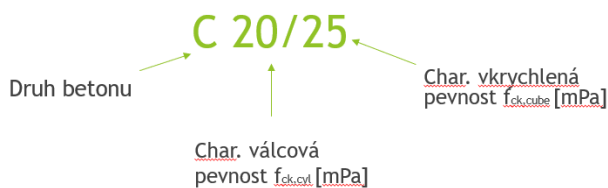
1.3. Zkoušení a požadavky ztvrdlého betonu:

1.3.1. Pevnost

- Je schopnost materiálu odolávat přetvoření nebo poškození v důsledku působení vnějších sil.
- U ztvrdlého betonu nejčastěji rozlišujeme:
 - Pevnost v tlaku
 - Pevnost v příčném tahu [4]

1.3.1.1. Pevnost v tlaku

- Jestliže je pevnost stanovena na zkušebních krychlích označujeme pevnost jako $F_{c,cube}$, jestli je stanovena na zkušebních válcích, pak je označujeme $F_{c,cyl}$.
- Pevnost v tlaku se stanovuje na betonech o stáří 28 dnů. Při zvláštních případech se může stanovit dříve nebo později.
- Charakteristická pevnost musí být vyšší nebo minimálně stejná jako charakteristická pevnost pro požadovanou pevnostní třídu. [4]



Třída betonu	Charakteristická krychlená pevnost $F_{ck,cube}$	Charakteristická válcová pevnost $F_{ck,cyl}$
C 12/15	15	12
C 16/20	20	16
C 20/25	25	20
C 25/30	30	25
C 30/37	37	30
C 35/45	45	35
C 40/50	50	40
C 45/55	55	45
C 50/60	60	50
C 55/67	67	55
C 60/75	75	60
C 70/85	85	70
C 80/95	95	80
C 90/105	105	90

Tabulka 6 Pevnostní třídy betonů

Třída betonu	Charakteristická krychlená pevnost $F_{ck,cube}$	Charakteristická válcová pevnost $F_{ck,cyl}$
LC 8/9	9	8
LC 12/13	13	12
LC 16/18	18	16
LC 20/22	22	20
LC 25/28	28	25
LC 30/33	33	30
LC 35/38	38	35
LC 40/44	44	40
LC 45/50	50	45
LC 50/55	55	50
LC 60/66	66	60
LC 70/77	77	70
LC 80/88	88	80

Tabulka 7 Pevnostní třídy lehkého betonu

1.3.1.2. Pevnost v příčném tahu

- Stanovuje se dle EN 12390-6
- Stáří betonu pro zkoušky je 28 dní, není-li stanoveno jinak.
- Charakteristická pevnost musí být vyšší nebo minimálně stejná jako charakteristická pevnost pro požadovanou pevnostní třídu. [4]

1.3.2. Objemová hmotnost

- Beton můžeme z pohledu objemové hmotnosti ztvrdlého betonu v suchém stavu rozdělit do 3 skupin:
 - Lehký beton – Objemová hmotnost 800- 2000 Kg/m³
 - Obyčejný beton – 2000 – 2600 Kg/m³
 - Těžký beton – více než 2600 Kg/m³ [4]

1.3.3. Odolnost vůči průsaku vody

- Provádí se dle EN 12390-8 [4]

1.3.4. Odolnost proti požáru

- Betony jenž jsou složeny z přírodního kameniva, cementu, přísad a příměsí nebo jiných anorganických materiálů jsou zatříděny do Euro třídy A a není vyžadováno zkoušení. [4]

2. Výztuž

- Beton má vynikající pevnost v tlaku, bohužel má asi desetinovou pevnost v tahu. Proto se do míst, kde vzniká tahové napětí vkládá výztuž, jež má za úkol tyto napětí přenést.
- Výztuž lze rozdělit např. dle:
 - Materiálu
 - Kovová
 - Nekovová
 - Druhu a tvaru
 - Tyčová
 - Svařované sítě
 - Lana
 - Tuhá
 - Rozptýlená
 - Působení výztuže
 - Aktivní (předpínací)
 - Pasivní (betonářská)
 - Umístění
 - Vnější
 - Vnitřní [11]

2.1. Kovová výztuž

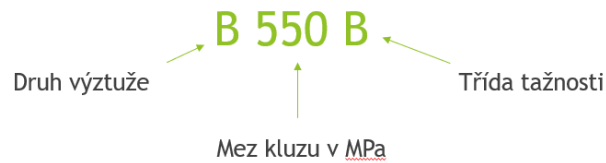
- Nejčastěji používaný materiál na vyztužení betonu.
- Ocel má řadu výhod, vedle vysokých pevností v tahu i v tlaku (ocel je izotropní materiál) je ocel tažná a houževnatá. Má hodně blízký součinitel tepelné roztažnosti ($12 \cdot 10^{-6}$) jako beton ($10 \cdot 10^{-6}$), čímž vznikají mez materiály, uvnitř konstrukce, jen nepatrná napětí při působení teplot. [5]

2.1.1. Druhy výztužných ocelí:

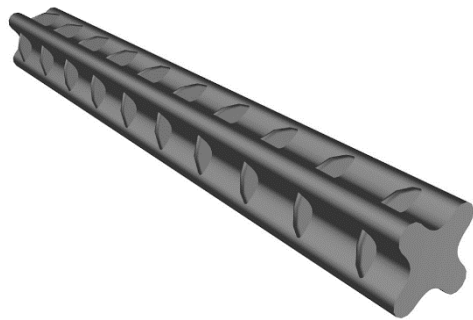
- Betonářská výztuž
- Předpínací výztuž
- Tuhá výztuž
- Rozptýlená výztuž [5]

2.1.1.1. Betonářská výztuž

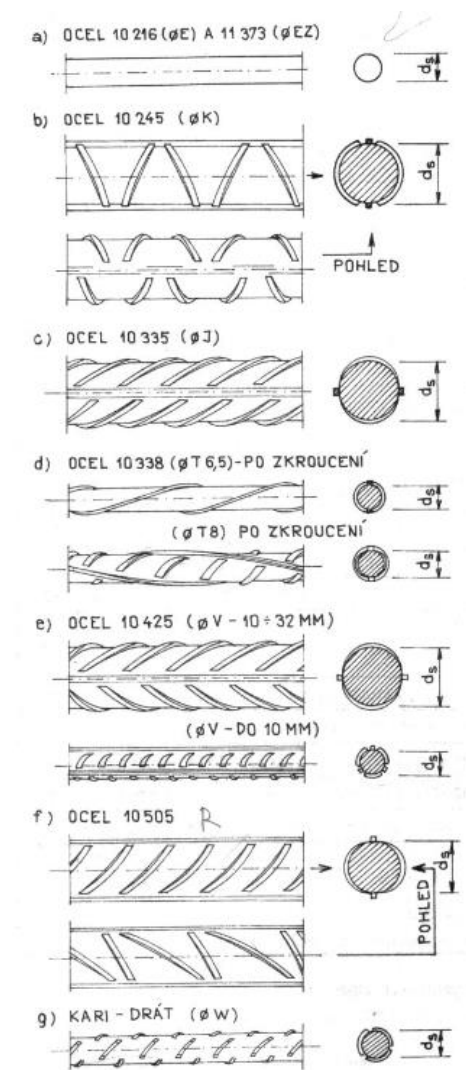
- Představují ji buď samostatné pruty či svařované sítě.
- Tato výztuž je vložena do betonu a nevyvozuje v něm záměrně žádné napětí.
- Příklad značení oceli:



- Betonářských výztuží se napříč historií vyvinulo spoustu druhů, které se liší tvarem, a nebo způsobem výroby. [5]



Obr. 4 Roxor



Obr. 5 Různé druhy druhů betonářské výztuže



Obr. 6 Isteg

2.1.1.2. Předpínací výztuž

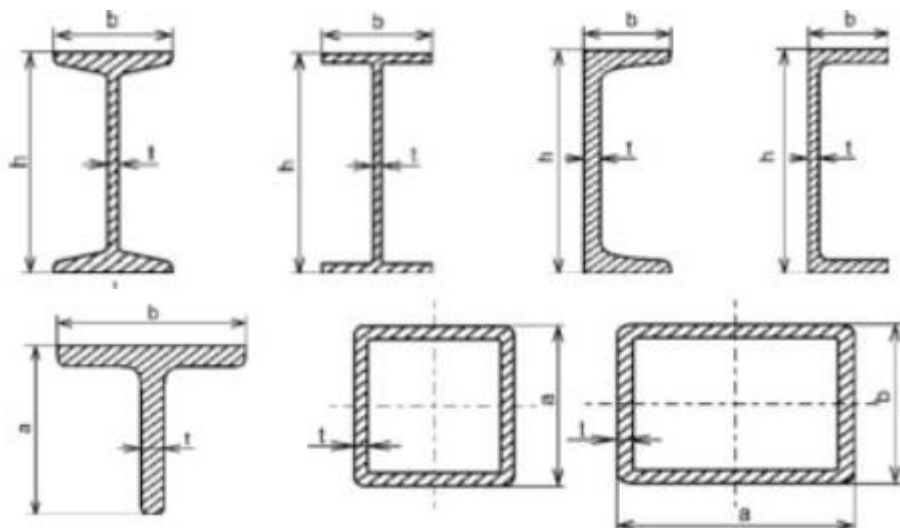
- Záměrně vnáší tlakové napětí do té části betonové konstrukce, kde se předpokládá tah a tím se snaží zabránit vzniku trhlin
- Betonová konstrukce může být předpjatá předem a nebo až dodatečně. [4]



Obr. 7 Předpínací výztuž

2.1.1.3. Tuhá výztuž

- Nejčastěji válcované profily pro spřažené ocelobetonové prvky [4]



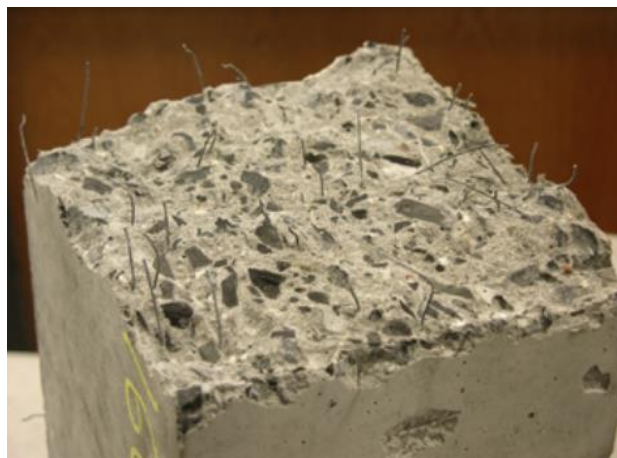
Obr. 8 Různé druhy válcovaných a uzavřených profilů

2.1.1.4. Rozptýlená výztuž

- Tento druh vyztužení není zatím příliš rozšířený.
- Podstata tkví v co možná nejdokonalejším a nejrovnoměrnějším rozptýlení drátků či vláken v betonu při procesu mísení.
- Rozptýlená výztuž zlepšuje tahové pevnosti betonu, mírně zlepšuje i tlakové pevnosti a zvyšuje houževnatost. [4]



Obr. 9 Drátky do betonu



Obr. 10 příklad drátkobetonu

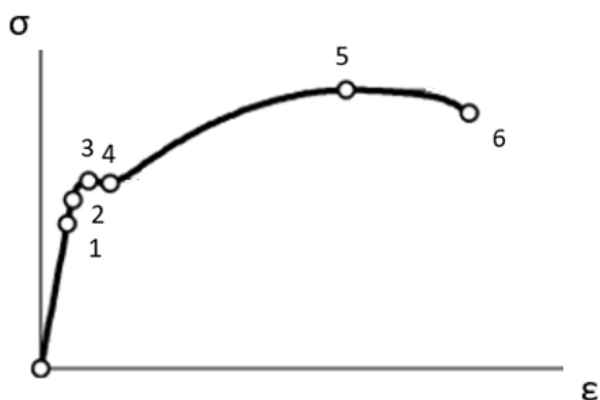
2.1.2. Zkoušky a vlastnosti oceli

2.1.2.1. Pevnost oceli

- Pevnost oceli je závislá na teplotě při 300°C ztrácí svojí pevnost při 500°C je pevnost na polovině původní hodnoty. A ztrácí se i význačná mez kluzu. [5]

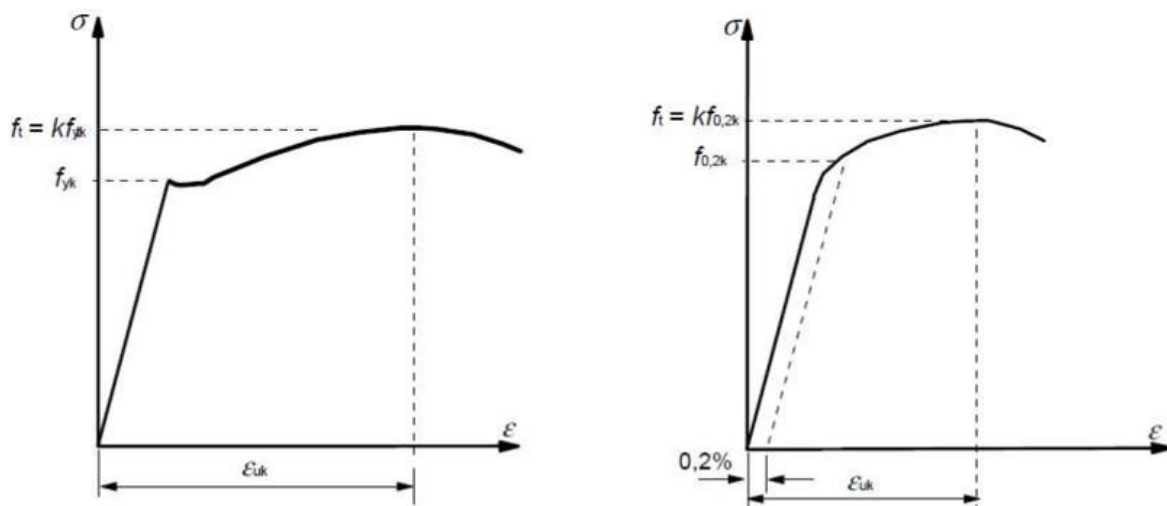
2.1.2.2. Tahová zkouška

- Provádí se na trhacím lisu se záznamovým zařízením, pomocí něhož vystavujeme zkoušený vzorek tahovému namáhání zpravidla až do přetržení.
- Pomocí záznamu získáme tzv. pracovní diagram, který udává závislost napětí σ [MPa] na poměrném přetvoření ϵ [%].
- Z pracovního diagramu můžeme vyčíst tyto důležité body:
 - Napětí na mezi úměrnosti
 - Napětí na mezi pružnosti
 - Napětí na mezi kluzu
 - Napětí na mezi pevnosti
 - Napětí na mezi porušení [5]



Obr. 11 Pracovní diagram oceli 1 - mez úměrnosti, 2 - mez pružnosti, 3 - mez kluzu horní, 4 - mez kluzu dolní, 5 - mez pevnosti, 6 - mez porušení

- Pro konstrukční oceli je limitujícím bodem mez kluzu nebo též mez pružnosti. Jedná se o napětí, při kterém se ocel začíná plasticky prodlužovat. Na diagramu rozlišujeme horní a dolní mez kluzu. Výrazná mez kluzu je typická pro oceli válcované za tepla. Oceli tvářené za studena mají tzv. potlačenou mez kluzu. Při těchto případech se zavádí smluvní mez kluzu, to je hodnota napětí, po jehož dosažení a následném odlehčení zůstane v materiálu daná dohodnutá deformace 0,2%. [11]

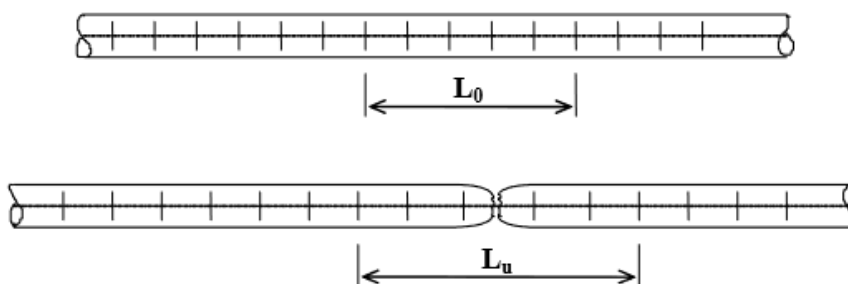


Obr. 12 Pracovní diagramy oceli, vlevo diagram s výraznou mezí kluzu, vpravo diagram s potlačenou mezí kluzu [11]

2.1.2.3. Tažnost

- Je trvalé prodloužení měřené délky po přetržení vyjádřené v % počáteční délky. [6]

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100$$

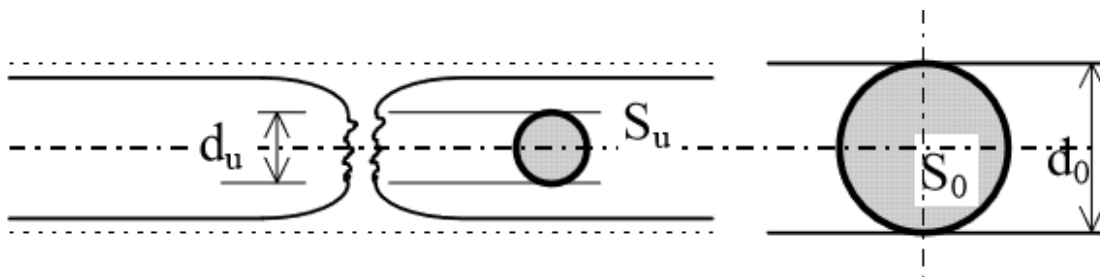


Obr. 13 Výpočet tažnosti

2.1.2.4. Kontrakce

- Je to největší změna příčného průřezu po přetržení zkušební tyč vyjádřená v % počátečního průřezu. [6]

$$z = \frac{s_0 - s_u}{s_0} \cdot 100$$

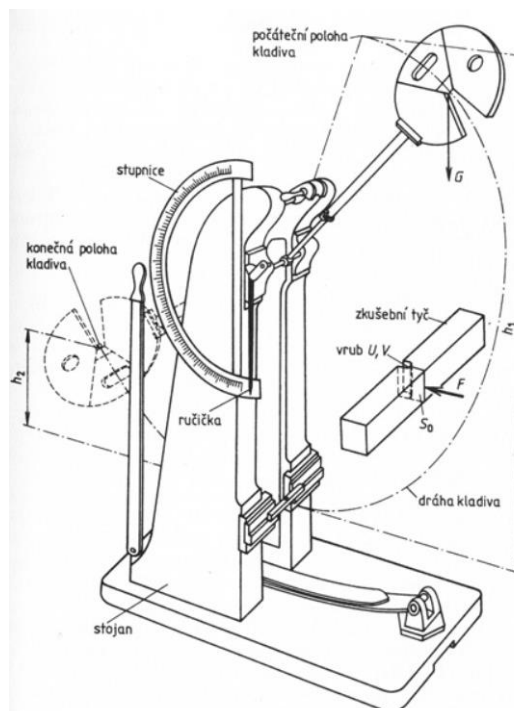


Obr. 14 Výpočet kontrakce

2.1.2.5. Houževnatost

- Houževnatost je schopnost materiálu pohlcovat energii.
- Zjišťuje se rázovou dynamickou zkouškou. Zkušební tyč je opatřena vrubem. Kladivo tíhy G je spustí z počáteční výšky h_1 na zkušební tyč umístěnou v nejnižší poloze kladiva. Po přeražení se kladivo vykývá do výšky h_2 . k přetažení tyče se spotřebovává energie K .
- Houževnatější materiál spotřebuje více práce na proražení tyče. [6]

$$K = G(H_1 - H_2)[J]$$



Obr. 15 Charpyho kladivo

- Podíl práce K k počátečnímu průřezu S_0 je vrubová houževnatost

$$K = \frac{K}{S_0}$$

2.2. Nekovová výztuž

- Nekovová výztuž ve stavebnictví není zdaleka tak rozšířená jako výztuž ocelová. Jedná se převážně o kompozity (materiál skládající se z minimálně dvou hlavních komponent, které se mezi sebou výrazně liší svými fyzikálními vlastnostmi) na bázi skleněných, uhlíkových, aramidových či jiných vláken spojených epoxidovou matricí. Můžeme se u nich setkat se zkratkou FRP (Fiber Reinforced Polymers).
- Velkou výhodou těchto výztuží je odolnost vůči agresivním vlivům okolního prostředí. Této vlastnosti lze využít při úspoře betonu nutnou na ochranu výztuže, tedy zmenšení krycí vrstvy a tím také zmenšení vlastní tíhy konstrukce.
- Mezi nevýhody naopak patří menší modul pružnosti (45-60 GPa) což má za následek rychlý vznik a rozvoj trhlin. [10]



Obr. 16 Ukázka nekovové prutové výztuže

4. Praktická část

Cílem praktické části bylo ověřit možnost použití kompozitní čedičové výztuže na konstrukčním prvku z lehkého betonu. Za tento prvek byl vybrán překlad, který díky svým proporcím nebylo náročné vytvořit a poté sním manipulovat.

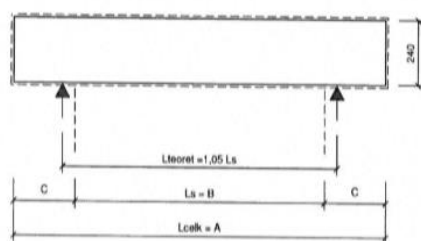
Dále byly vytvořeny tělesa stejných rozměrů s obyčejnou kovovou betonářskou výztuží pro porovnání výsledků. K těmto vzorkům byl pro porovnání pořízen vzorek továrně vyráběných překladů z jiného druhu lehkého betonu, který zároveň sloužil jako vzor pro výrobu zkušebních těles.

1. Návrh zkušebních těles

Návrh zkušebních těles vycházel z výrobní dokumentace překladu typu PS 115x240-990/750.

