



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY
ŽELEZOBETONOVÝCH PRVKŮ
TITLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK MACEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR ŽÍTT

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Marek Macek
Název	EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY ŽELEZOBETONOVÝCH PRVKŮ
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Petr Žitt
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2017
Datum odevzdání bakalářské práce	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2017

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

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] ČSN 731201-86 Navrhování betonových konstrukcí
- [2] EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí
- [3] EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí
- [4] Schmid, P., kol, Základy zkušebnictví, FAST VUT v Brně, 2000
- [5] Ostatní související ČSN, EN, ISO
- [6] Manuál programu ATENA 2D, ATENA 3D, 1.-4. část, Červenka Consulting

Zásady pro vypracování

Vypracování rešerše dostupných metod pro vnášení smykových účinků do zkušebních prvků v laboratorních podmínkách. Návrh a teoretická analýza prvku, na jejímž základě bude vyroben zkušební prvek, který bude podroben zkoušce na smykové účinky. Součástí laboratorních prací budou doplňkové zkoušky fyzikálně-mechanických parametrů použitých materiálů.

Data z provedeného experimentu budou vyhodnoceny a porovnány s teoretickými výpočty (bude proveden statický výpočet navrženého prvku). Experiment a statický výpočet bude dále porovnán s numerickou analýzou prvku v softwaru Atena2D.

Struktura bakalářské/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).

.....

Ing. Petr Žitt
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Teoretický návrh a výroba zkušebního tělesa. Zatěžovací zkouška 4-bodovým ohybem na smykové účinky. Provedení zkoušek na mechanické vlastnosti použitých materiálů. Numerická analýza zkušebního prvku v softwaru ATENA 2D. Statický výpočet dle normovaných charakteristik hodnot a reálných hodnot z výsledku zkoušek. Vyhodnocení a porovnání výsledku.

Klíčová slova

Beton, betonářská výztuž, smykové porušení, zatěžovací zkoušky, numerická analýza, statický výpočet.

Abstract

Theoretical design and manufacture of the specimen. Load test 4-point bending shear effects. Tests on mechanical properties of the material. Numerical analysis of the test element software ATENA 2D. Static calculation according to standardized characteristics values and fair values of the test results. Evaluation and comparison of results.

Keywords

Concrete, concrete reinforcement, shear violation, load tests, numerical modeling, structural design report

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Poděkování patří především mému vedoucímu práce Ing. Petru Žíttovi za jeho čas, ochotu a trpělivost při vysvětlování během celého zpracování bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Cíle	10
3. Smykové účinky a porušení žb prvku	11
3.1 Smykové účinky v laboratorních podmínkách.....	11
3.1.1 Čtyřbodový ohyb	12
3.1.2 Tříbodový ohyb	13
4. Návrh zkušebního prvků a doprovodných těles	14
4.1 Obecné zásady navrhování čerstvého betonu.....	15
4.1.1 Úvod	15
4.1.2 Legislativní předpisy.....	15
4.1.3 Základní definice	15
4.1.4 Rozdělení betonu	16
4.2 Návrh čerstvého betonu pro výrobu zkušebních těles	17
5. Výroba zkušebních prvků a doprovodných těles.....	18
5.1 Výroba.....	18
5.1.1 Příprava betonáže	18
5.1.2 Betonáž.....	19
5.1.3 Ošetřování betonu.....	20
6. Laboratorní zkoušky doprovodných těles	21
6.1 Laboratorní zkoušky vlastnosti betonu	21
6.1.1 Zkoušky pevnosti betonu v tlaku	21
6.1.2 Vyhodnocení pevnosti betonu v tlaku dle zkoušky v tlaku	21
6.1.3 Statický modul pružnosti betonu v tlaku ČSN ISO 1920-10	22
6.2 Laboratorní zkoušky mechanických vlastnosti oceli.....	25
6.2.1 Pevnost oceli v tahu	25
6.2.2 Stanovení pevnosti oceli v tahu na základě zkoušky	25
7. Laboratorní zkoušení smykových účinků	28
7.1 Příprava zkušebního tělesa	28
7.1.1 Skutečná poloha výztuže	28
7.1.2 Osazení tenzometry	28
7.1.3 Osazení měřících bodů pro Hollanův sázecí deformetr	29
7.1.4 Osazení indukční snímačů dráhy	30
7.1.5 Osazení hydraulického válce.....	30
7.1.6 Průběh zatěžovací zkoušky.....	32

7.2	Výsledky laboratorního zkoušení.....	34
7.2.1	Deformace a rozvoj trhlin pomocí Hollanových můstku	34
7.2.2	Průhyb nosníků	35
7.2.3	Deformace nosníku a rozvoj trhlin pomocí Hollanova sázecího deformometru.....	35
8.	Matematické modelování v programu.....	38
8.1	Matematický model	38
8.1.1	Řešení modelu.....	38
8.1.2	Grafické zobrazení modelu.....	39
9.	Vyhodnocení	41
9.1	Experimentální analýza	41
9.2	Matematické modelování – atena 2d.....	42
9.3	Statický výpočet	43
10.	Porovnání výsledku a závěr	44
11.	seznam příloh	46

1. ÚVOD

Každý konstrukční prvek v reálné konstrukci je vystaven skupinou vnějších zatížení. Každé z jednotlivých zatížení vyvolává v prvku určité napětí, deformace a vnitřní síly. Konstrukční prvky musí být navrženy tak, aby byly schopné odolávat vnějším zatížením a tím splnili mezní stav použitelnosti a mezní stav únosnosti. V případě železobetonových konstrukcí jde o spolupůsobení betonu a ocelové výztuže vůči působícímu zatížení. Beton má dobrou odolnost v tlaku, ovšem nízkou odolnost v tahu. Proto je beton vyztužován ocelovými profily, pro větší použitelnost betonu v konstrukcích. Beton je vyztužován ocelovými profily, kdy každá konkrétní výztuž má svou předem danou funkci při přebírání napětí v oblastech, kde by se beton mohl dostat do tahu.

Tato bakalářská práce je zaměřená na experimentální a numerickou analýzu železobetonového prvku, který je speciálně vyroben dle teoretického návrhu pro vznik smykových trhlin. Předmětem zkoumání jsou tedy smykové porušení na železobetonovém prvku, které jsou vyvolány působícím zatížením. Porovnání výsledku reálných zkoušek prvků a výpočtem programu na principu metody konečných prvků a jejich následná analýza.

Všechny zkušební vzorky budou vyrobeny ze stejné betonové záměsy, aby se docílilo požadovaných kvalit a stejnorodost odzkoušených vlastností použitých materiálů a tím i přesnému experimentálnímu odzkoušení vzorků. Vzorek betonářské výztuže bude odzkoušen na pevnost v tahu.

Pro matematické modelování bude použit program ATENA 2D, který daný železobetonový prvek bude řešit na principu metody konečných prvků. Výsledky z programu Atena 2D budou následně porovnány s výsledky experimentu.

Bakalářská práce byla zpracována v laboratořích a zázemí Ústavu stavebního zkušebnictví pod vedením vedoucího bakalářské práce.

2. CÍLE

Cílem bakalářské práce je seznámit se s rozdíly teoretického návrhu železobetonového prvku s normovými součiniteli a jeho reálným chováním. Rozdílem mezi výpočtem dle metody konečných prvků a jeho reálným chováním. Veškeré hodnoty budou následně porovnány. Cílem práce je dále:

- Zjištění mechanických a fyzikálních vlastností betonu
- Zjištění mechanických a fyzikálních vlastností oceli
- Laboratorní analýza železobetonového prvku navrženého na smykové porušení
- Analýza zkušební vzorku v programu ATENA 2D, který pracuje na principu metody konečných prvků
- Porovnání výsledku laboratorních a výpočtových hodnot na daném zkušebním prvku a jejich vyhodnocení

3. SMYKOVÉ ÚČINKY A PORUŠENÍ ŽB PRVKU

Smykové porušení prvku v konstrukci je závislé na vyztužení prvku na smykové účinky. Smykové porušení prvku je především závislé na průběhu a velikost posouvajících sil v prvku.

Smykové porušení ŽB prvku se smykovou výztuží nastává z různých příčin:

- Porušení smykem za ohybu při dosažení meze kluzu ve smykové výztuže a následné drcení betonu v tlačené oblasti svislého řezu výš, než ohýbá, a rozděluje tak tuto oblast na dvě části
- Porušení tlačeného segmentu mezi smykovými trhlinami
- Porušení soudržnosti podélné výztuže s betonem při nerespektování vzrůstu její tahové síly vlivem smykových trhlin

Důležité je pochopení chování prvku při namáhání posouvajících sil, a že je závislé na ohybových momentech a vždy rozlišujeme situaci před a po vzniku trhlin, tedy doby, kdy je beton schopen přenášet velikost zatížení. Velký význam má i únosnost beton v tlaku.

Všeobecně smykové trhliny vznikají v místech, kde je velký rozdíl mezi velikosti podporové síly a zatěžovací síly (např. napojení příčle a sloupu). V těchto místech dochází ke značnému smykovému namáhání. Mohou vznikat trhliny a trvalé deformace.