Tedy samotný překlad má rozměry 115x240x990mm. Výztuž byla volena tak, aby případné výsledky na tříbodovém ohybu byly ve všech případech co nejbližší. Byly vytvořeny 3 tělesa s ocelovou výztuží a 3 tělesa s kompozitní čedičovou výztuží.

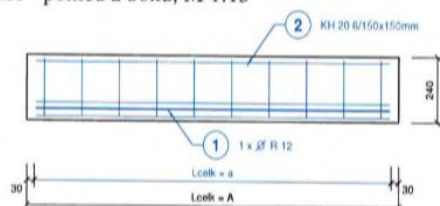
Výkres tvaru - pohled z boku, M 1:15



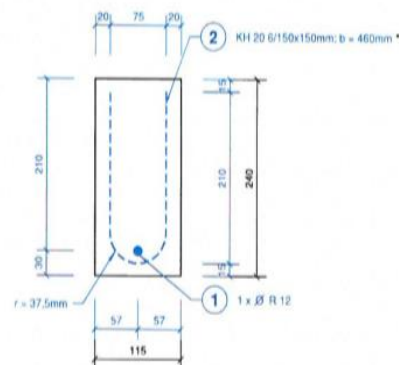
Výkres tvaru - pohled z čela, M 1:15



Výkres výztuže - pohled z boku, M 1:15

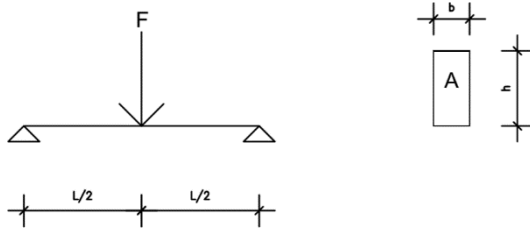


Výkres výztuže - příčný řez, M 1:5



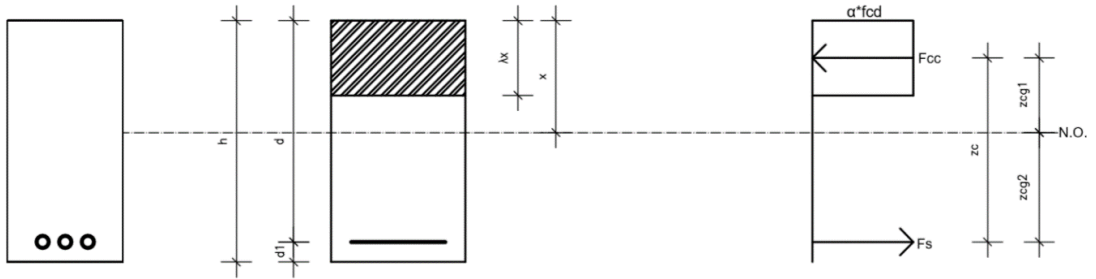
Obr. 17 Výrobní dokumentace překladu PS 115x240-990/750

Návrh výztužení těles vycházel z jednoduchého výpočtu ve kterém byla zahrnuta pevnost v tahu, avšak nijak nezohledňuje jiné vlastnosti materiálu, jako je například modul pružnosti. Průměr výztuže byl volen tak, aby při zatěžování tříbodovým ohybem bylo za potřeby přibližně stejného osamělého zatížení F .



$$\sigma_{1,2} = \frac{M}{w} = \frac{\frac{F}{2} \cdot \frac{L}{2}}{\frac{1}{6}bh^2} = \frac{\frac{1}{4} \cdot F \cdot L}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2}$$

$$\sigma_1 = f_{ctm}$$



$$M_{Rd} = F_s \cdot z_c$$

$$INT = EXT$$

$$\lambda x \cdot f_{cd} = A_{st} \cdot f_{yd}$$

$$z_c = h - d_1 - \frac{\lambda x}{2} = d - \frac{\lambda x}{2} = d - \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{A_{st} \cdot f_{yd}}{\lambda \cdot f_{cd}} x = \frac{A_{st} \cdot f_{yd}}{\lambda \cdot f_{cd}} = d - A_{st} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

$$M_{RD} = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot \frac{A_{st} \cdot f_{yd}^2}{f_{cd}}$$

$$M_{Rd} = M_{ed}$$

$$A_{st} \cdot f_{yd} \cdot \left(d - A_{st} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \right) = \frac{1}{4} \cdot F \cdot L$$

Ocelová výzuž								
Průřez			Výztuž			Beton		
B	0,115	m	φ	0,012	m	f _{cm}	40 000 000	Pa
H	0,24	m	f _{yk}	500 000 000	Pa	γ _d	1,5	
Ac	0,0276	m ²	γ _f	1,15		f _{cd}	26666666,67	Pa
d	0,21	m	f _{yd}	434782608,7	Pa	λ	0,8	
			A _{st}	0,000113097	m ²	X	0,0200432	m
			F _{yd}	49172,75458	N	λ*X	0,01603456	m

z _c	0,199978
M _{rd}	9833,469

Med	1/4*F*L	
L	0,75	m
F	1	
Med	9833,469	Nm

Pravděpodobné F	
52445,17	N

Čedičová výztuž								
Průřez			Výztuž			Beton		
B	0,115	m	φ	0,008	m	f _{cm}	40 000 000	Pa
H	0,24	m	f _{yk}	1 200 000 000	Pa	γ _d	1,5	
Ac	0,0276	m ²	γ _f	1,15		f _{cd}	26666666,67	Pa
d	0,21	m	f _{yd}	1043478261	Pa	λ	0,8	
			A _{st}	5,02655E-05	m ²	X	0,0213795	m
			F _{yd}	52450,93822	N	λ*X	0,0171036	m

z _c	0,19931
M _{rd}	10454

Med	1/4*F*L	
L	0,75	m
F	1	
Med	10454	Nm

Pravděpodobné F	
55754,65	N

Tabulka 6 Výpočet pravděpodobné zatěžovací síly

2. Beton

Jedná se o lehký beton, jehož plnivem je agloporit frakce 8-16, 4-8 a písek 0/4 Tovačov. Dále se použil cement CEM I 42,5 R Mokrý, Vápence Carmeuse. Pro zlepšení vlastností byly přidány plastifikátor a provzdušňovač.

Návrh receptury a výroba betonu byla zajištěna firmou Svoboda a syn.

3. Výroba forem a vyztužování

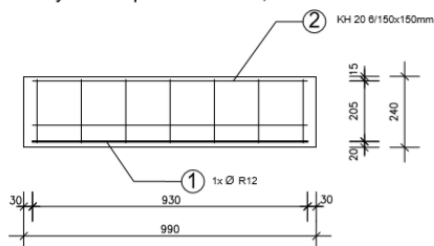
Tělesa s ocelovou výztuží tvořila jedna prutová výztuž průměru 12mm uprostřed překladu, s krycí vrstvou 15mm od spodního okraje, požadovaná vzdálenost byla zajištěna distančníky. Třmínky tvořila síť kari s oky 100x100 a průměrem 6mm vytvarovaná do tvaru písmene „U“.

Tělesa s kompozitní výztuží tvořil taktéž jeden prut uprostřed překladu, 15mm od spodního okraje průměru 8 mm. Třmínky tvoří síť z kompozitní výztuže 50x50mm a průměru 2mm. Tuto síť nešlo vytvarovat do tvaru „U“ proto je tvořena 3mi částmi k sobě přidrátkovanými.

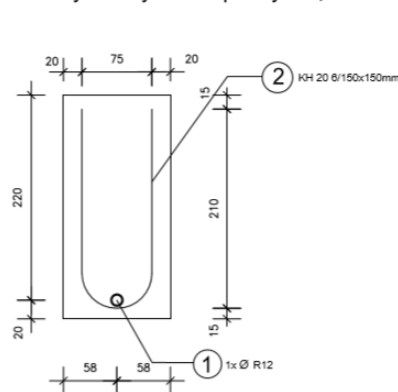
Údaje	Kompozitní tyč Orlitech®	Betonářská ocel B 550
Pevnost v tahu [mm]	1200	550
Modul pružnosti [GPa]	50-55	200
Tepelná vodivost [Wt/m°C]	<0,46	56,0
Hustota [g/cm ³]	2,0	7,85
Elektrická vodivost	Nevodivá	Vodivá
Odolnost proti korozi a alkalickému prostředí	Velmi vysoká	Nízká
Požární odolnost [°C]	do 300	Do 600
Magnetická charakteristika	Nemagnetická	Magnetická

Obr. 18 porovnání kompozitní a ocelové výztuže

Výkres výztuže - pohled z boku, M 1:15

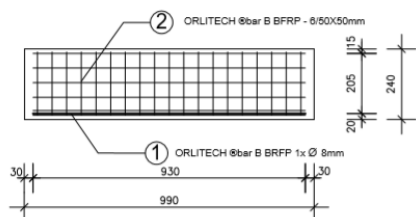


Výkres výztuže - příčný řez, M 1:5

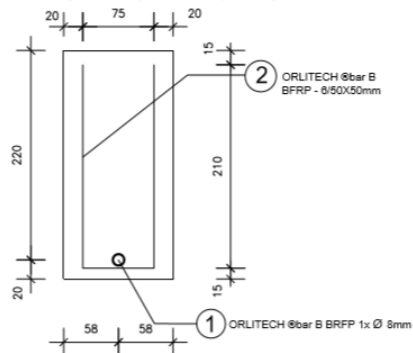


Obr. 19 Návrh vyztužení ocelovou výztuží

Výkres výztuže - pohled z boku, M 1:15

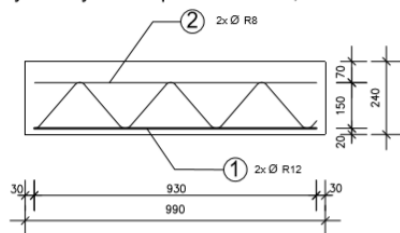


Výkres výztuže - příčný řez, M 1:5

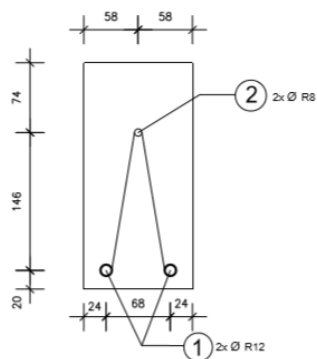


Obr. 20 Návrh vyztužení kompozitní výztuží

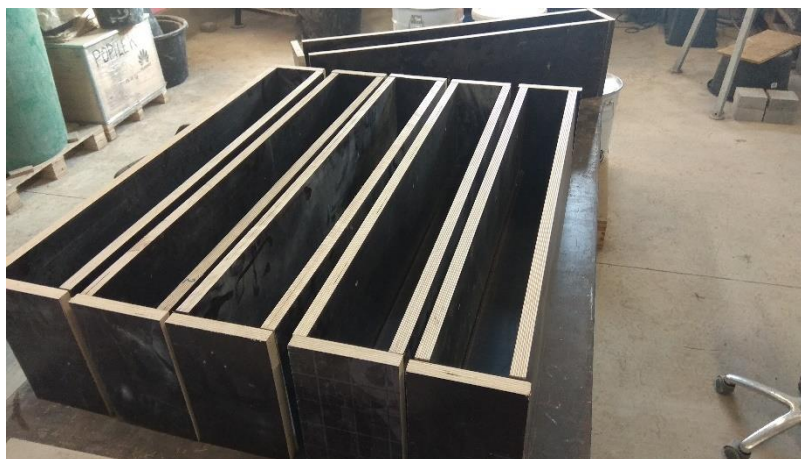
Výkres výztuže - pohled z boku, M 1:15



Výkres výztuže - příčný řez, M 1:5



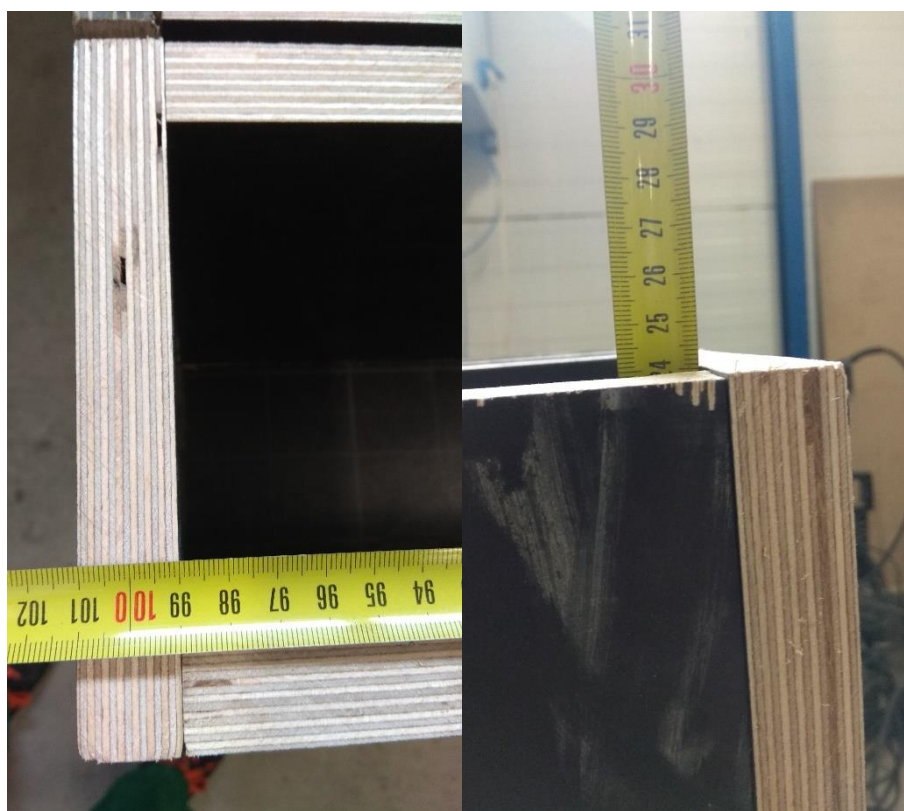
Obr. 21 Skutečné vyztužení překladu Liapor



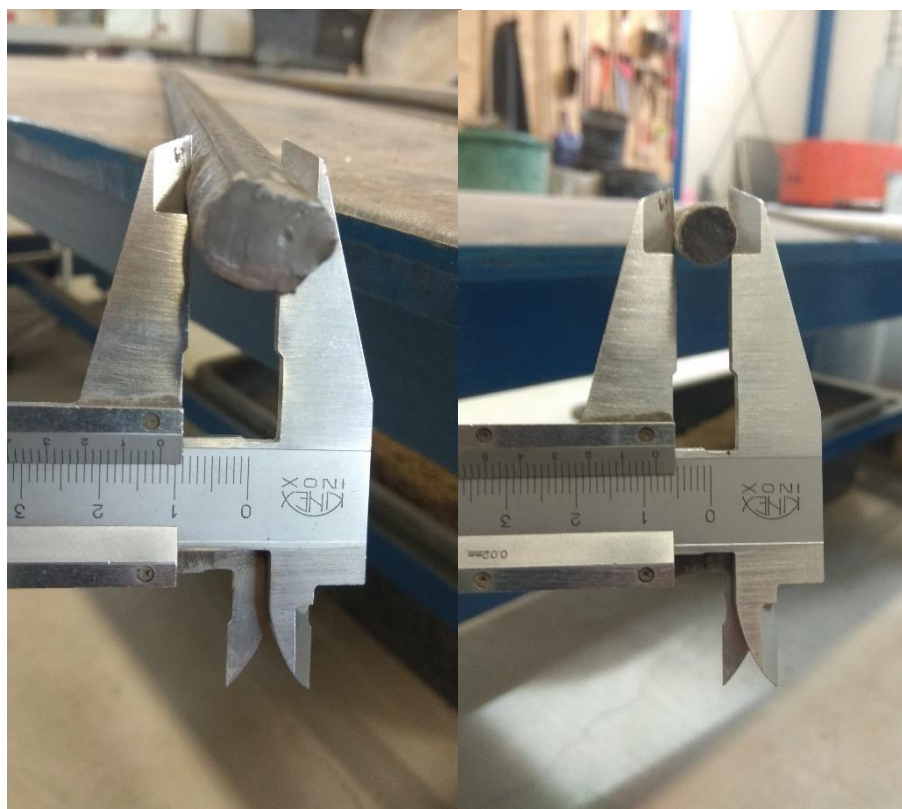
Obr. 20 Výroba forem



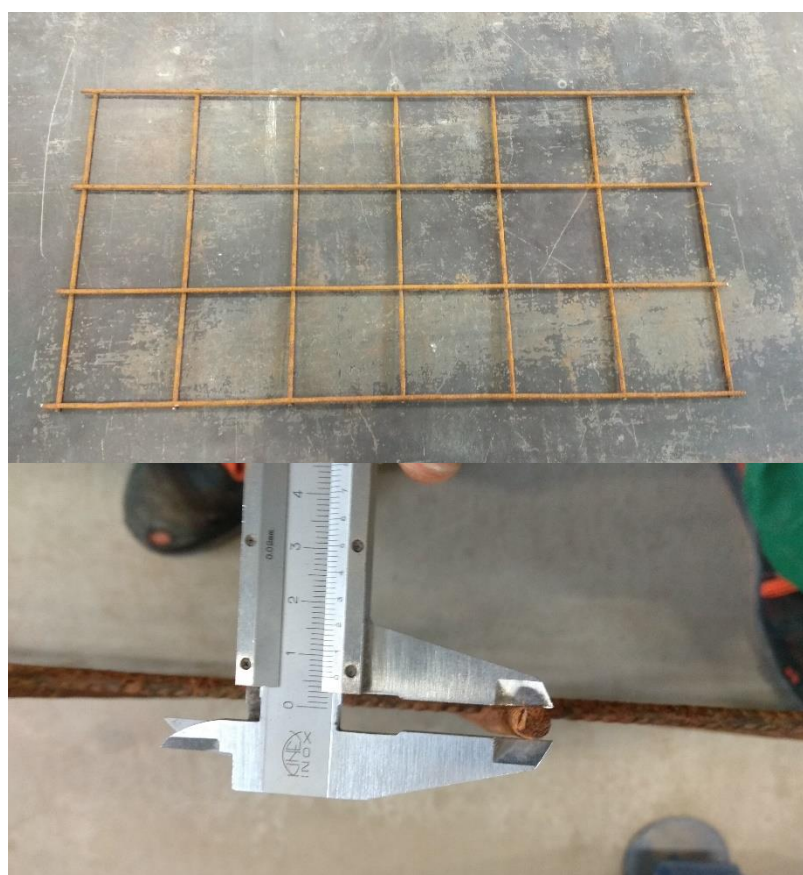
Obr. 21 Ověření rozměru formy



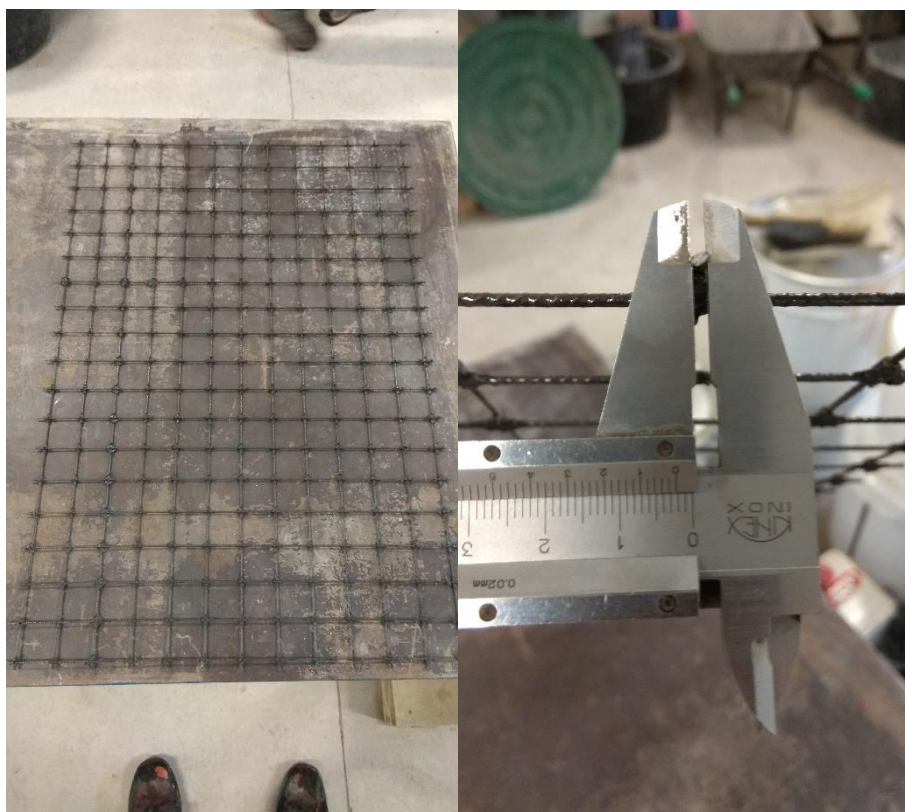
Obr. 22 Ověření rozměrů formy



Obr. 23 Porovnání ocelové a kompozitní výztuže



Obr. 24 Ocelová síť Kari



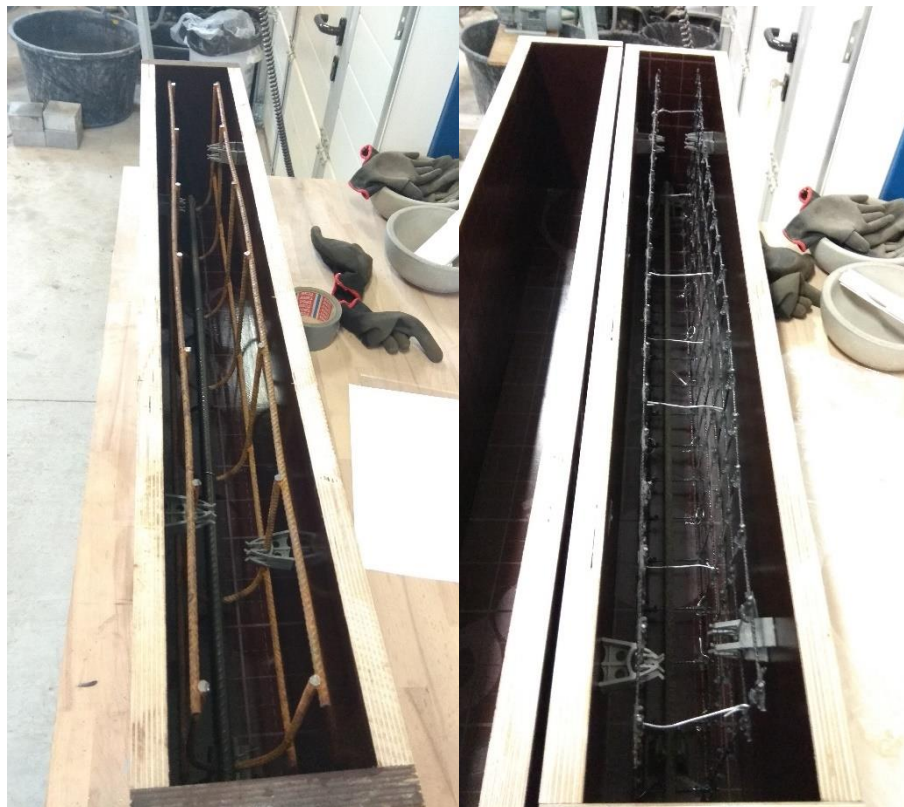
Obr. 25 Kompozitní síť Orlitech



Obr. 26 Ocelové třmínky



Obr. 27 Čedičové třmínky



Obr. 28 Ukázka uložení výztuže

4. Betonáž

Samotná betonáž proběhla 8.11.2019 a byly vybetonovány všechny potřebné vzorky. Teplota v místnosti činila 20°C. Byla použita míchačka s nuceným mícháním o objemu 100l. Před začátkem betonáže byl agloporit zalit vodou pro jeho nasycení. Kamenivo se nejprve v míchačce promíchalo na sucho, pak se přidal cement a vápenec a znova promíchalo na sucho a až poté byla přidána voda, plastifikátor a provzdušňovač. Po zamíchání směsi bylo provedeno kontrolní sednutí kužele s hodnotou 230mm což odpovídá stupni konzistence S5. Množství betonu potřebné pro konstantní betonáž bylo příliš velké, z tohoto důvodu byly vytvořeny 2 várky betonu. Pro zajištění co největší homogenity probíhala betonáž prvků střídavě z obou várek. Taktéž byly střídavě betonovány prvky s ocelovou výztuží a s kompozitní čedičovou výztuží. Časový rozdíl mezi postupně betonovanými vzorky nebyl nikdy větší než 6 minut a rozdíl mezi prvním vzorkem O1 a posledním vzorkem Č3 činí 26 minut. Po naplnění forem betonem byl použit vibrační stůl na zhutnění směsi. Vybetonované vzorky byly uloženy na pevný a rovný podklad a jejich povrch byl zakryt pro snížení vypařování vody z povrchu.