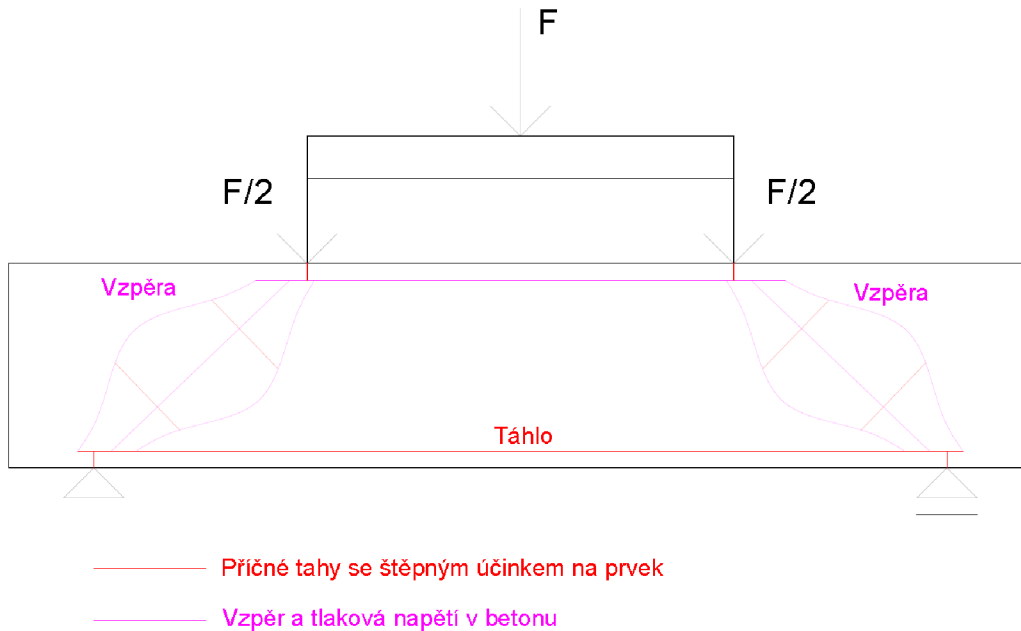
3.1 SMYKOVÉ ÚČINKY V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH

Pro laboratorní podmínky je třeba si uvědomit, že smykové porušení vzniká v místech rozdílu posouvající sil či jejich významných velikosti. Zatěžování prvku je tedy uzpůsobeno tak, aby nedocházelo k výraznému nárůstu ohybového momentu v polovině nosníku a nevznikali tak primárně ohybové trhliny. Důležitý je také směr smykových trhlin, které vždy spojují oblasti, mezi kterými dochází k rozdílu posouvajících sil. Když vezme v potaz předchozí hypotézy, pro účely zkoušek je nejlepší volba čtyřbodový ohyb, či třibodový ohyb v místech zvýšených změn posouvajících sil.

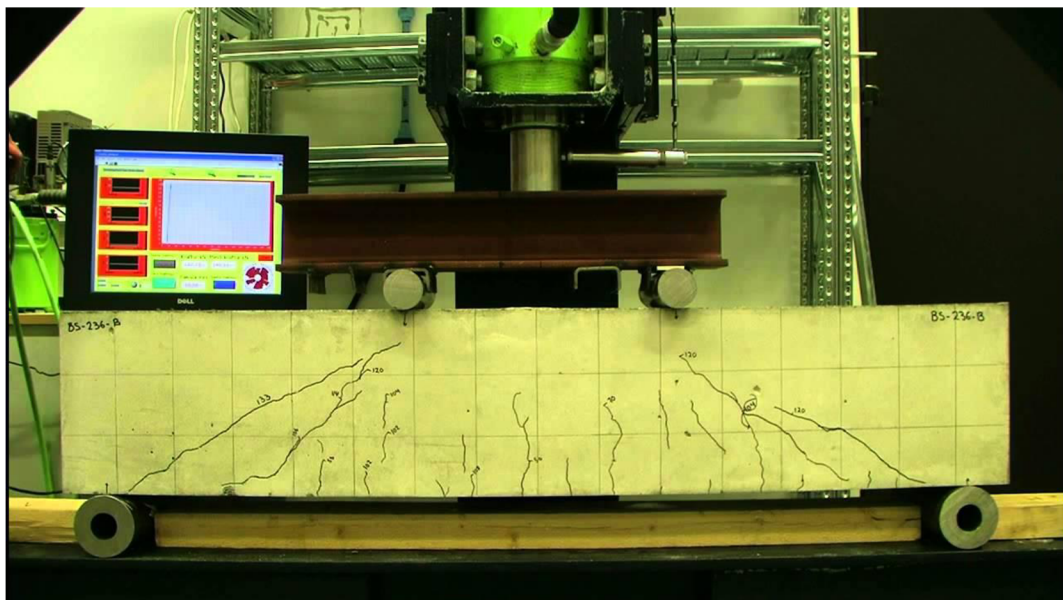
V laboratorních podmínkách se na tělese měří velké množství změn chování a deformací prvku vlivem působení zatížení.

3.1.1 Čtyřbodový ohyb

Při zkoušce na čtyřbodový ohyb je v oblasti mezi podporou a působící silou konstantní posouvající síla. Ohybový moment narůstá po působiště síly a v oblasti mezi působišti sil, je moment konstantní resp. pouze od vlastní tíhy prvku. Smykové trhliny vznikají v místech příčných tahu se štěpnými účinky na beton.



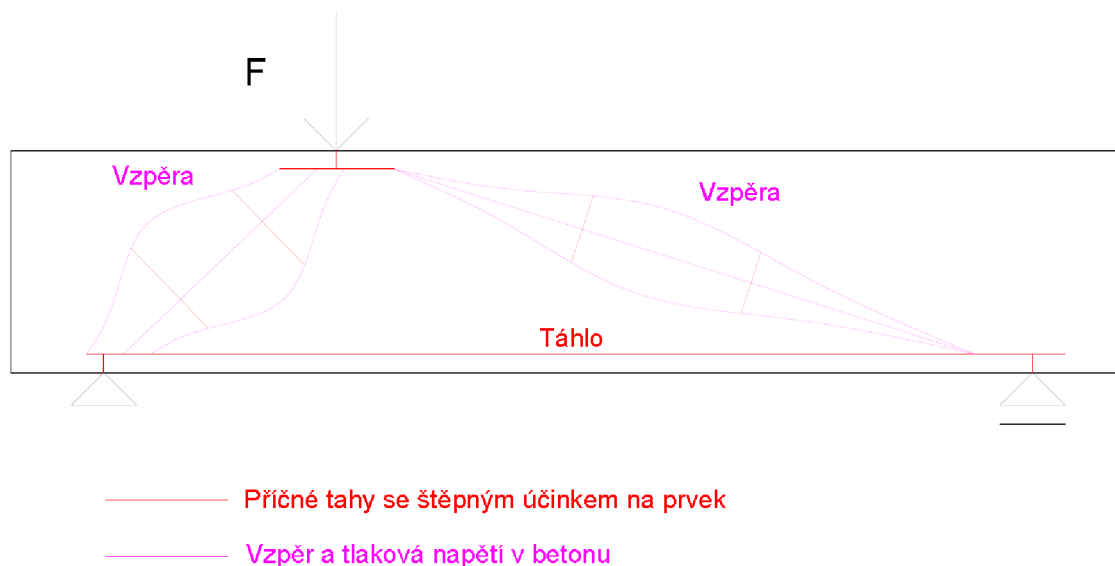
Obr. 1.1. Čtyřbodový ohyb a účinky na prvek



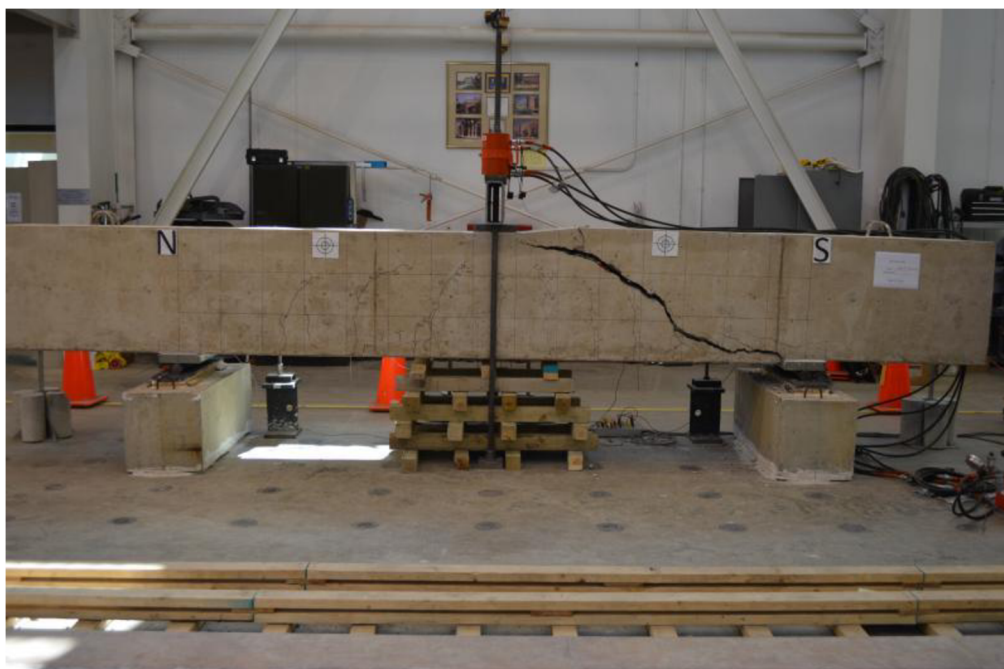
Obr. 1.2. Čtyřbodový ohyb v laboratoři

3.1.2 Třibodový ohyb

Nejčastěji prováděná zkouška je na principu třibodového ohybu. Působí síla je umístěna blíž k jedné z podpor. Primární příčné tahy se štěpnými účinky vznikají mezi podporou a působící síly. Smykové trhliny vzniknou v místě větších napětí, tedy mezi podporou a působícím síly.



Obr. 1.3. Třibodový ohyb a jeho účinky na prvek



Obr. 1.4. Třibodový ohyb v laboratoři

4. NÁVRH ZKUŠEBNÍHO PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

Návrh geometrie základního zkušebního prvku byl zvolen tak, aby došlo k primárnímu porušení na smyk v námi požadované oblasti. Zkušební tělesa sloužící pro stanovení základních charakteristik, byly zvoleny na základě požadavku norem, byly tedy použity formy, které odpovídají normě. Rozměr zkušebního tělesa pro zkoušku smykem byly 120 x 240 x 1200 mm s objemem 34,56 dm³. Pro stanovení charakteristik materiálu budou vyrobena 3 tělesa pro zkoušku v tlaku, které budou zhotoveny v nádobách normových rozměru 150 x 150 x 150 mm. Pro zkoušku modulu pružnosti betonu byly vyrobeny 3 zkušební tělesa o rozměrech 100 x 100 x 400 mm.