Obr. 29 Navážka surovin



Obr. 30 Suché promíchání kameniva



Obr. 32 Míchání finální směsi



Obr. 31 Čerstvý beton



Obr. 33 Zkouška sednutí kužele



Obr. 34 Betonáž



Obr. 35 Vybetonované vzorky



Obr. 36 Ochrana před přílišným vysoušením

5. Odbednění

Odbednění proběhlo 3 dny od samotné betonáže, poté byla tělesa převezena ke skladování.

Po odformování byly vzorky zváženy pro určení objemové hmotnosti.

Celková objemová hmotnost překladů s ocelovou výztuží je 1987 kg/m^3 . Překlady s kompozitní výztuží měly objemovou hmotnost jen o něco málo menší a to 1933 kg/m^3 .

	výška [m]	šířka [m]	délka [m]		Objem [m ³]
Rozměry:	0,24	0,115	0,99		0,027324

Vzorek	Hmotnost po odbednění [kg]	Objemová hmotnost po odbednění [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
O1	53,37	1953,23	1986,53
O2	54,5	1994,58	
O3	54,97	2011,78	
Č1	51,96	1901,62	1932,98
Č2	52,56	1923,58	
Č3	53,93	1973,72	

Tabulka 7 Objemové hmotnosti po odbednění



Obr. 37 Odformovaný vzorek

6. Skladování a zrání

Tělesa byla obalena strečovou folií pro zachování vlhkého prostředí pro vhodné zrání betonu a byla ponechána na paletě při teplotě, která neklesla pod 10°C. Zrání probíhalo 33dní, poté byly provedeny destrukční zkoušky.



Obr. 38 Skladování

Před samotnými zkouškami byly vzorky ještě jednou převáženy a byla znova vypočítána aktuální objemová hmotnost a to včetně dovezených, průmyslově vyráběných překladů z Liaporu.

Objemová hmotnost překladů s ocelovou výztuží činila 1975 kg/m³, překladů s kompozitní výztuží 1923 kg/m³ a průmyslově vyrobených překladů 1440 kg/m³.

	výška [m]	šířka [m]	délka [m]		Objem [m ³]
Rozměry:	0,24	0,115	0,99		0,027324

Vzorek	hmotnost vzorku	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
O1	53,16	1945,54	1975,06
O2	54,1	1979,94	
O3	54,64	1999,71	
Č1	51,72	1892,84	1923,34
Č2	52,22	1911,14	
Č3	53,72	1966,04	
L1	39,42	1442,69	1440,49
L2	39,2	1434,64	
L3	39,46	1444,15	

Tabulka 8 Objemové hmotnosti



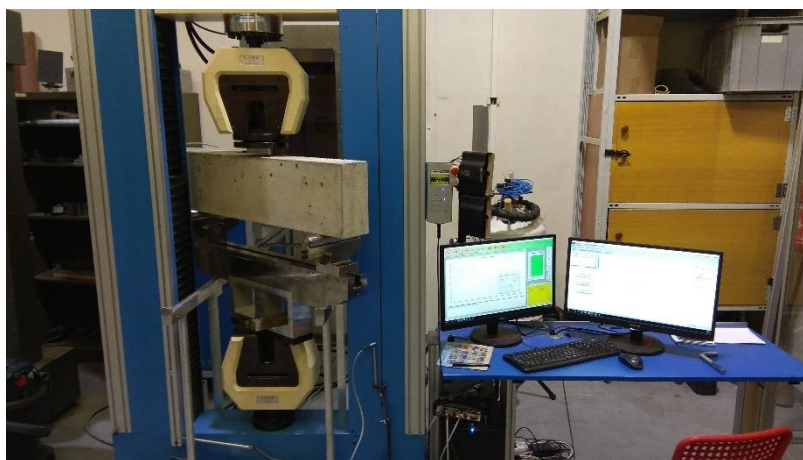
Obr. 39 Překlad Liapor

7. Zkouška tříbodovým ohybem

Dne 14.11.2019 byly na všech devíti tělesech provedeny zkoušky na tříbodový ohyb na lisu LabTech 250 v areálu Fast VUT v Brně.

Vzdálenost podpor byla zvolena 750mm, z důvodu simulování maximální světlé šířky otvoru.

Zkouška probíhala po etapách, kde byly tělesa zatěžovány postupně po krocích a byly zjišťovány a zaznamenávány trhliny a jejich šíření. Krok byl volen po 10kN, v pozdější fázi zkoušky byl krok zmenšen na 5kN pro detailnější pozorování, až do úplného selhání vzorku. Výsledkem byly maximální síly, jež byly vzorky schopny přenést, a průhyby. Také byl vytvořen diagram závislosti průhybu na zatěžovací sílu.



Obr. 40 Lis LabTech 250

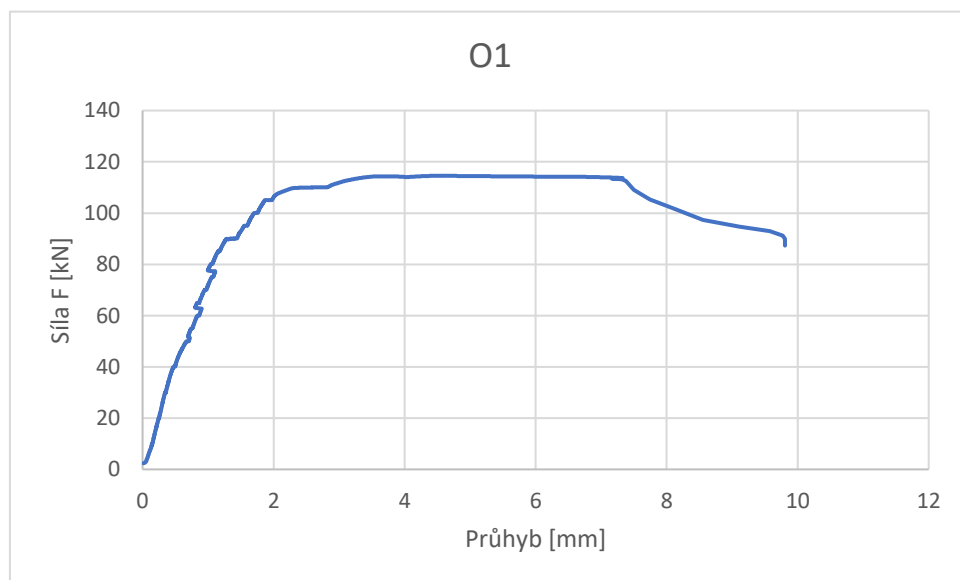
8. Výsledky

8.1. Ocelová výztuž s aglobetonem

8.1.1. Vzorek O1

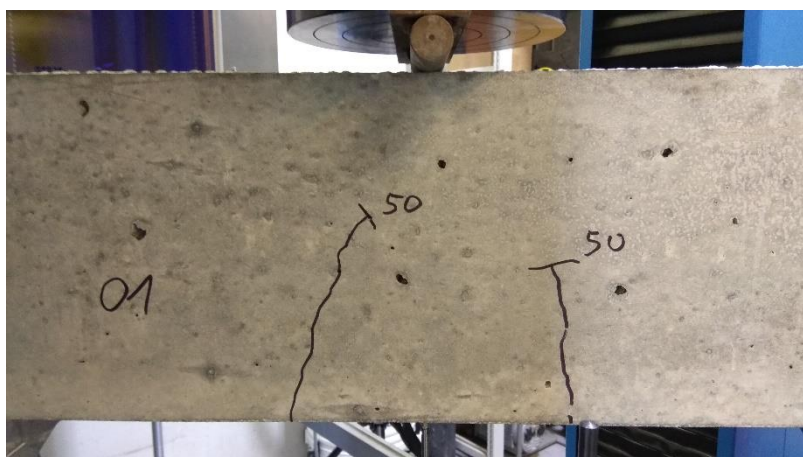
Vzorek O1	
Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
114,56	4,6203