Tab 1.1. Zkušební prvky a jejich objem

Rozměr zkušebního prvku [mm]	Objem V [m ³]	Počet těles [ks]	Objem V [m ³]
120 x 240 x 1200	0,03456	1	0,03456
Celkový objem zkušebních těles V_{celkem} [m ³]			0,03456

Při betonáži zkušebního prvku na smyk budou vybetonovány ze stejné záměsi i zkušební tělesa pro zjištění reálných materiálových mechanických charakteristik.

Tab 1.2. Doprovodná tělesa a jejich objemy

Rozměr zkušebního prvku [mm]	Objem V [m ³]	Počet těles [ks]	Objem V [m ³]
Krychle 150 x 150 x 150	0,00338	3	0,01013
Kvádr 100 x 100 x 400	0,00400	5	0,0200
Celkový objem zkušebních těles V_{celkem} [m ³]			0,03013

Výroba armokoše pro zkušební těleso bude probíhat dle návrhu výztuže. Podklady pro navrhování vychází ze zásad z normy ČSN EN 1992-1-1. Celkový návrh bude upraven tak, aby došlo k požadovanému porušení zkušebního tělesa na smykové porušení. Dojde tedy k vynechání smykové výztuže z výpočtu, bude i porušená konstrukční zásada pro smykovou výztuž.

Navržené vyztužení zkušebního prvku bude provedeno z Ø 10 pro spodní taženou výztuž v počtu 4 prutů a z Ø 6 pro horní konstrukční výztuž v počtu 2 prutů a smykovou výztuž v počtu 15 kusů.

4.1 OBECNÉ ZÁSADY NAVRHOVÁNÍ ČERSTVÉHO BETONU

4.1.1 Úvod

Beton je stavivo ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, které vznikne ztvrdnutím cementové kaše (cementu a vody). Kromě těchto základních složek může obsahovat přísady nebo příměsi. Jestliže je maximální velikost zrna kameniva 4 mm nebo menší, používá se pro směs termín cementová malta.

4.1.2 Legislativní předpisy

Základním legislativním předpisem pro návrh, výrobu a mezní hodnoty složení betonu je norma ČSN EN 206. Tato norma je zaměřená výhradně na beton a jeho vstupní suroviny.

Hlavní důraz normy byl položen na kvalitu betonu a jeho trvanlivost, tedy ne pouze na pevnost. Znamená to, že rozhodujícím kritériem pro volbu minimální požadované pevnostní třídy betonu bylo ve většině případů prostředí, ve kterém byl beton umístěn.

4.1.3 Základní definice

Čerstvý beton

Čerstvý beton je beton v plastickém nebo tekutém stavu, tento beton se dá převážet, ukládat do bednění, podle druhu i čerpat. Je schopen zhutnění normálním zvoleným způsobem. Čerstvý beton klasifikujeme do tříd podle konzistence.

Ztvrdlý beton

Ztvrdlý beton je beton, který vlivem chemické reakce mezi vodou a cementem (hydratace) postupně ztuhnul a ztvrdnul a má určitou pevnost (možnost manipulace).

Základní složky betonu

- **Cement** - Je hydraulické pojivo. Jedná se o jemně mletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která v důsledku chemické hydraulické reakce tuhne a tvrdne. Po předchozím zatuhnutí na vzduchu dále tuhne a tvrdne i pod vodou, při zachování pevnosti a stability.
- **Kamenivo** – Zrnitý anorganický materiál, vhodný do betonu. Kamenivo může být přírodní, umělé či recyklované z materiálů, který byl dříve použit v konstrukci. Kamenivo zaujímá 75 – 80 % objemu betonu a jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné kostry v betonu s minimální mezerovitostí. Pokud je v betonu použito recyklované kamenivo je třeba zohlednit jeho nasákavost a nevhodnost pro některé druhy betonů uvedené v normě ČSN EN 206.
- **Voda** – Technologicky vodu rozdělujeme na záměsovou (dávkovanou při míšení čerstvého betonu) a na ošetřovací (voda dodávána betonu po zatuhnutí po několik dní pro udržení betonu ve vlhkém stavu).
- **Přísady** – Materiál, který upravuje vlastnosti čerstvého betonu nebo ztvrdlého betonu, přidávány během míchání betonu v malém množství. Chemické látky, které jsou aplikovány v % hmotnosti betonu.
- **Příměsi** – Práškový materiál, který se přidává do betonu za účelem zlepšení určitých vlastností nebo k docílení speciálních vlastností.

4.1.4 Rozdělení betonu

Rozdělení betonu podle pevnosti se provádí do pevnostních tříd podle charakteristické pevnosti v tlaku ($f_{ck,cyl}$) uvedeném v Mpa a zjištěným na válci o rozměrech 150 x 300 mm nebo charakteristické pevnosti v tlaku ($f_{ck,cube}$) uvedeném v Mpa a zjištěným na krychli o rozměrech 150 x 150 x 150 mm. Beton se zkouší po uplynutí 28 dní (doby zrání betonu).

Rozdělení betonu do pevnostních tříd může být provedeno i na základě zjištěného statického modulu pružnosti betonu.

Betony rozdělujeme podle:

- Pevnosti v tlaku
- Způsobu výroby
- Objemové hmotnosti
- Vyztužení
- Konzistence čerstvého betonu
- Použité frakce kameniva
- Účelu použití
- Konečného vzhledu
- Dle speciálních vlastností

4.2 NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU PRO VÝROBU ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Návrh čerstvého betonu se provádí dle normy ČSN EN 206. Pro návrh betonové směsi lze použít mnoho různých výpočtových postupů, které se snaží zohlednit veškeré vlivy působící na beton během jeho životnosti s cílem maximálně zajistit jeho pevnost a spolehlivost při výstavbě i provozu.

Pro náš experiment jsme zvolili pevnostní třídu C20/25 a bylo použito složení betonové směsi s dopočtem hmotností jednotlivých složek pro námi požadovaný objem viz tab. 1.3. Byla vyrobena jedna záměs v objem cca 60 litrů. Použitá frakce při výrobě se skládá z kameniva 0/4, 8/16, 11/22. Dále pak z cementu CEM|42,5R, záměsové vody a plastifikátoru.

Tab 1.3. Složení betonové směsi

Materiál	Hmotnost [kg] na 0,06m ³ záměs	Hmotnost [kg] Přepočet na m ³
Cement CEM II-42,5 R	13,200	220
Kamenivo 0/4	54,030	900,5
Kamenivo 8/16	32,172	536,2
Kamenivo 11/22	25,494	424,9
Záměsová voda	6,560	109,3
Plastifikační přísada	0,069	1,15

Pro zjištění reálných materiálových vlastností byly zhotoveny zkušební tělesa. Reálné materiálové vlastnosti budou použity pro porovnání experimentálních výsledků dle zkoušek v laboratoři, s výpočtem s charakteristickými hodnotami a výpočtem programu ATENA 2D, pracující na principu metody konečných prvků.

Doprovodná tělesa jsou 3 krychle 150 x 150 x 150 mm. A 5 kvádrů 100 x 100 x 400 mm. Doba zrání zkušebních těles byla 28 dní. Po uplynutí této doby budou tělesa odzkoušena v laboratořích za normovaných podmínek a to na stanovení pevnosti v tlaku na krychli, modulu pružnosti a lomové zkoušky na kvádrů. Dále bude v laboratoři odzkoušena i ocel B500 na zkoušku v tahu, pro stanovení reálné meze kluzu a meze pevnosti.

5. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

5.1 VÝROBA

5.1.1 Příprava betonáže

Pro betonáž zkušebního prvku byla použita forma (bednění), která byla vyrobena na ústavu SZK z voděodolné překližky o tloušťce 20 mm. Bednění má variabilní uspořádání vnitřního prostoru. Pro náš účel byl zvolen vnitřní rozměry 120 x 240 x 1200 mm, který odpovídá rozměrům zkušebního tělesa. Bednění bylo opatřeno nátěrem pomoci odbedňovacího oleje pro snadné a rychlé odbednění.

Byl vyroben jeden armokoš pro vyztužení zkušebního vzorku. Výztuž byla vyrobena ručně pomocí svěráku včetně třmínku. Třmínky byly svázané s hlavní výztuží pomocí vázacího drátu po předem vypočtených vzdálenostech dle zásady navrhování výztuže. Krytí výztuže bylo zajištěno pomocí plastových distančnicků.



Obr. 1.5. Bednění s armokošem



Obr. 1.6. Konstrukce betonářské výztuže

5.1.2 Betonáž

Betonová směs byla míchaná v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví. Směs byla mixována v míchacím stroji s nuceným oběhem.

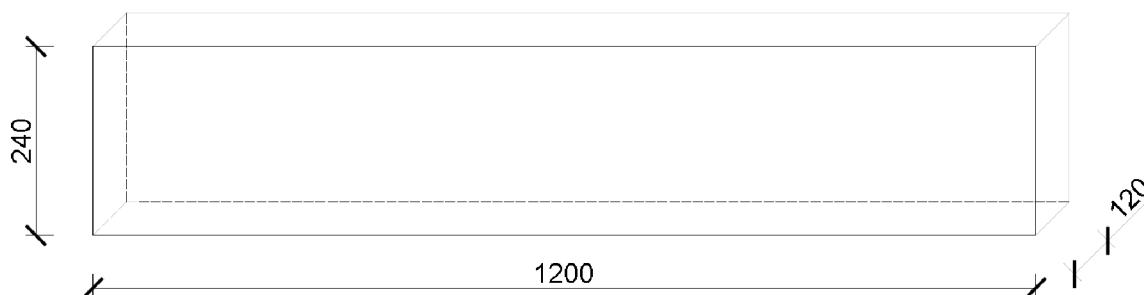


Obr. 1.7. Betonová směs v míchačce před dodáním záměsové vody

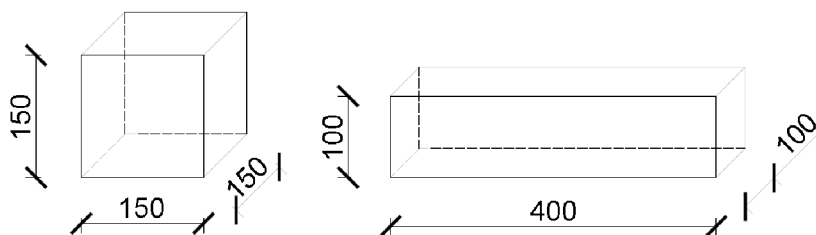
Betonová směs byla vyrobená za asistence vyučujícího. Jednotlivé složky betonové směsi byly předem naváženy na digitální váze na požadovanou hmotnost a vsypány do míchacího stroje. Do míchacího stroje bylo prvně vloženo kamenivo. Poté došlo na přisypání cementu, který byl ručně promíchán s kamenivem.