Vzorek O1	
Limitní průhyb $L/250$	Odpovídající síla [kN]
3,5	114,22

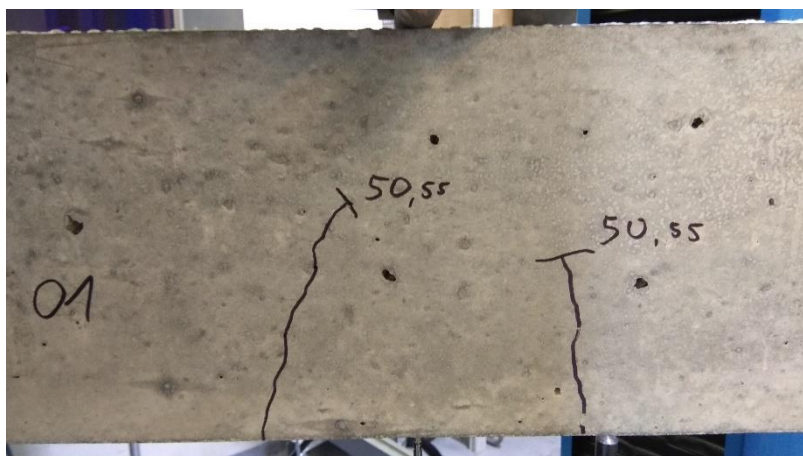




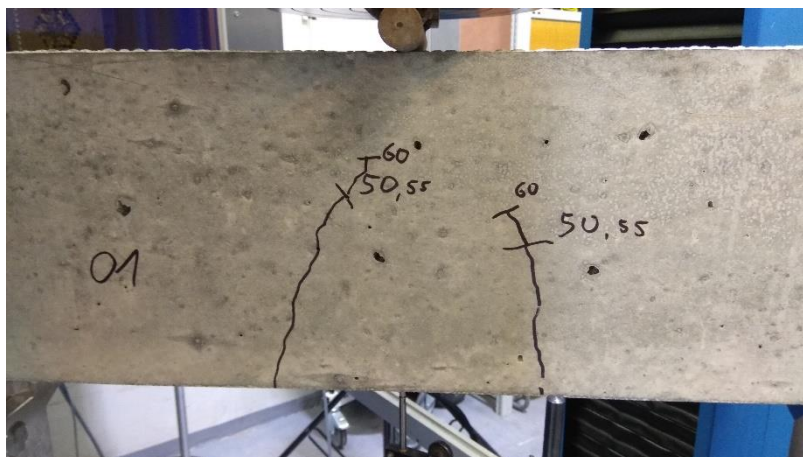
Obr. 43 Vzorek O1



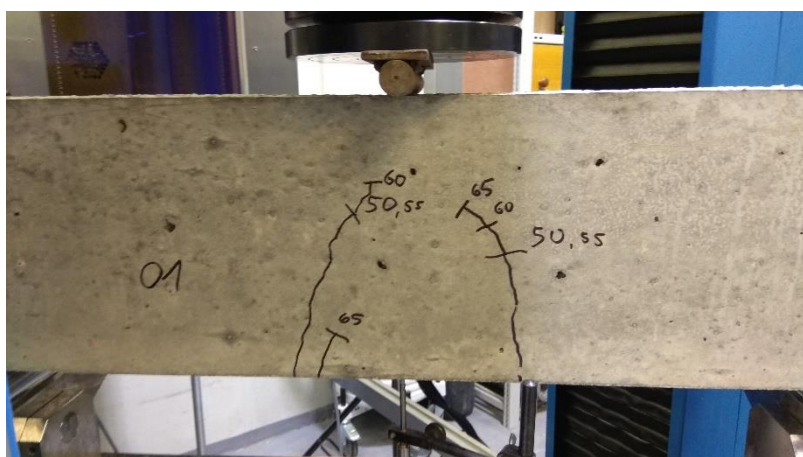
Obr. 41 Trhliny při zatížení 50 kN



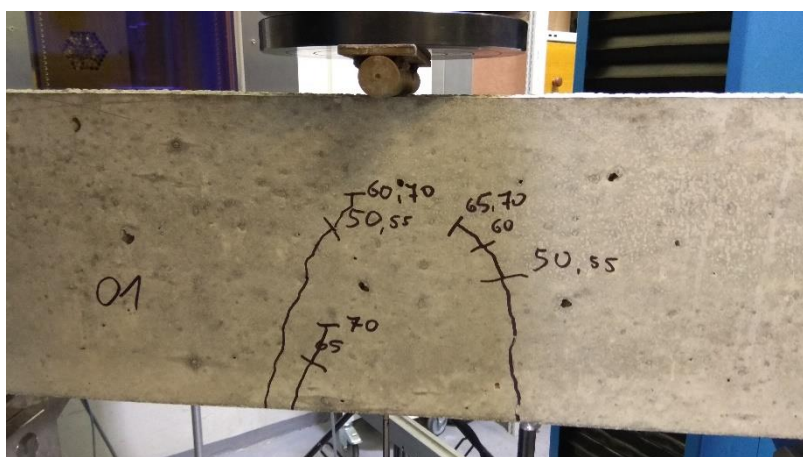
Obr. 45 Trhliny při zatížení 55 kN



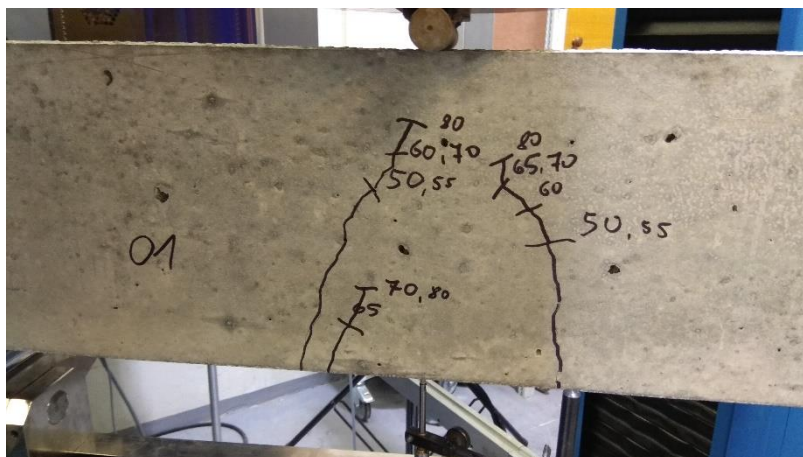
Obr. 426 Trhliny při zatížení 60 kN



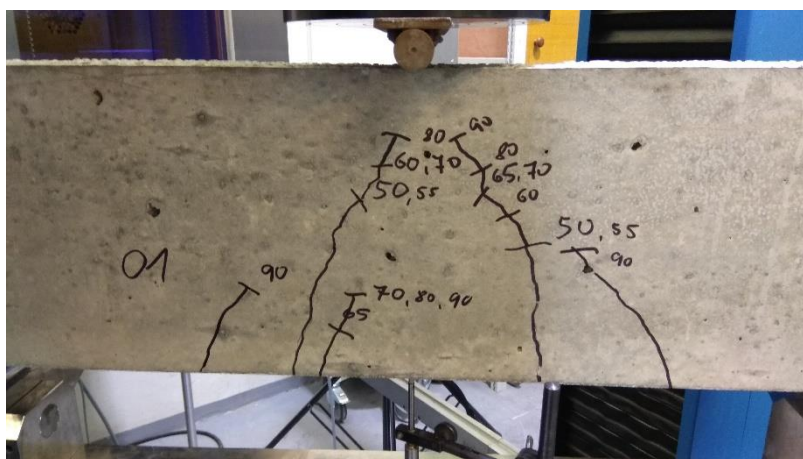
Obr. 43 Trhliny při zatížení 65 kN



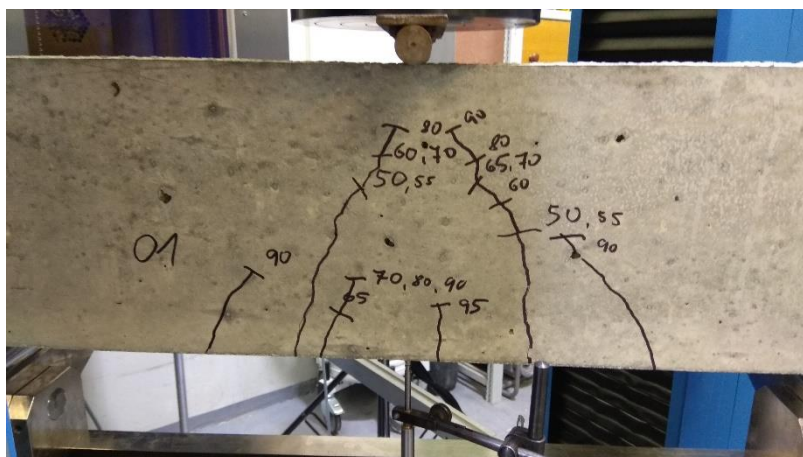
Obr. 48 Trhliny při zatížení 70 kN



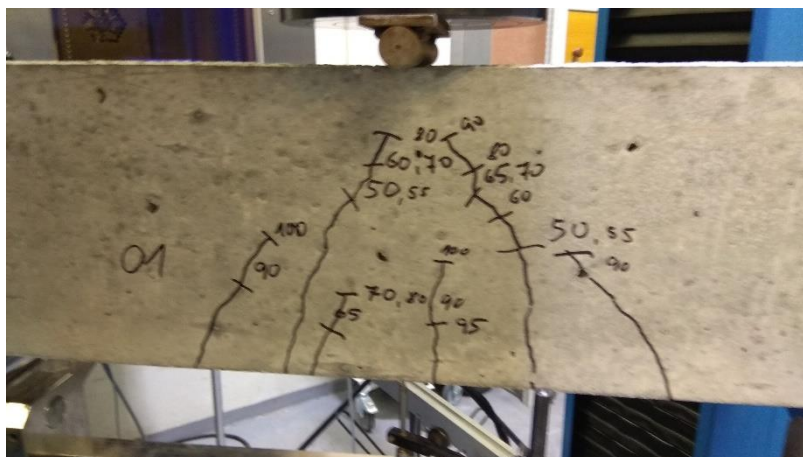
Obr. 45 Trhliny při zatížení 80 kN



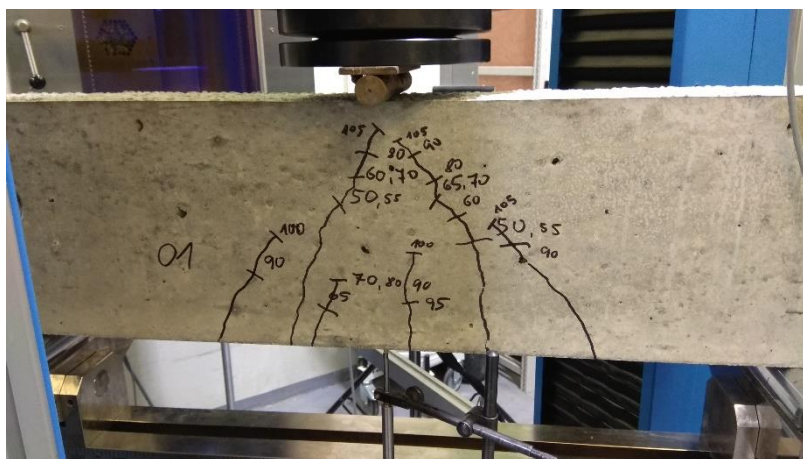
Obr. 50 Trhliny při zatížení 90 kN



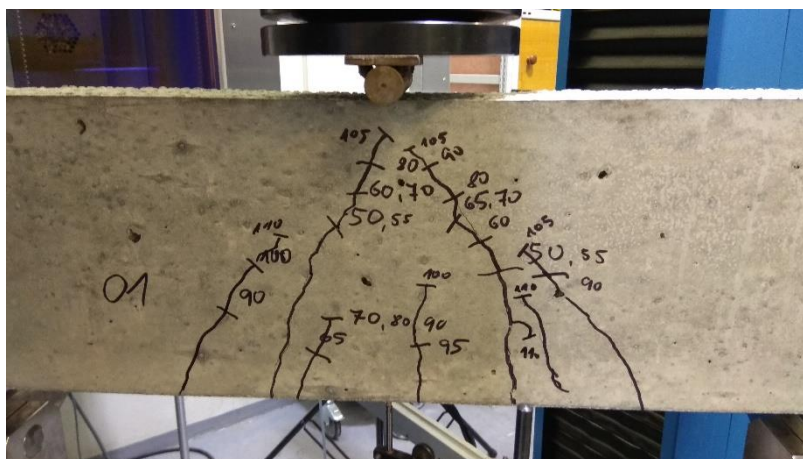
Obr. 44 Trhliny při zatížení 95 kN



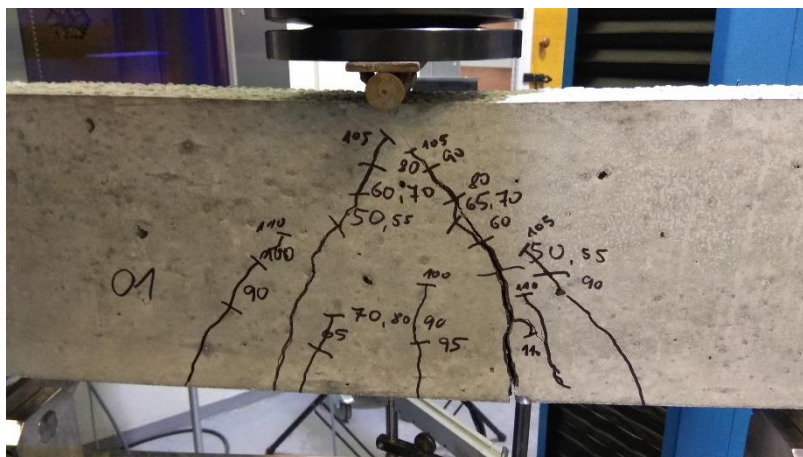
Obr. 47 Trhliny při zatížení 100 kN



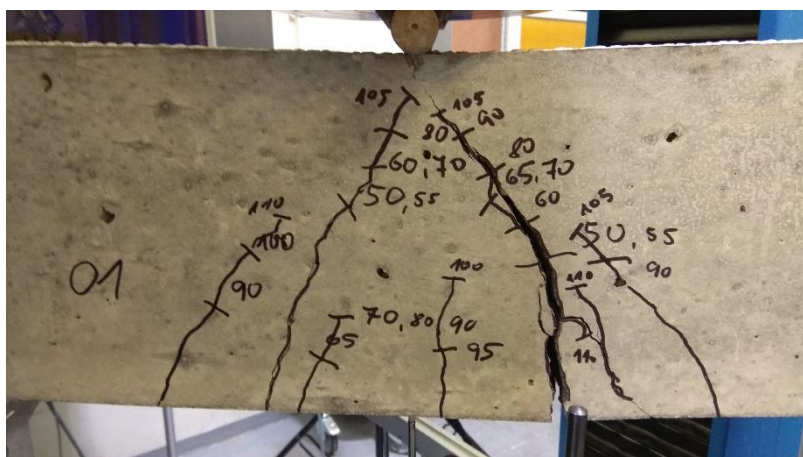
Obr. 46 Trhliny při zatížení 105 kN



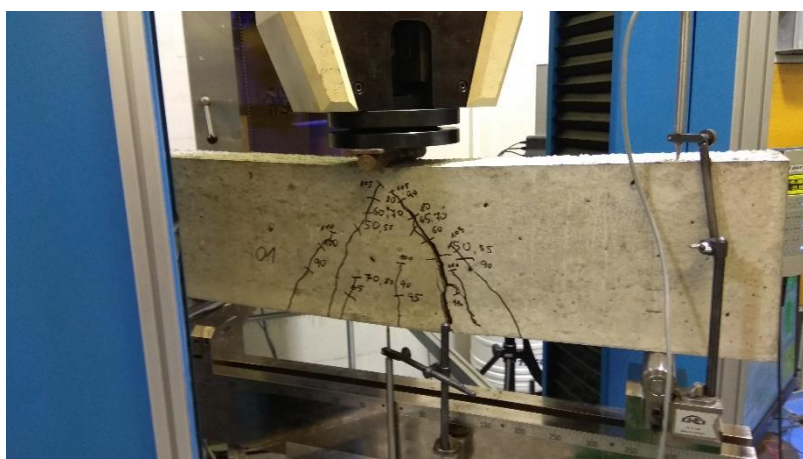
Obr. 54 Trhliny při zatížení 110 kN



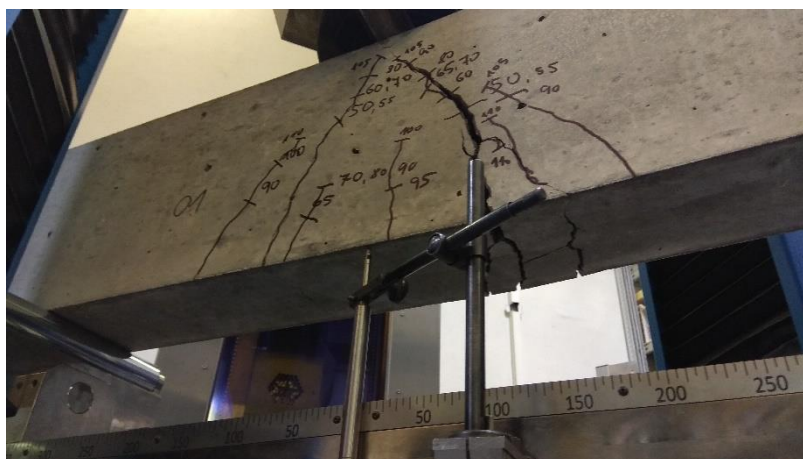
Obr. 48 Selhání konstrukce



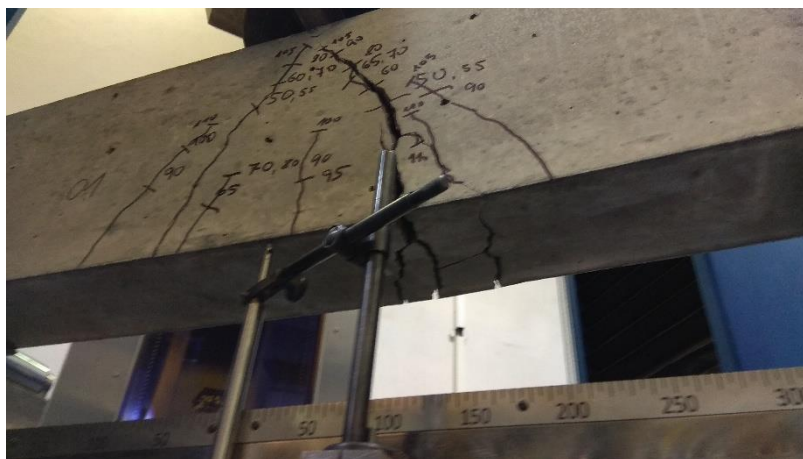
Obr. 56 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 57 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 49 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 5950 Trhliny po překonání maximálního zatížení

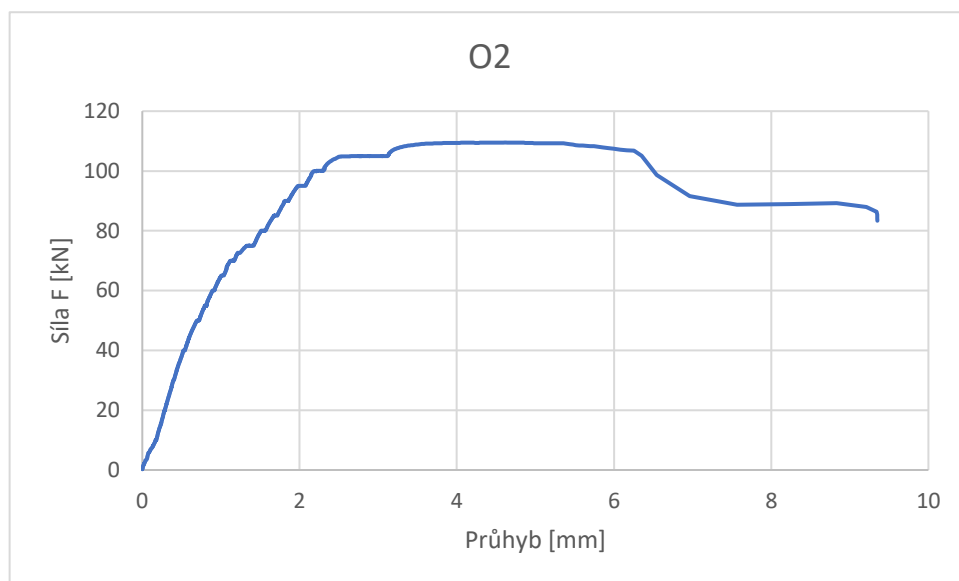


Obr. 60 Trhliny po překonání maximálního zatížení

8.1.2. Vzorek O2

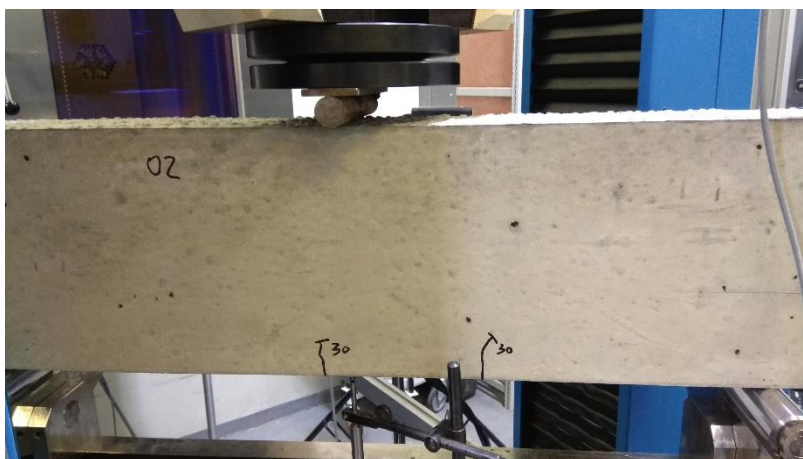
Vzorek O2	
Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
109,51	4,61

Vzorek O2	
Limitní průhyb L/250	Odpovídající síla [kN]
3,5	108,8

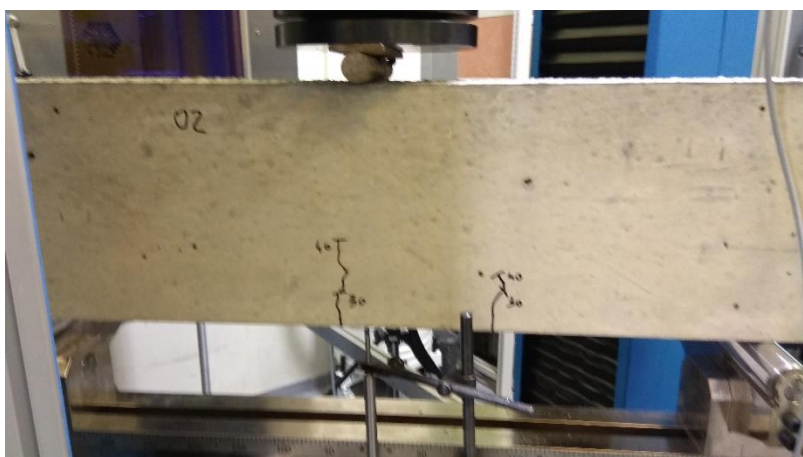




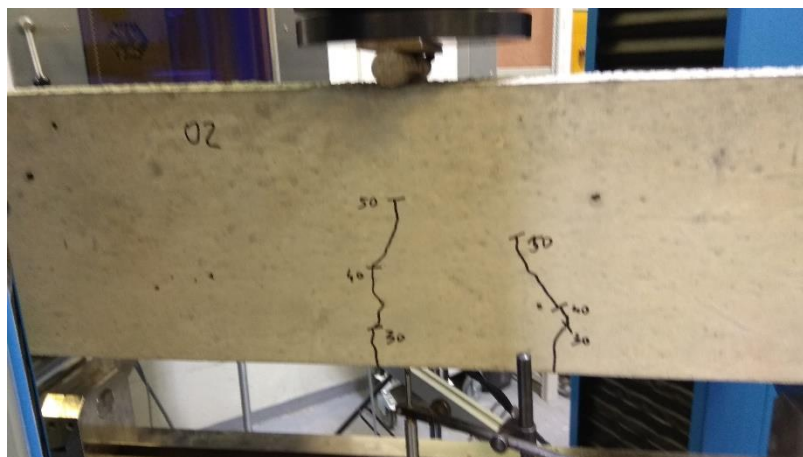
Obr. 521 Vzorek O2



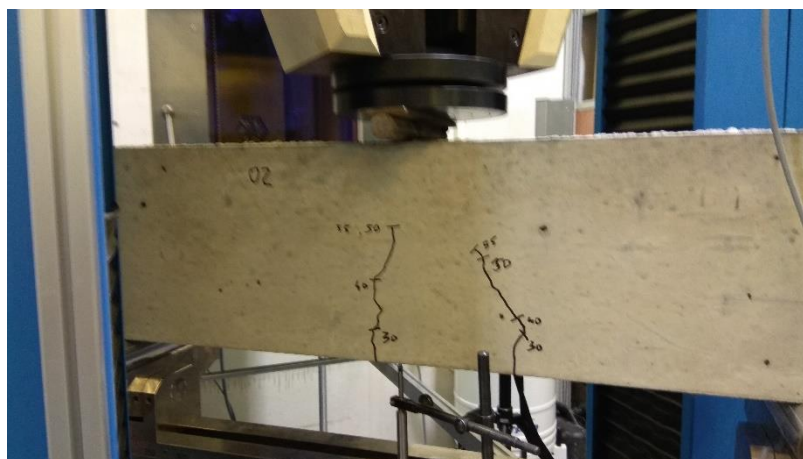
Obr. 62 Trhliny při zatížení 30 kN



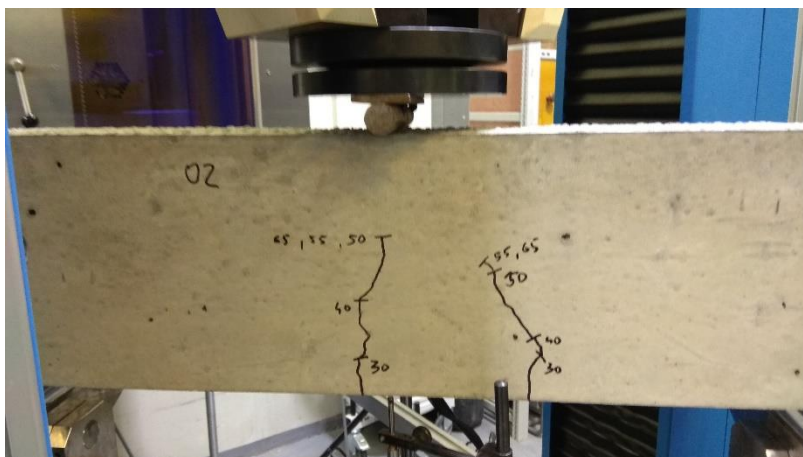
Obr. 6351 Trhliny při zatížení 40 kN



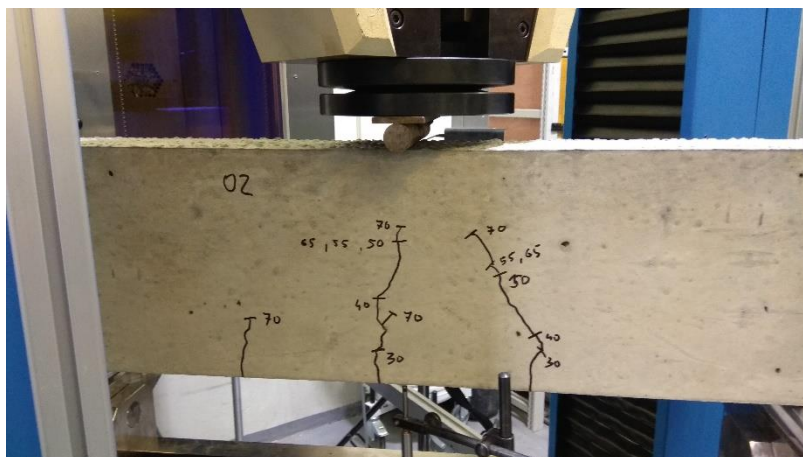
Obr. 53 Trhliny při zatížení 50 kN



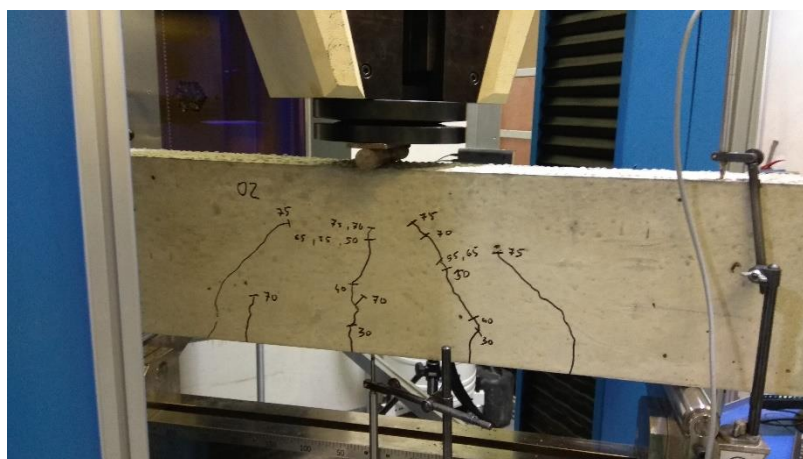
Obr. 54 Trhliny při zatížení 55 kN



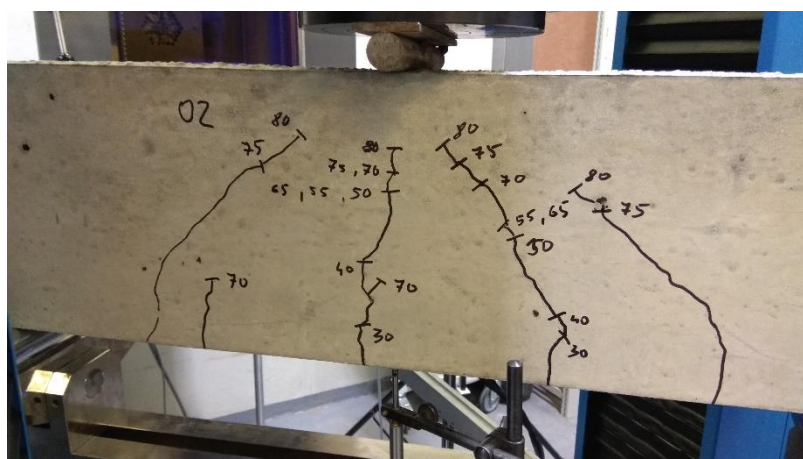
Obr. 55 Trhliny při zatížení 65 kN



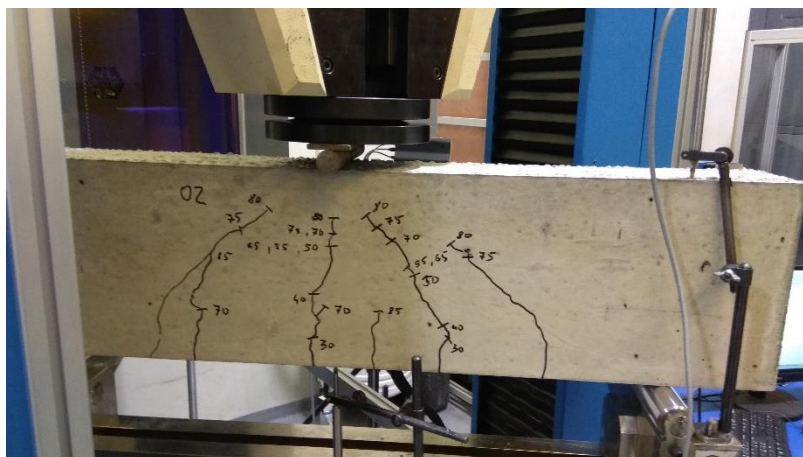
Obr. 58 Trhliny při zatížení 70 kN



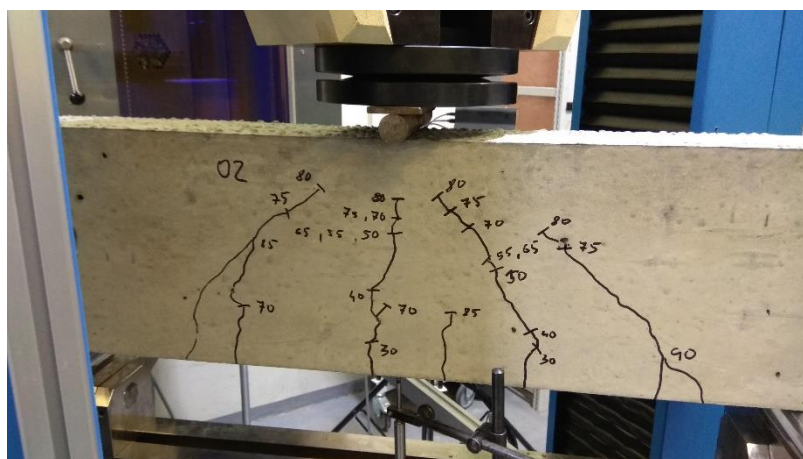
Obr. 57 Trhliny při zatížení 75 kN



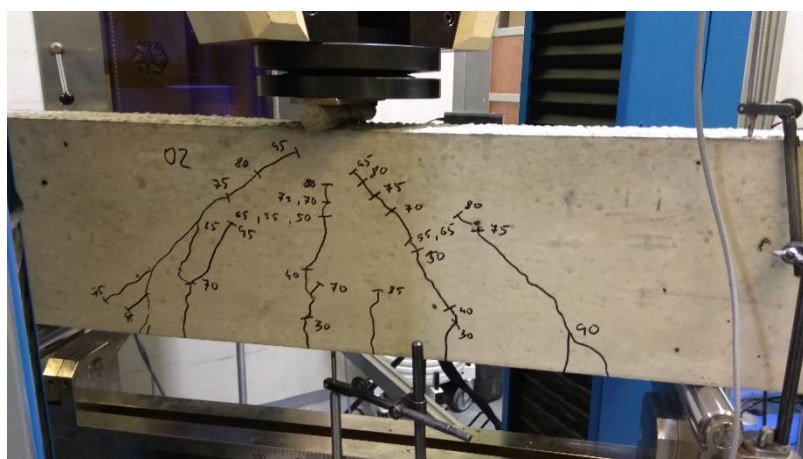
Obr. 56 Trhliny při zatížení 80 kN



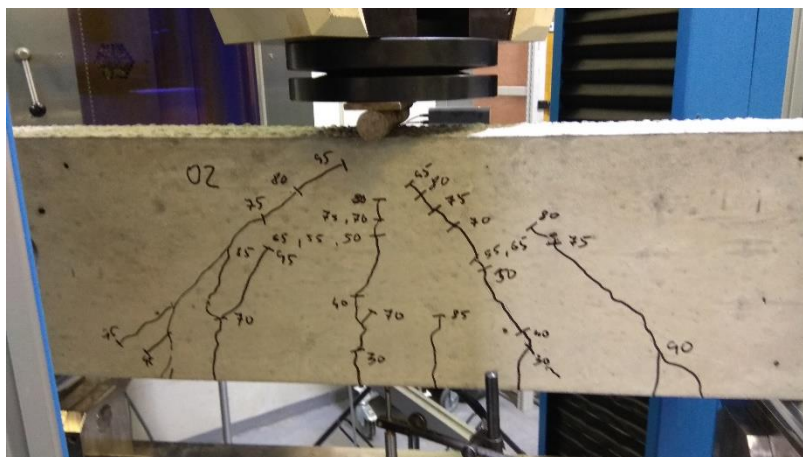
Obr. 59 Trhliny při zatížení 85 kN



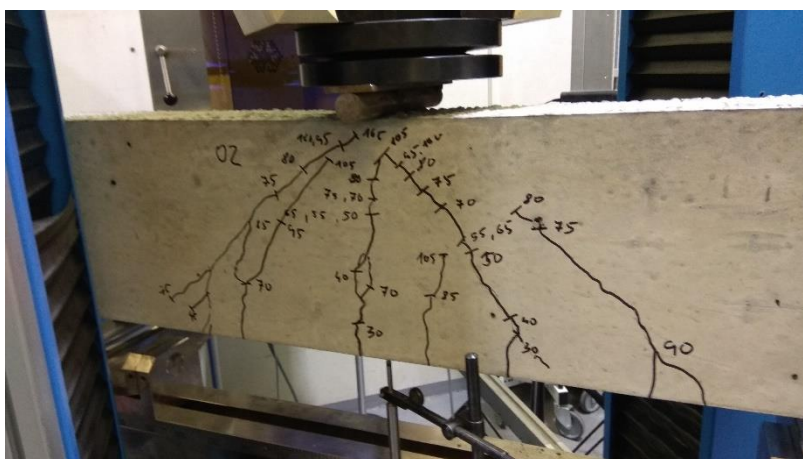
Obr. 60 Trhliny při zatížení 90 kN



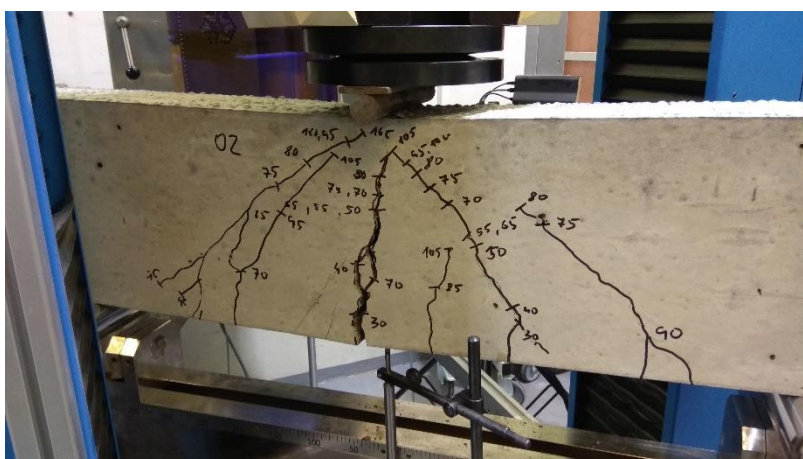
Obr. 61 Trhliny při zatížení 95 kN



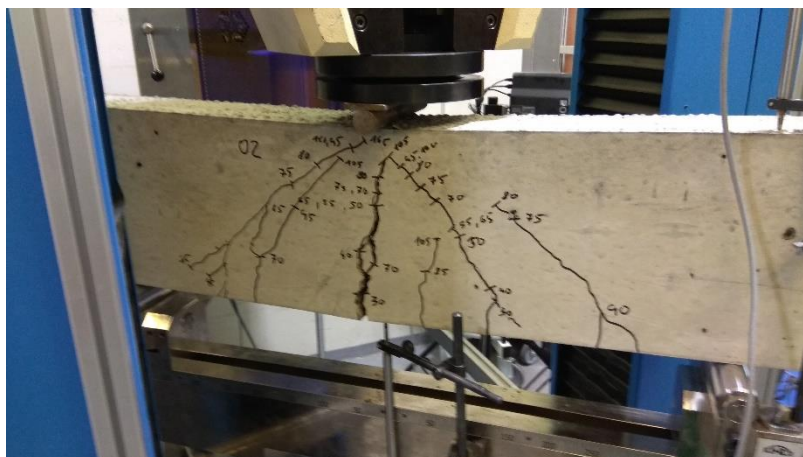
Obr. 64 Trhliny při zatížení 100 kN



Obr. 63 Trhliny při zatížení 105 kN



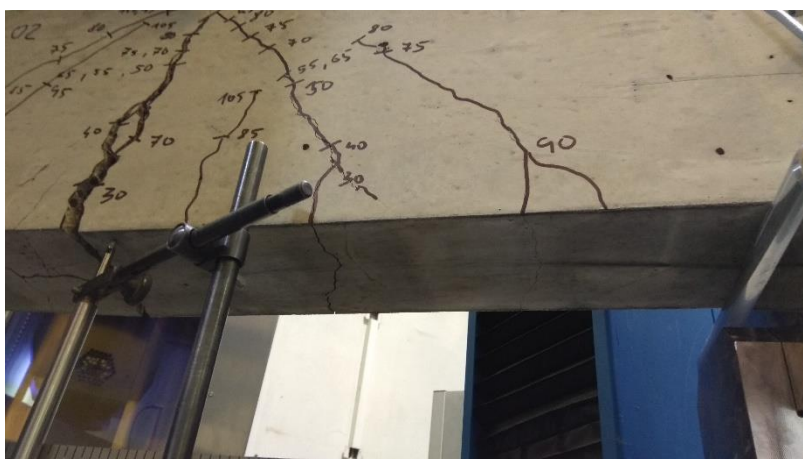
Obr. 62 Selhání konstrukce



Obr. 65 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 66 Trhliny po překonání maximálního zatížení

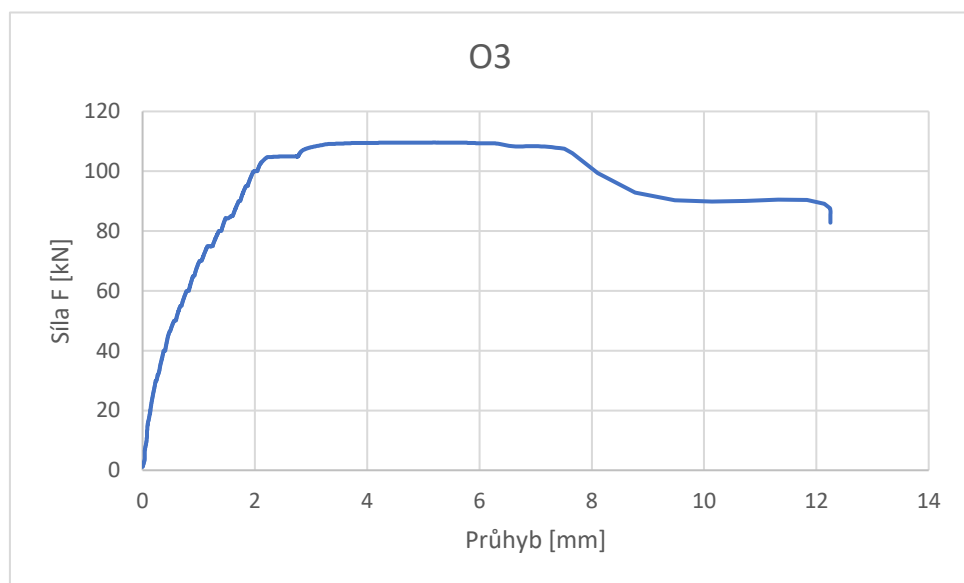


Obr. 67 Trhliny po překonání maximálního zatížení

8.1.3. Vzorek O3

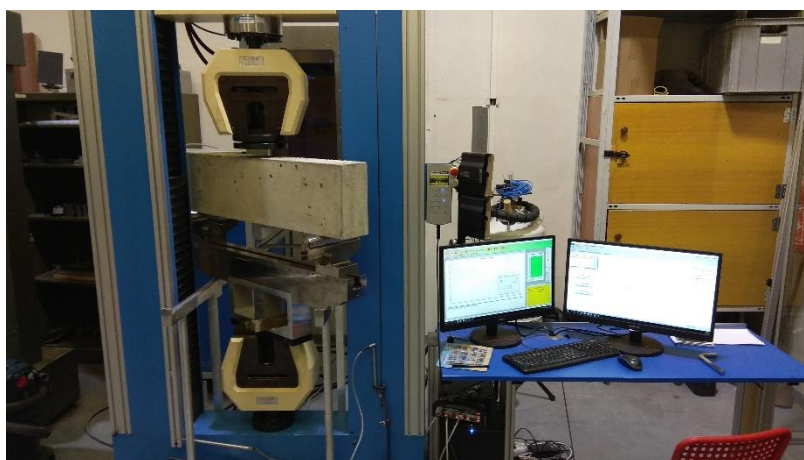
Vzorek O3	
Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
109,62	5,2924