Před samotným spuštěním míchacího stroje byla do směsi nalita záměsová voda. Během mixovacího procesu se do směsi přiléval plastifikátor. Směs byla řádně promíchána a homogenizována. Po promixování betonové směsi došlo k přepravě na místo plnění do připravených forem.

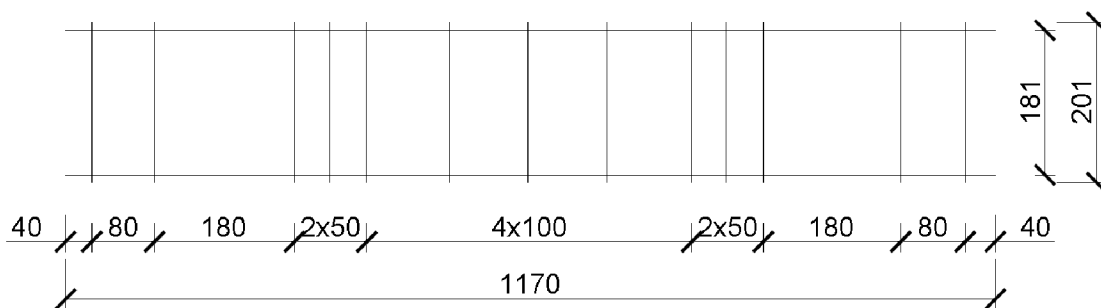
Betonáž zkušebních vzorků a doprovodných těles byla provedena za asistence vyučujícího. Zhutnění směsi zkušebního vzorku bylo provedeno pomocí ponorného vibrátoru (MEGAVIB+) a to ve 3 vrstvách plnění. Vrchní povrch byl poté zarovnan zednickou lžící. Pro zhutnění betonové směsi ve formách doprovodných těles byl použit přenosný vibrační stolek. Plnění doprovodných těles probíhalo ve 2 vrstvách a vrchní část byla zarovnána zednickou lžící. Všechny tělesa byla řádně označena.



Obr. 1.8. Geometrie vyráběného zkušebního prvku



Obr. 1.9. Doprovodné tělesa pro zjištění reálných mechanických vlastností



Obr. 1.10. Konstrukční schéma armokoše

5.1.3 Ošetřování betonu

Zkušební tělesa byla po betonáži uložena na bezpečné místo zázemí ústavu. Po dobu 7 dnů byly vlhčeny ošetřující vodou a přikryty igelitovou fólií proti rychlému vysychání. Po uplynutí 7 dnů byly tělesa odbedněny a uložena ve stálých teplotních podmínkách po dobu 21 dnů. Celková doba zrání zkušebního tělesa a doprovodných těles byla 28 dní.

6. LABORATORNÍ ZKOUŠKY DOPROVODNÝCH TĚLES

6.1 LABORATORNÍ ZKOUŠKY VLASTNOSTI BETONU

6.1.1 Zkoušky pevnosti betonu v tlaku

Zkoušení proběhlo v laboratořích Ústavu stavebního zkušebnictví. Zkušební tělesa byla zkoušena po 28 dnech zrání od zhotovení. Těleso bylo uloženo do lisu tak, aby tlak zkušebního stroje působil kolmo na směr hutnění. Pevnost v tlaku byla zjišťována na 3 krychlích normovaných rozměru 150 x 150 x 150 mm. Byla stanovena celková síla při porušení vzorku. Před samotnou zkouškou byly vzorky přeměřeny. Každá strana byla přeměřena dvakrát na sebe kolmých směrů a z těchto údajů byly stanoveny průměrné rozměry vzorku.

Výpočet a vyjádření výsledků pevnosti betonu v tlaku se vypočítá:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad [\text{Mpa}]$$

kde: F maximální zatížení při porušení [N]

A_c průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení [g]

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa.

Tab 1.4. Průměrné rozměry krychlí

	Ozn.	Hmotnost [g]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Síla [kN]	Napětí f_c [MPa]
Krychle:	1	7557	149,54	149,86	149,82	1016,9	45,2
	2	7567	149,70	149,72	149,76	997	44,3
	3	7476	149,87	150,05	150,21	983,8	43,7
Průměr	-	-	-	-	-	999,3	44,4

6.1.2 Vyhodnocení pevnosti betonu v tlaku dle zkoušky v tlaku

Porušení všech 3 krychelných vzorku proběhlo standardním způsobem. Vyhovují tedy způsobu porušení zkušebních těles dle ČSN EN 12390-3.