Vzorek O3	
Limitní průhyb L/250	Odpovídající síla [kN]
3,5	109,1

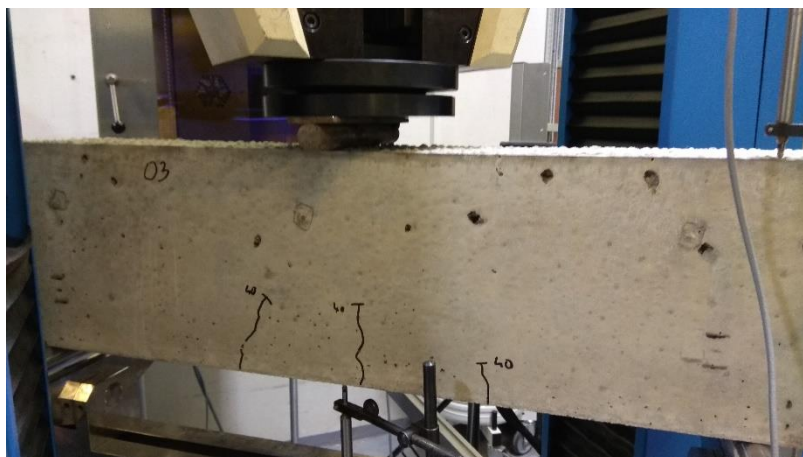




Obr. 68 Vzorek O3



Obr. 69 Pracoviště



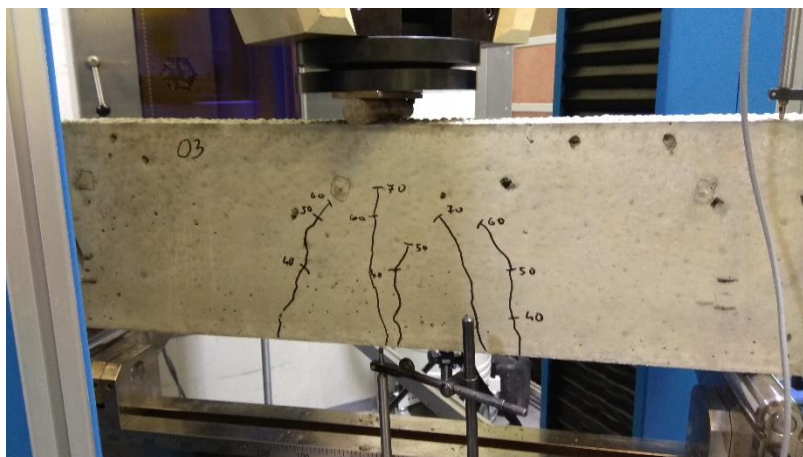
Obr. 70 Trhliny při zatížení 40 kN



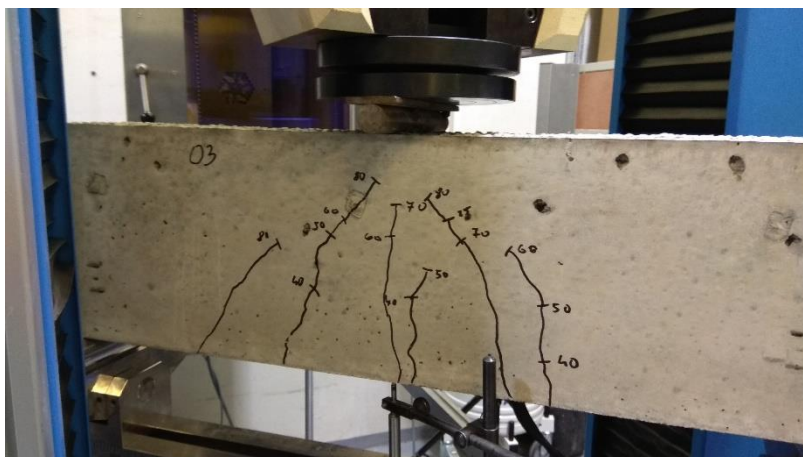
Obr. 71 Trhliny při zatížení 50 kN



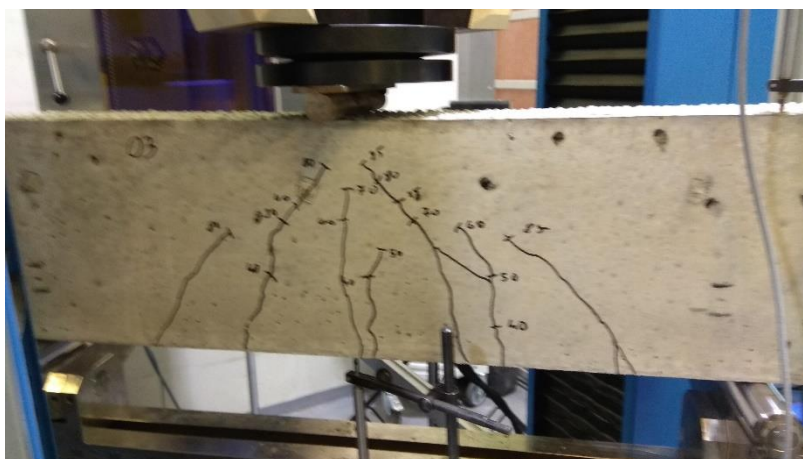
Obr. 72 Trhliny při zatížení 60 kN



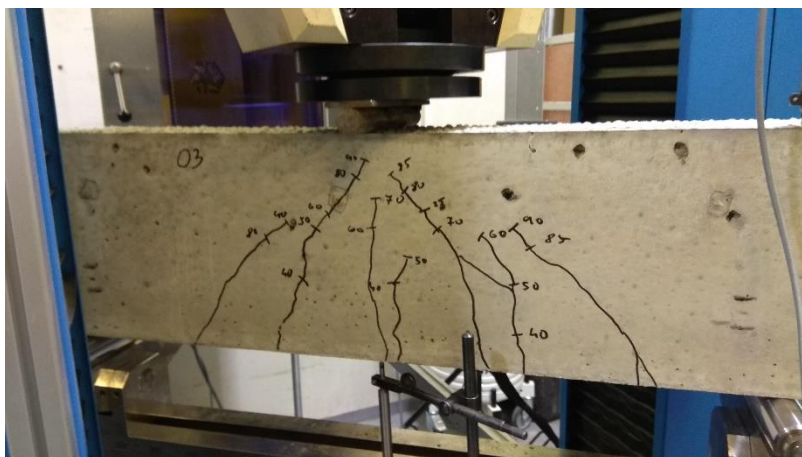
Obr. 73 Trhliny při zatížení 70 kN



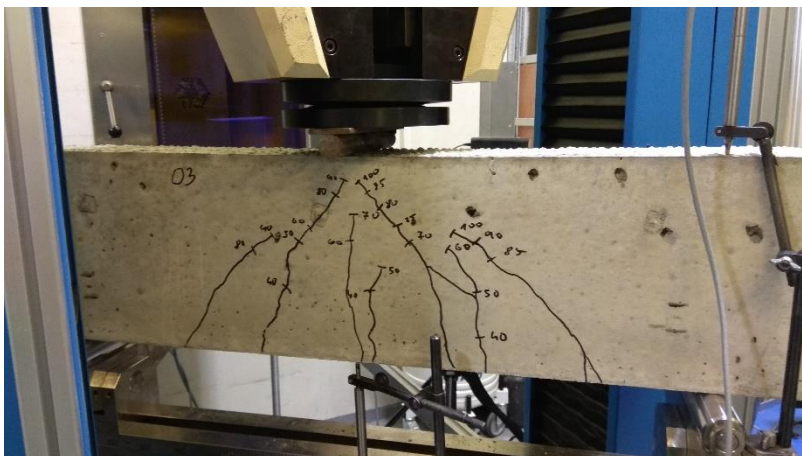
Obr. 85 Trhliny při zatížení 80 kN



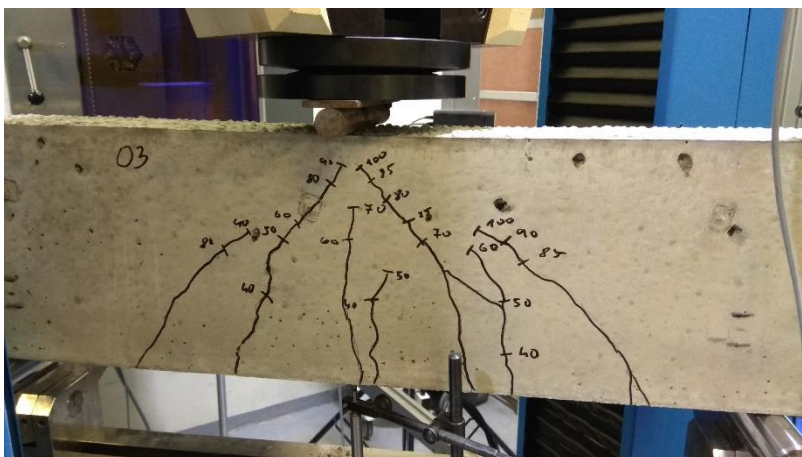
Obr. 86 Trhliny při zatížení 85 kN



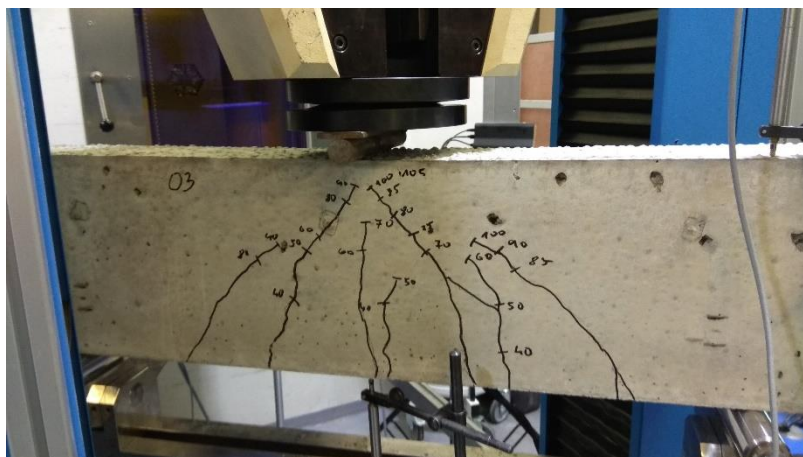
Obr. 74 Trhliny při zatížení 90 kN



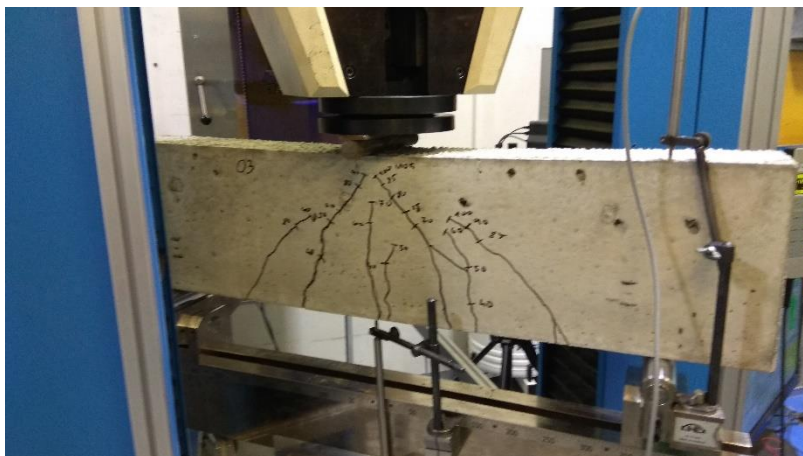
Obr. 75 Trhliny při zatížení 100 kN



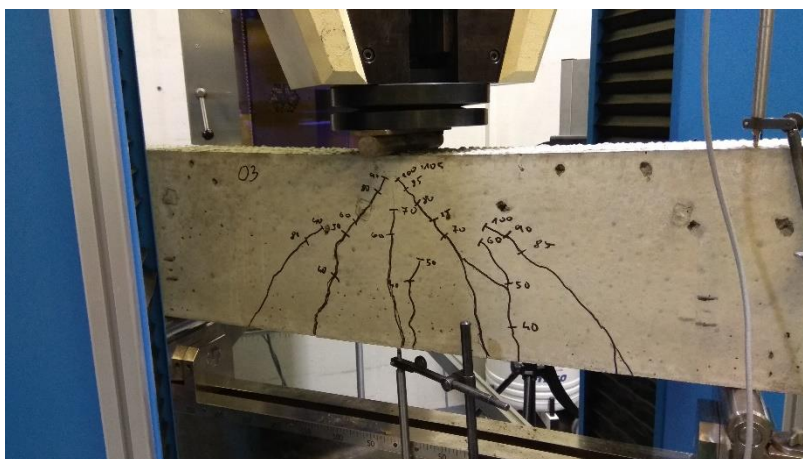
Obr. 76 Trhliny při zatížení 100 kN



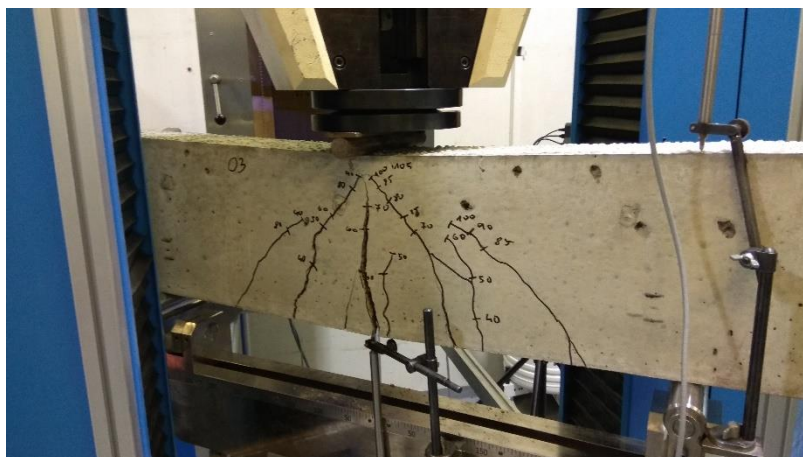
Obr. 77 Trhliny při zatížení 105 kN



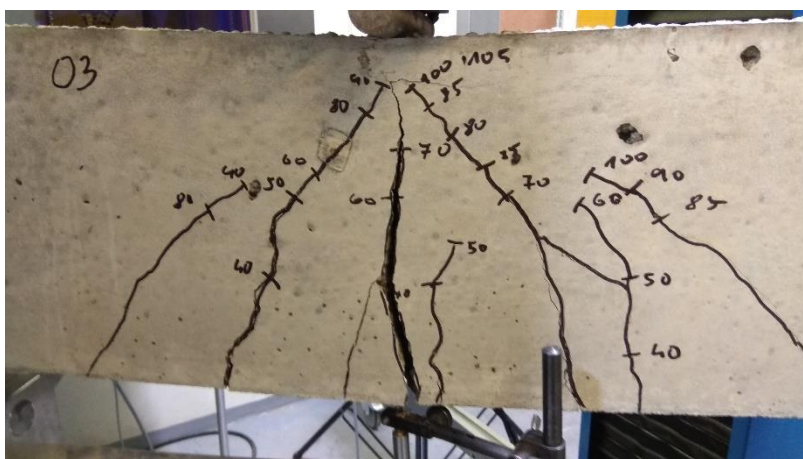
Obr. 78 Postupné selhávání konstrukce



Obr. 79 Postupné selhávání konstrukce



Obr. 80 Postupné selhávání konstrukce



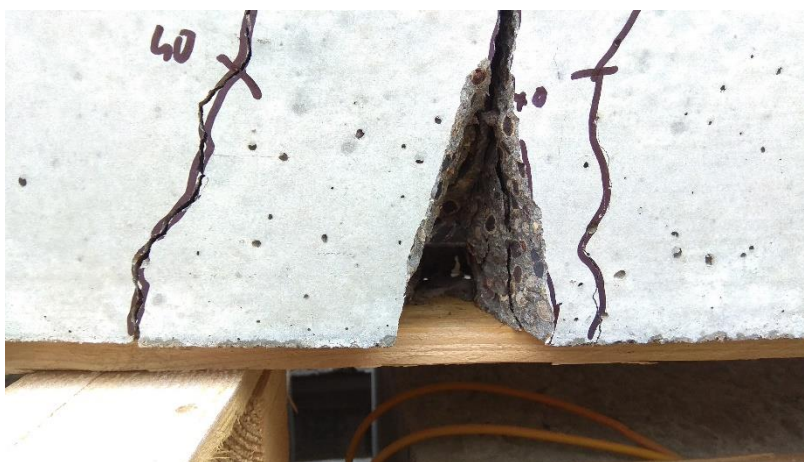
Obr. 81 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 82 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 83 Trhliny po překonání maximálního zatížení



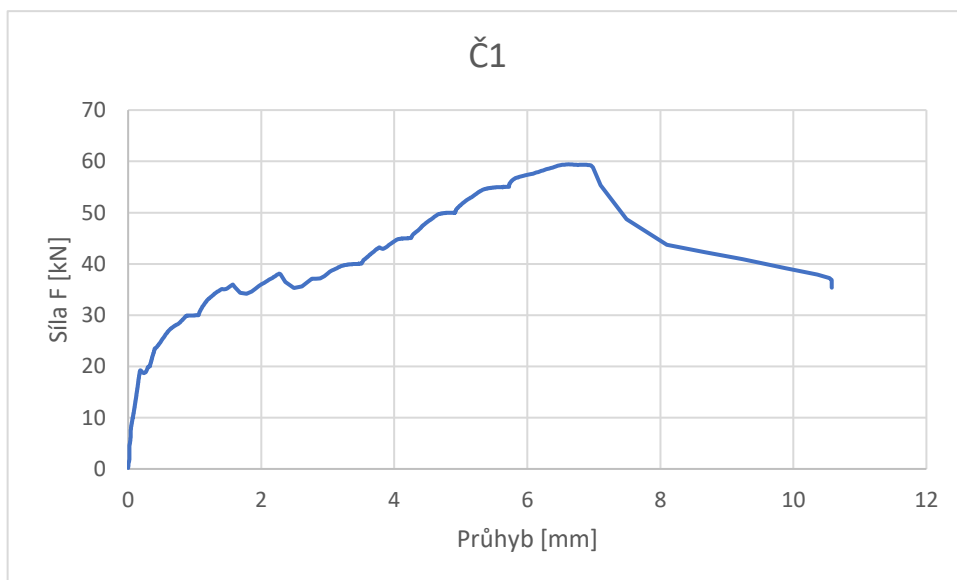
Obr. 84 Odhalená výztuž

8.2. Kompozitní čedičová výztuž s Aglobetonem

8.2.1. Vzorek Č1

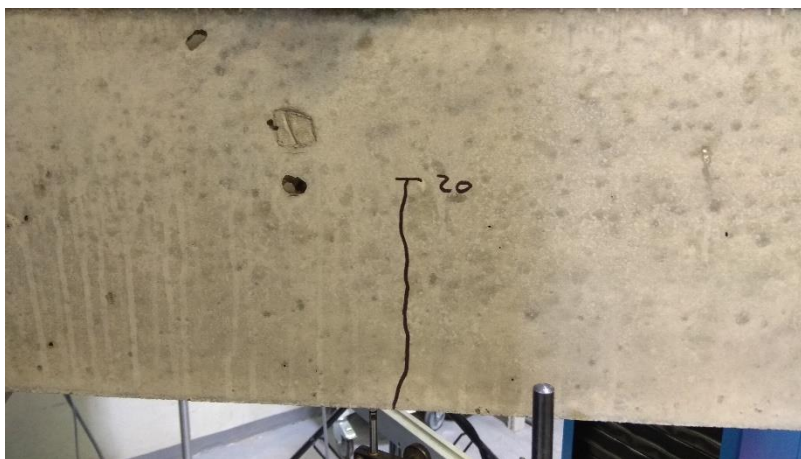
Vzorek Č1	
Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
59,43	7,3603

Vzorek Č1	
Limitní průhyb L/250	Odpovídající síla [kN]
3,5	40,01

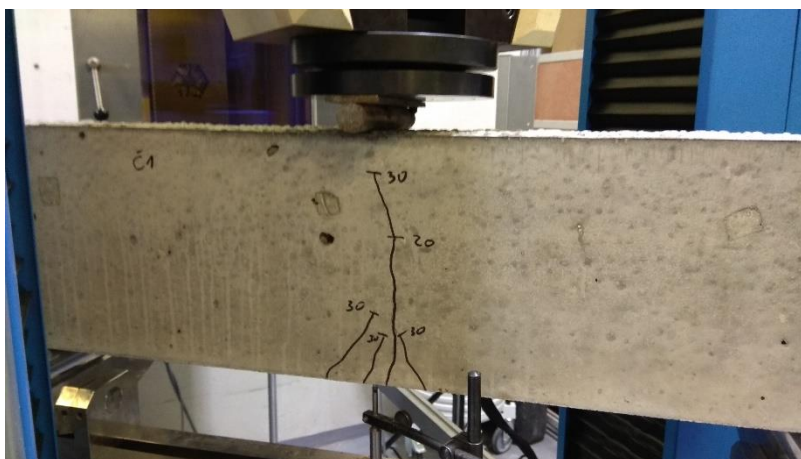




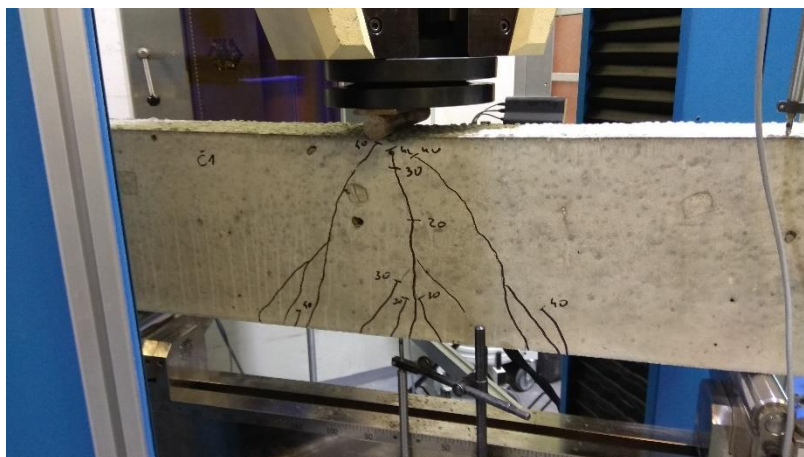
Obr. 85 Vzorek Č1



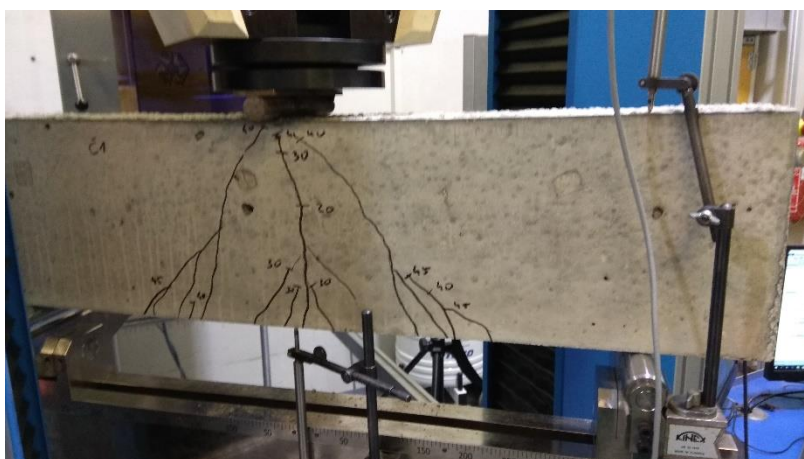
Obr. 99 Trhliny při zatížení 20 kN



Obr. 100 Trhliny při zatížení 30 kN



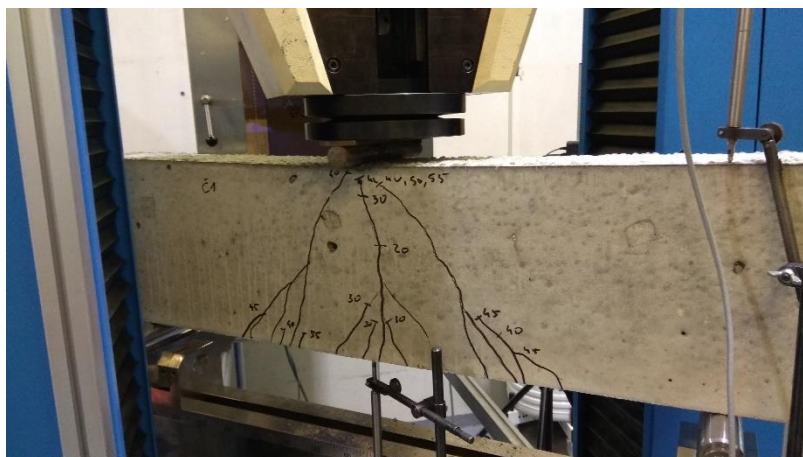
Obr. 86 Trhliny při zatížení 40 kN



Obr. 87 Trhliny při zatížení 45 kN



Obr. 88 Trhliny při zatížení 50 kN



Obr. 89 Trhliny při zatížení 55 kN



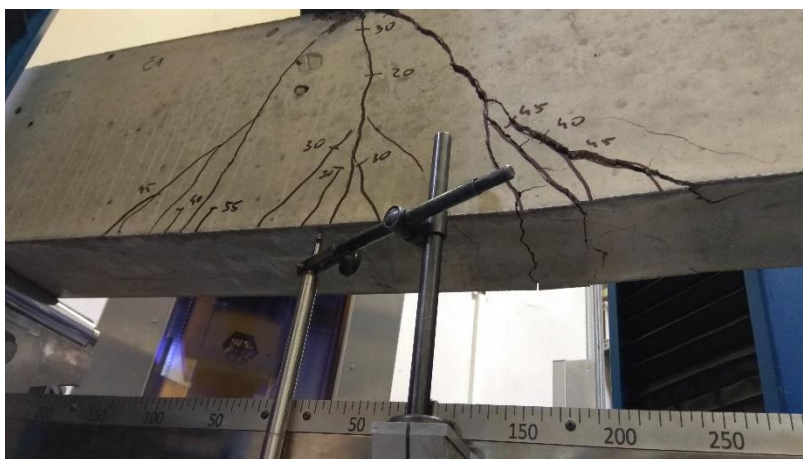
Obr. 105 Selhání konstrukce



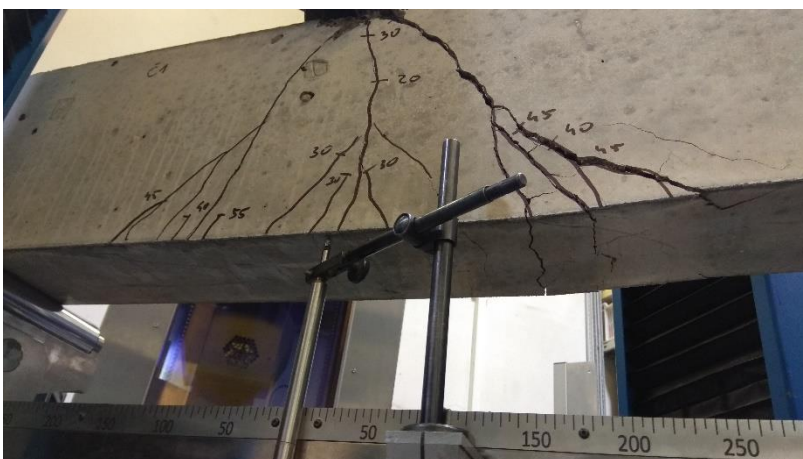
Obr. 106 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 107 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 108 Trhliny po překonání maximálního zatížení

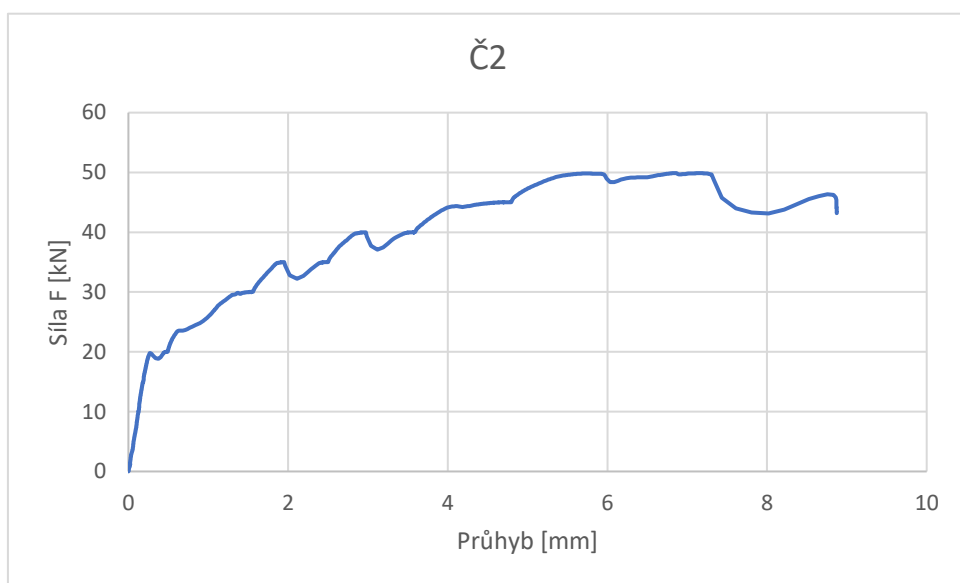


Obr. 109 Trhliny po překonání maximálního zatížení

8.2.2. Vzorek Č2

Vzorek Č2	
Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
49,89	7,158

Vzorek Č2	
Limitní průhyb L/250	Odpovídající síla [kN]
3,5	39,95





Obr. 90 Vzorek Č2



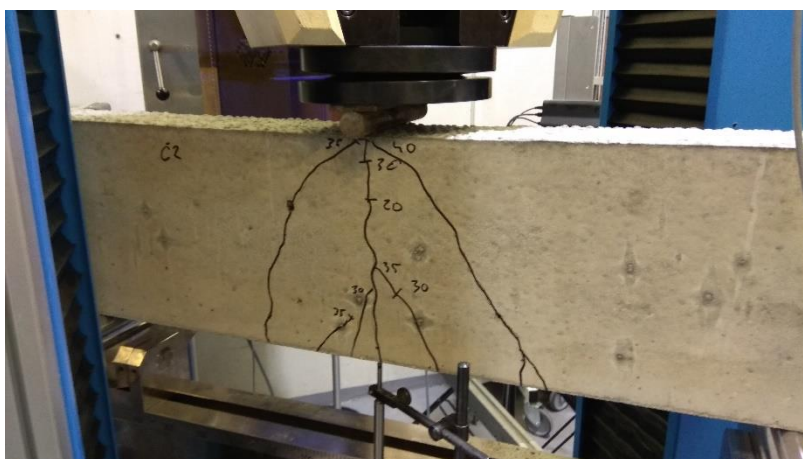
Obr. 91 Trhliny při zatížení 20 kN



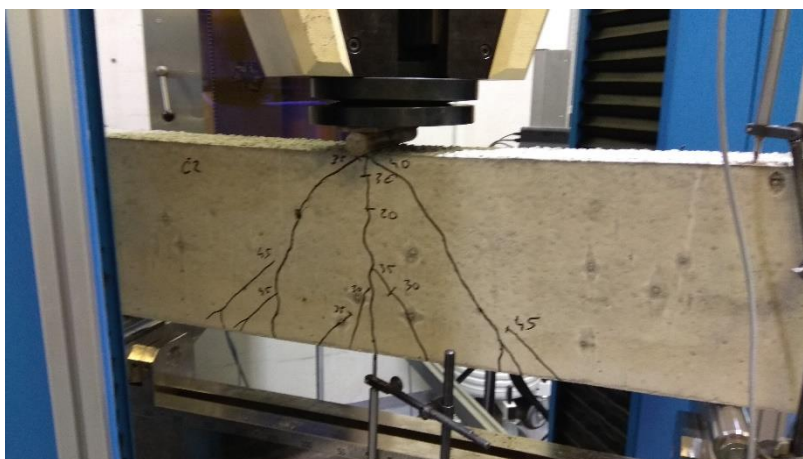
Obr. 92 Trhliny při zatížení 30 kN



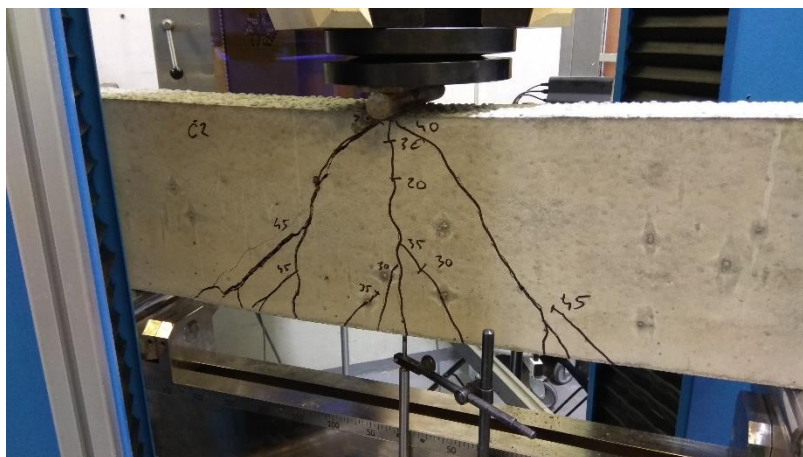
Obr. 93 Trhliny při zatížení 35 kN



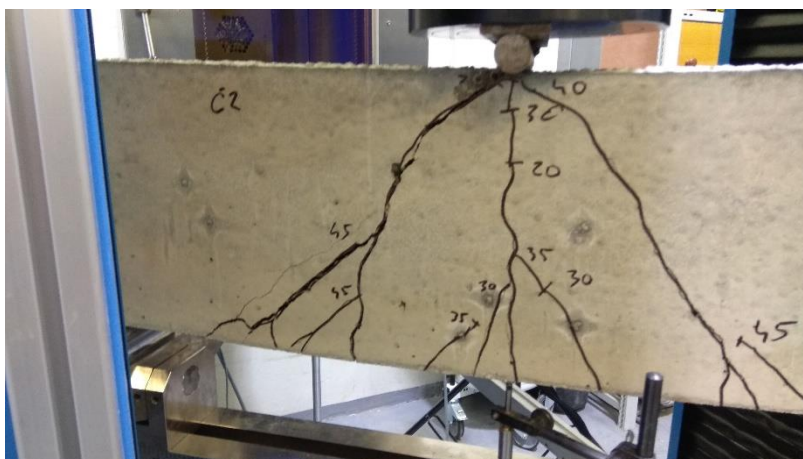
Obr. 94 Trhliny při zatížení 40 kN



Obr. 95 Trhliny při zatížení 45 kN



Obr. 96 Selhání konstrukce



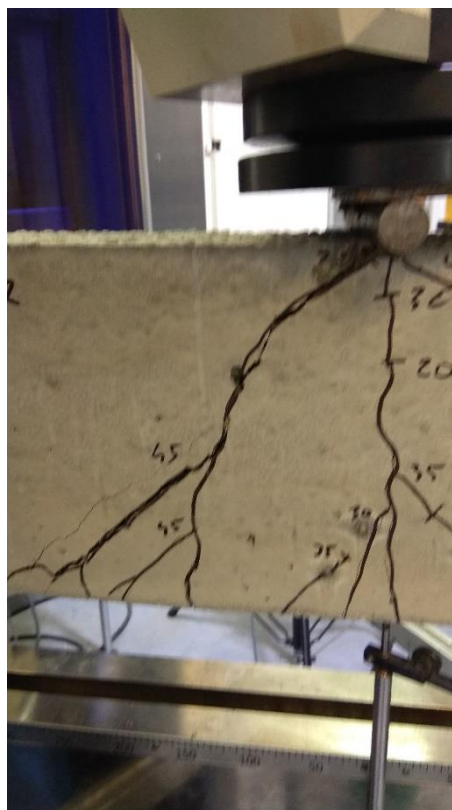
Obr. 97 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 98 Trhliny po překonání maximálního zatížení



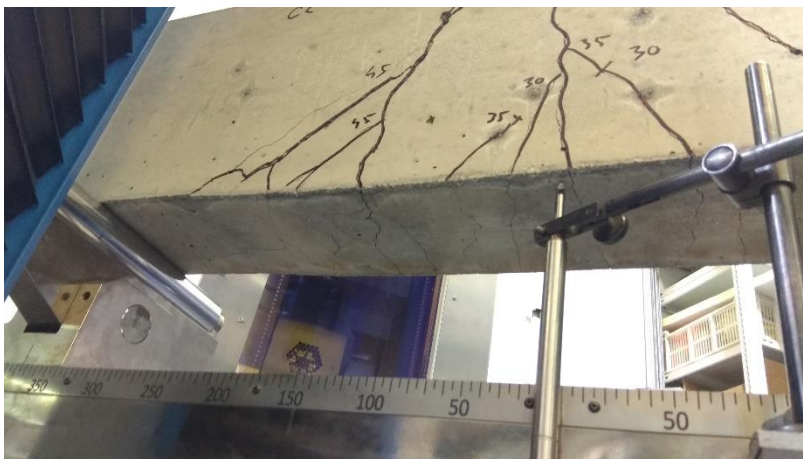
Obr. 99 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 100 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 121 Trhliny po překonání maximálního zatížení

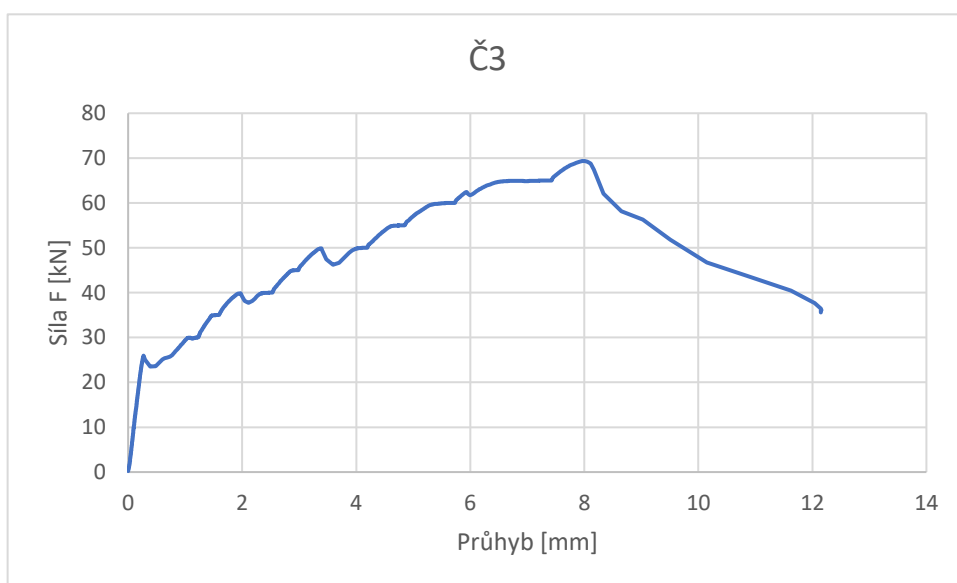


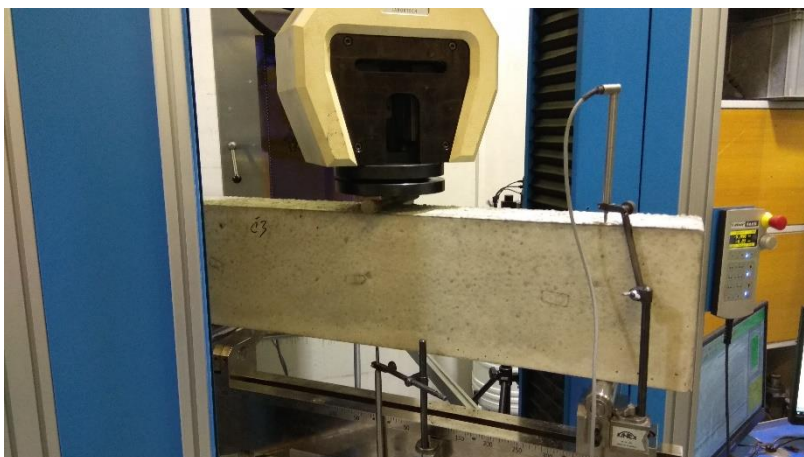
Obr. 122 Trhliny po překonání maximálního zatížení

8.2.3. Vzorek Č3

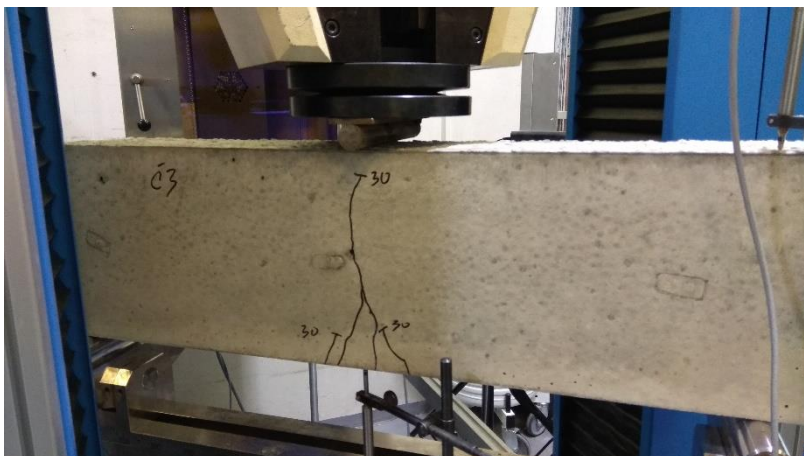
Vzorek Č3	
Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
69,34	7,975

Vzorek Č3	
Limitní průhyb L/250	Odpovídající síla [kN]
3,5	47,41

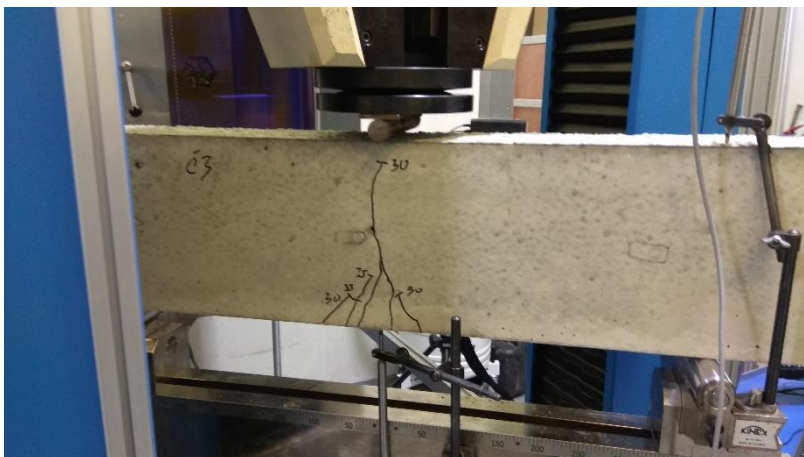




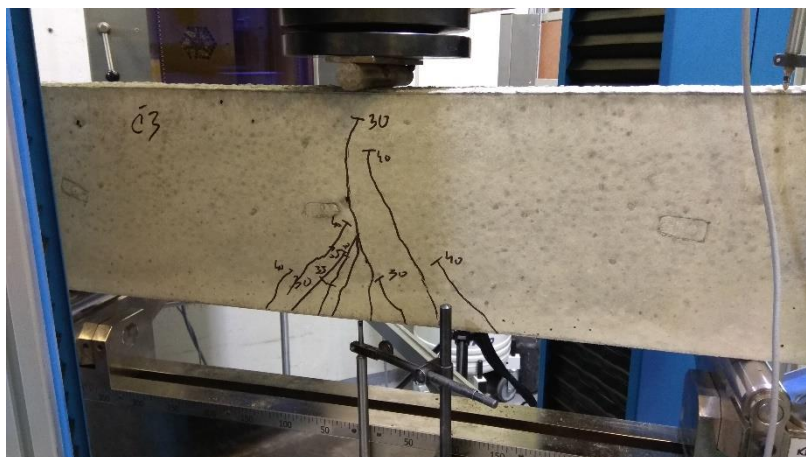
Obr. 123 Vzorek Č3



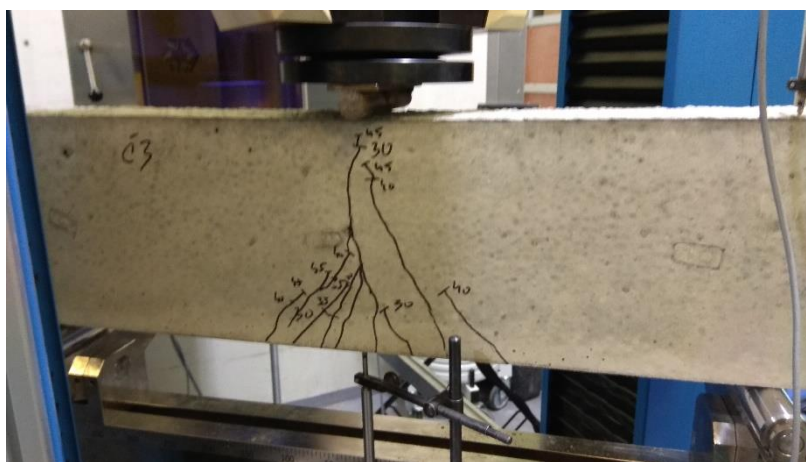
Obr. 124 Trhliny při zatížení 30 kN



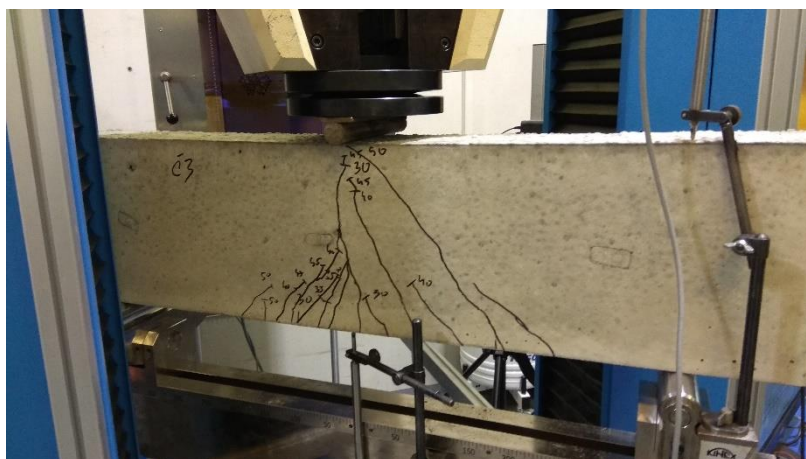
Obr. 125 Trhliny při zatížení 35 kN



Obr. 101 Trhliny při zatížení 40 kN



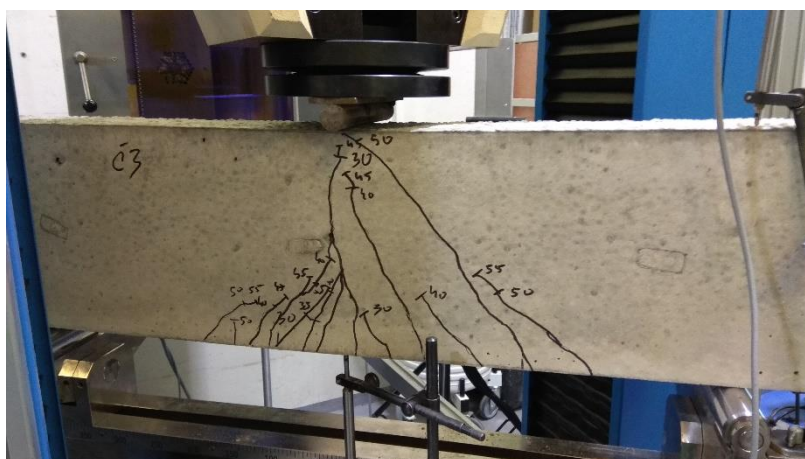
Obr. 127 Trhliny při zatížení 45 kN



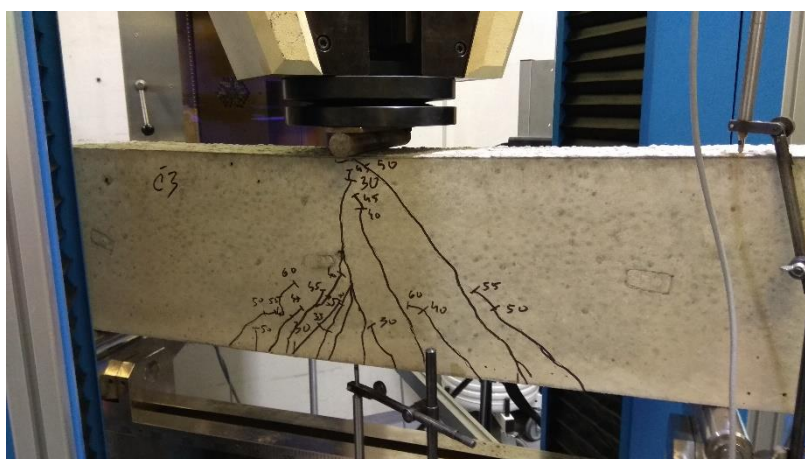
Obr. 128 Trhliny při zatížení 50 kN



Obr. 104 Trhliny při zatížení 50 kN



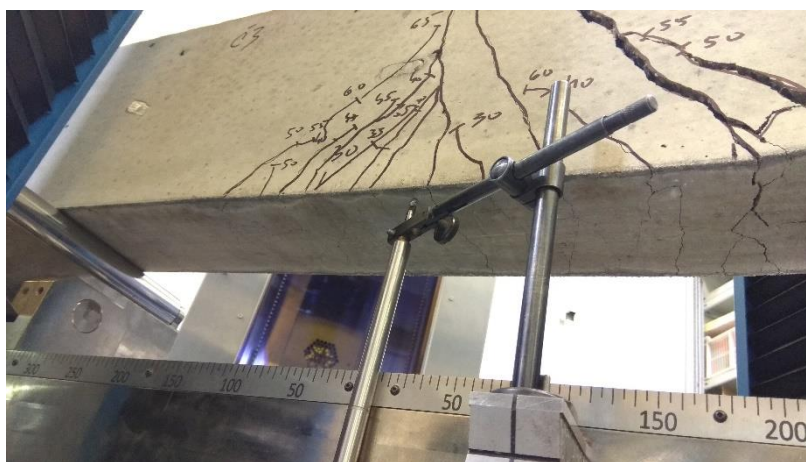
Obr. 103 Trhliny při zatížení 55 kN



Obr. 102 Trhliny při zatížení 60 kN



Obr. 110 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 109 Trhliny po překonání maximálního zatížení



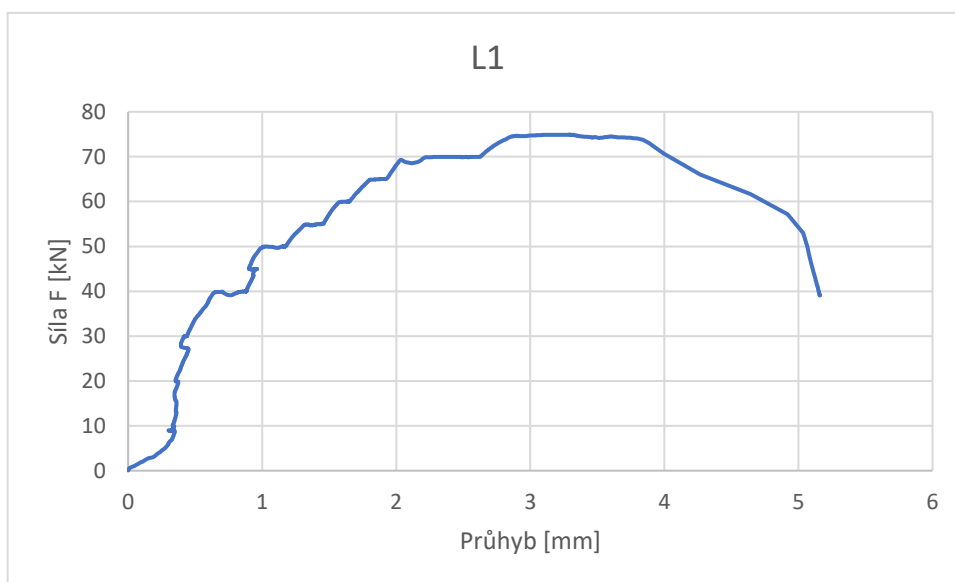
Obr. 108 Trhliny po překonání maximálního zatížení

8.3. Ocelová výtěž s liaporbetonem

8.3.1. Vzorek L1

Vzorek L1	
Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
74,91	3,289

Vzorek L1	
Limitní průhyb $L/250$	Odpovídající síla [kN]
3,5	74,3





Obr. 138 Vzorek L1



Obr. 1119 Trhliny při zatížení 40 kN



Obr. 140 Trhliny při zatížení 45 Kn



Obr. 141 Trhliny při zatížení 50 kN



Obr. 142 Trhliny při zatížení 55 kN



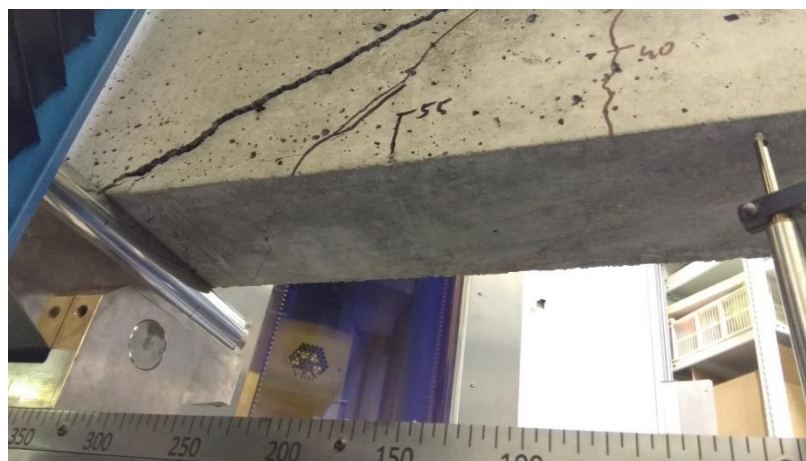
Obr. 143 Trhliny při zatížení 60 kN



Obr. 144 Trhliny při zatížení 70 kN



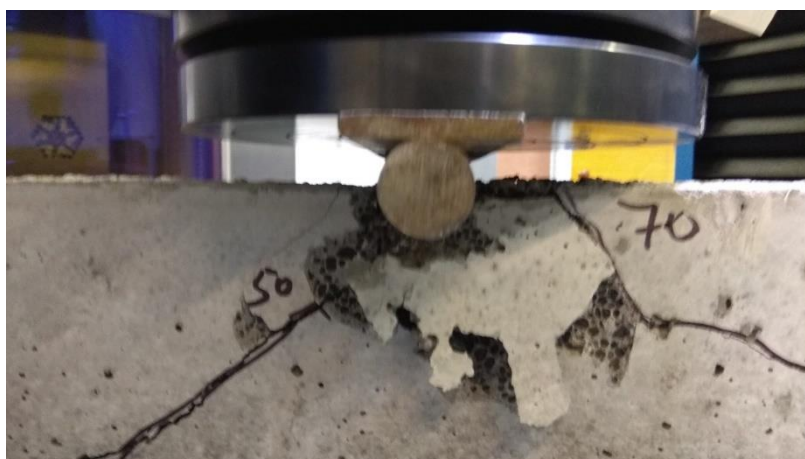
Obr. 145 Selhání konstrukce



Obr. 146 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 112 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 113 Zatlačení zatěžovací hlavy



Obr. 114 Zatlačení zatěžovací hlavy



Obr. 115 Trhliny po překonání maximálního zatížení

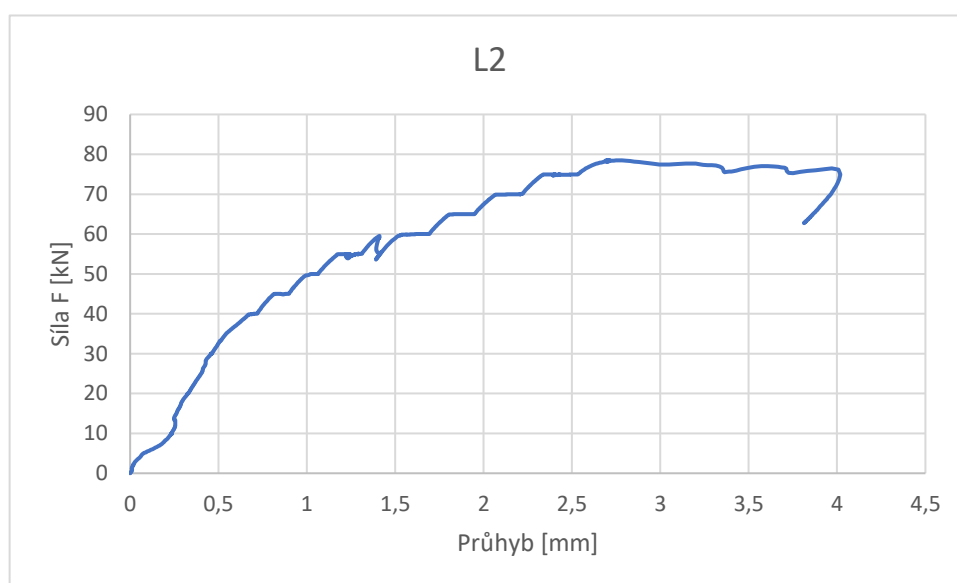


Obr. 116 Výsledek zatlačení zatěžovací hlavy

8.3.2. Vzorek L2

Vzorek L2	
Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
78,56	2,7098

Vzorek L2	
Limitní průhyb $L/250$	Odpovídající síla [kN]
3,5	76,58





Obr. 152 Vzorek L2



Obr. 153 Trhliny při zatížení 45 kN



Obr. 154 Trhliny při zatížení 50 kN



Obr. 117 Trhliny při zatížení 55 kN



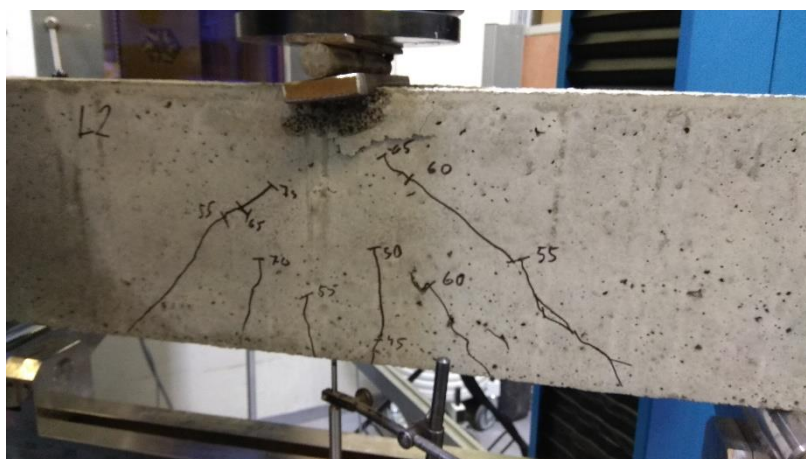
Obr. 118 Trhliny při zatížení 60 kN



Obr. 119 Trhliny při zatížení 65 kN



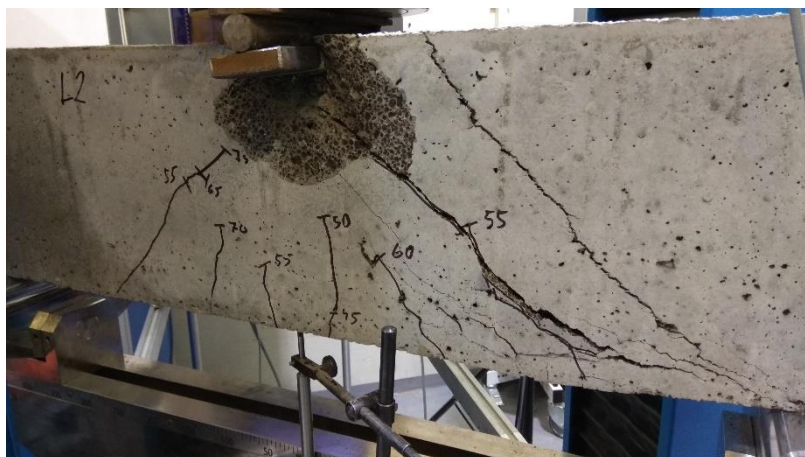
Obr. 122 Trhliny při zatížení 70 kN



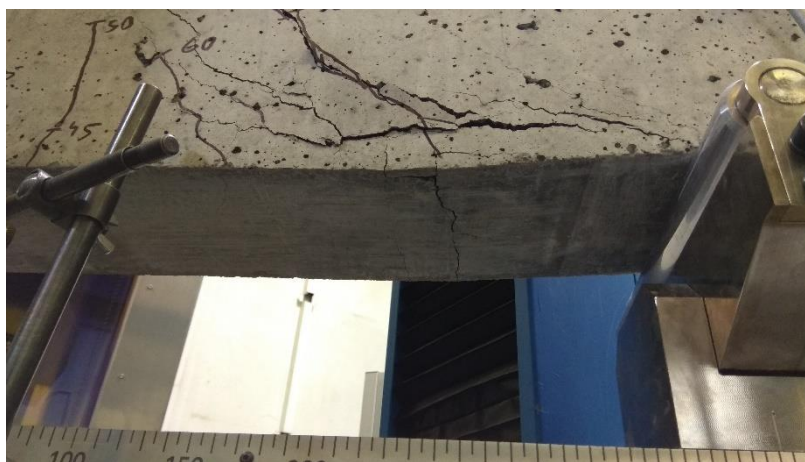
Obr. 121 Selhávání konstrukce



Obr. 120 Selhání konstrukce



Obr. 123 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 124 Trhliny po překonání maximálního zatížení

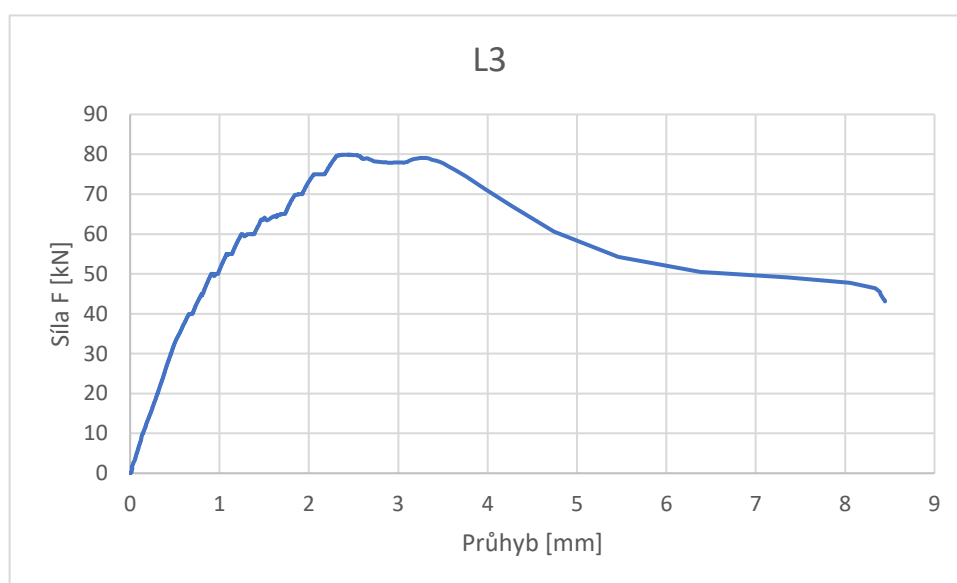


Obr. 125 Trhliny po překonání maximálního zatížení

8.3.3. Vzorek L3

Vzorek L3	
Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
79,92	2,4475

Vzorek L3	
Limitní průhyb $L/250$	Odpovídající síla [kN]
3,5	78,15





Obr. 126 Vzorek L3



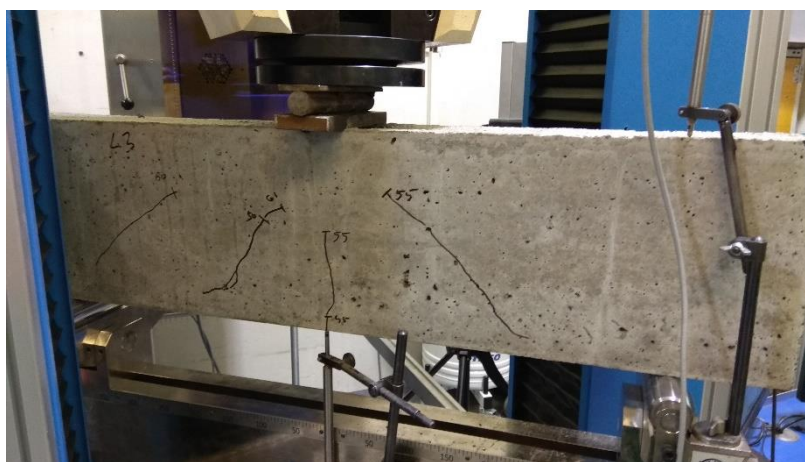
Obr. 127 Trhliny při zatížení 45 kN



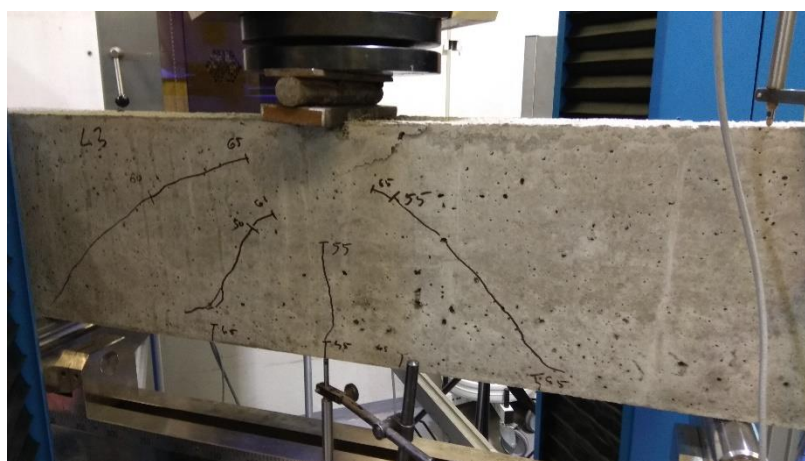
Obr. 128 Trhliny při zatížení 50 kN



Obr. 129 Trhliny při zatížení 55 kN



Obr. 168 Trhliny při zatížení 60 kN



Obr. 169 Trhliny při zatížení 65 kN



Obr. 130 Trhliny při zatížení 65 kN



Obr. 131 Trhliny při zatížení 75 kN



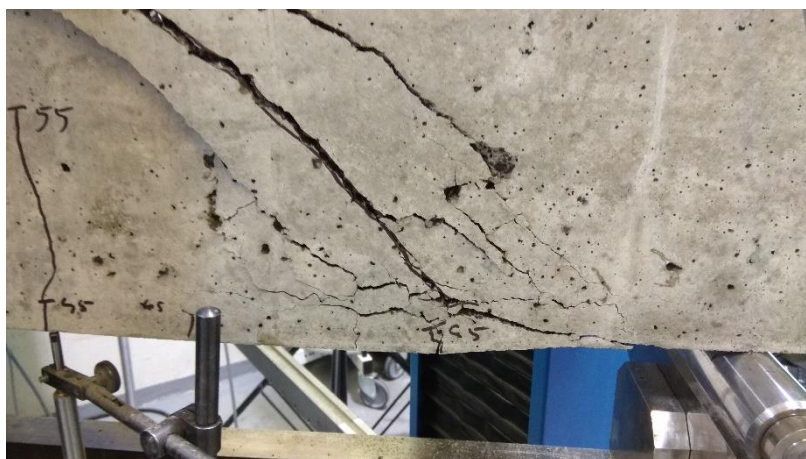
Obr. 132 Selhání konstrukce



Obr. 133 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 134 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 135 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 138 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 137 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 136 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 179 Trhliny po překonání maximálního zatížení



Obr. 180 Skutečné vyztužení Liapor překladu

8.4.Souhrnné výsledky

Souhrn		
Vzorek	Max F [kN]	Odpovídající průhyb [mm]
O1	114,56	4,6203
O2	109,51	4,61
O3	109,62	5,2924
Č1	59,43	7,3603
Č2	49,89	7,158
Č3	69,34	7,975
L1	74,91	3,289
L2	78,56	2,7098
L3	79,92	2,4475

Tabulka 9 Souhrn na maximální sílu

Souhrn		
Vzorek	Limitní průhyb L/250	Odpovídající síla [kN]
O1	3,5	114,22
O2		108,8
O3		109,1
Č1		40,01
Č2		39,95
Č3		47,41
L1		74,3
L2		76,58
L3		78,15

Tabulka 10 Souhrn pro limitní průhyb

Souhrn			
Vzorek	Max F [kN]	Odp. průhyb [mm]	Odp. síla pro lim. průhyb [kN]
O1	114,56	4,6203	114,22
O2	109,51	4,61	108,8
O3	109,62	5,2924	109,1
Č1	59,43	7,3603	40,01
Č2	49,89	7,158	39,95
Č3	69,34	7,975	47,41
L1	74,91	3,289	74,3
L2	78,56	2,7098	76,58
L3	79,92	2,4475	78,15

Tabulka 11 Celkový přehled

8.5. Porovnání statických dat

Označení vzorku	Moment únosnosti [kNm]	Maximální síla F v polovině rozpětí [kN]	Maximální rovnoměrné zatížení [kN/m]
O	9,83	52,43	139,80
Č	10,45	55,73	148,62
L	7,98	42,56	113,49

Tabulka 12 Porovnání statických dat dle vypočtené předpokládané síly F

Označení vzorku	Moment únosnosti [kNm]	Maximální síla F v polovině rozpětí [kN]	Maximální rovnoměrné zatížení [kN/m]
O	20,86	111,23	296,61
Č	11,17	59,55	158,81
L	14,59	77,80	207,46

Tabulka 13 Porovnání statických dat vypočítaných dle průměrné maximální síly F

Označení vzorku	Moment únosnosti [kNm]	Maximální síla F v polovině rozpětí [kN]	Maximální rovnoměrné zatížení [kN/m]
O _{vyp.}	9,83	52,43	139,80
O	20,86	111,23	296,61
Č _{vyp.}	10,45	55,73	148,62
Č	11,17	59,55	158,81
L _{vyp.}	7,98	42,56	113,49
L	14,59	77,80	207,46

Tabulka 12 souhrnná tabulka pro maximální sílu

Označení vzorku	Moment únosnosti [kNm]	Maximální síla F v polovině rozpětí [kN]	Maximální rovnoměrné zatížení [kN/m]
O _{vyp.}	9,83	52,43	139,80
O	20,76	110,71	295,22
Č _{vyp.}	10,45	55,73	148,62
Č	7,96	42,46	113,22
L _{vyp.}	7,98	42,56	113,49
L	14,31	76,34	203,58

Tabulka 15 souhrnná tabulka pro sílu při limitním průhybu

Označení vzorku	Moment únosnosti [kNm]	Maximální síla F v polovině rozpětí [kN]	Maximální rovnoměrné zatížení [kN/m]
O1	21,48	114,56	305,49
O2	20,53	109,51	292,03
O3	20,55	109,62	292,32
Č1	11,14	59,43	158,48
Č2	9,35	49,89	133,04
Č3	13,00	69,34	184,91
L1	14,05	74,91	199,76
L2	14,73	78,56	209,49
L3	14,99	79,92	213,12

Tabulka 16 Statická data jednotlivých vzorků

5. Závěr

V porovnání výztuží, tedy ocelové a kompozitní, vyšla lépe ocelová výztuž. Kompozitní čedičová má sice dle výrobce více jak 2x větší pevnost (1200 MPa), ale v porovnání modulů pružnosti za ocelí velmi zaostává. Modul pružnosti kompozitní výztuže je zhruba 50-55 GPa, kdežto u oceli je standartní modul pružnosti 200 GPa. Tento fakt byl zjevný již při kontaktu s kompozitní výztuží, kdy šly pruty snadno za pomoci lidské síly ohýbat, kdežto s ocelovou výztuží je toto nemyslitelné.

Tento fakt se projevil i při samotných zatěžovacích zkouškách, již při relativně malých silách se začal tvořit velký průhyb, což mělo za následek rychlejší vznik trhlin. Malá ohybová tuhost také zapříčinila nevelké zapojení výztuže do přenosu tahových sil a tím pádem větší zapojení betonu. K selhání konstrukce došlo při zhruba polovičním zatížení oproti konstrukci vyztužené ocelí. Také první trhliny se začaly objevovat brzy a jejich délka sahala téměř přes celou výšku vzorku.

Z důvodu nízkého modulu pružnosti je výpočet nutného vyztužení konstrukce dle zásad železobetonu nemyslitelný. Výpočet bere v úvahu pouze pevnosti materiálu a modul pružnosti opomíjí. Taktéž součinitele byly použity jako u klasické oceli. Jak si můžeme všimnout skutečné zatížení při dodržení limitního průhybu bylo oproti výpočtu zhruba o 20% menší a maximální zatížení 5 % vyšší, kdežto prvky vyztužené ocelovou výztuží, které měly přenést zhruba stejné zatížení, překonaly očekávání téměř dvojnásobně. Pro kvalitnější návrh konstrukcí s kompozitní výztuží by byly za potřebí komplexnější výpočty, třeba použití metody konečných prvků.

Průmyslově vyráběné překlady z Liaporu, které měly sloužit jako předloha pro vyztužení zkušebních těles, se měly lišit pouze ve složení a kvalitě betonu. Avšak po provedení zkoušek byl beton odsekán a zjistilo se, že vyztužení neodpovídá výrobní dokumentaci. Při zatížení se projevila velmi nízká pevnostní třída (LC 8/9) a také fakt, že v polovině rozpětí se nacházely manipulační oka a tudíž byla plocha pod zatížením oslabena. Při zatěžování se do překladu postupně zařezával zatěžovací hlava. Při zkoušení vzorků L2 a L3 byla použita ocelová destička pro roznos zatížení s cílem omezit zapouštění zatěžovací hlavy do překladu. Ani toto opatření však zcela neeliminovalo tento jev. Při měření se toto projevilo pomalejší nárůstem zatížení.

Jedno z kritérií pro porovnávání byla také celková hmotnost překladu. Zde se výrazně projevila liapor jako lehčí materiál pro plnivo do betonu. Průmyslově vyráběné překlady byly až o 27% lehčí než překlady s ocelovou výztuží. Překlady opatřené lehkou kompozitní výztuží snížily hmotnost pouze o 2,5%. Při používání kompozitní čedičové výztuže by vzhledem k její malé tuhosti bylo možné použít větší průměry a tím také zvětšit onu tuhost. Tím však se sníží hmotnostní rozdíl mezi výrobky s ocelí a výrobky z kompozitu a je otázkou, zda by takto "odlehčená" konstrukce byla stále výhodná.

Při zkoumání této problematiky by bylo vhodné také ověřit soudržnost mezi kompozitní čedičovou výztuží a betonem např. trhovými zkouškami.

I přes větší deformace a trhliny jaké jsou možné vidět u vzorků s kompozitní výztuží je možné tyto konstrukce použít, avšak právě pro vznik trhlin se nehodí do nějakých reprezentačních prostor či prostor kde by tyto trhliny kazili pohled na celkovou konstrukci. Použití této výztuže by mohlo být uplatněno, pro svou odolnost a antikorozi vlastnosti, v provozech se zvýšenou agresivitou prostředí a taktéž se zvýšenou provozní vlhkostí, jako jsou například kanalizační šachty.

6. Seznam použité literatury

1. Normy

[1] ČSN EN 13242+A1. *Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

[2] ČSN EN 206 + A1: *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 1*. Praha: ÚNMZ, 2018.

2. Odborná literatura

[3] ADÁMEK, Jiří. *Stavební látky [Modul BI01-M02]*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006.

[4] ADÁMEK, Jiří. *Stavební látky [Modul BI01-M04]*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006.

[5] ADÁMEK, Jiří. *Stavební látky [Modul BI01-M03]*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006.

[6] ANTON, Ondřej. *Stavební látky - cvičebnice*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-828-1.

3. Internetové zdroje

[7] Ebeton.cz [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/kamenivo>

[8] Liapor.cz [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://www.liapor.cz/produkty/kamenivo/pro-stavebni-ucely>

[9] Agloporit.cz [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <http://agloporit.cz/lehke-umele-kamenivo/>

[10] IMaterály [online]. 2009 [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/vyvoj-nekovovych-vyztuzi-do-betonu-1_101464.html

[11] LANÍKOVÁ, Ivana. *Prvky betonových konstrukcí: přednášky. [Modul BL01]*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2017. Dostupné z: https://www.fce.vutbr.cz/BZK/lanikova.i/BL01/BL01_prednaska_2.pdf

7. Seznam příloh

- Příloha P1 – Výrobní dokumentace překladů O1,O2,O3
- Příloha P2 – Výrobní dokumentace překladů Č1,Č2,Č3
- Příloha P2 – Výrobní dokumentace překladů L1,L2,L3