Tab 1.5. Vyhodnocení zatřídění betonu

f_{cm} [MPa]	$>f_{ck}+4$	$>f_{ck}-4$
44,4	41	33

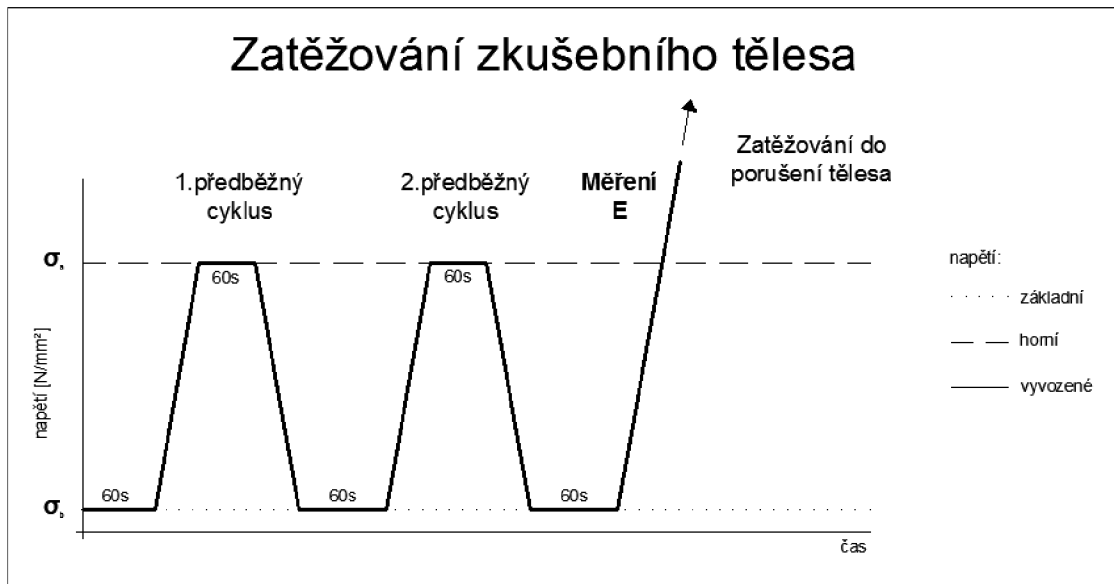
Výsledná betonová směs odpovídá pevnostní třídě C30/37.



Obr. 1.11. Umístění zkušební tělesa do zkušebního lisu

6.1.3 Statický modul pružnosti betonu v tlaku ČSN ISO 1920-10

Statický modul pružnosti betonu byl odzkoušen na 3 zkušebních těles o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Zkouška byla prováděna na zkušebním lisu FORM+TEST. Vzorek betonu jsme při zkoušce zatěžovali v lisu tlakem a měřili jeho deformace. Základní napětí jsme stanovili na 0,5 MPa a horní napětí 11 MPa. Přístroj pro měření změn délky jsme připevnili na každý zkušební vzorek tak, aby vzdálenosti měřených bodů od horního a dolního okraje byly stejné vzdálenosti a byly rovny alespoň ($\frac{1}{4} L$), neboť v tělesa při zatěžovací zkoušce při stejném napětí vznikají rozdílné deformace uprostřed a tlačných oblastí. Měření proběhlo ve 3 cyklech vždy s 60s pauzou mezi jednotlivými cykly.



Obr. 1.12. Grafické znázornění průběhu zatěžování zkušebního tělesa

Zpracování naměřených hodnot, výpočet napětí a poměrných deformací

Délkové změny jednotlivých základů (tenzometry I a II) Δl^I a Δl^{II} jsou dány změnami čtení úchylkoměrů.

$$\Delta l = h_a - h_b$$

kde: h_a je čtení na horním zatěžovacím napětí [mm]

h_b je čtení na základním zatěžovacím napětí [mm]

Průměrná délková změna $\Delta l^{I,II}$ je určena vztahem:

$$\Delta l^{I,II} = \frac{\Delta l^I + \Delta l^{II}}{2}$$

Průměrné poměrné přetvoření $\Delta \varepsilon^{I,II}$ vypočteme ze vztahu:

$$\Delta \varepsilon^{I,II} = \frac{\Delta l^{I,II}}{H}$$

kde: $\Delta l^{I,II}$ je průměrná délková změna

H je délka měřicí základny tenzometru (H = 0,200 m)

Výpočet modulu pružnosti

Modul pružnosti je definován jako poměr změny napětí a k tomu příslušné změny pružného poměrného přetvoření. Změna napětí je rozdíl základního a horního napětí.

Statický modul pružnosti v tlaku E_c vypočítáme ze vztahu:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon^{I,II}} * 1000 \quad [\text{GPa}]$$

kde: $\Delta\sigma$ rozdíl základního a horního napětí [MPa]

$\Delta\varepsilon^{I,II}$ průměrná změna poměrného přetvoření mezi horním a dolním napětím

Výsledek zaokrouhlíme na nejbližších 500 N/mm

Tab 1.6. Vyhodnocení modulu pružnosti betonu

$\Delta l^{I,II}$ [mm]	$\Delta\varepsilon^{I,II}$	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	E_c [N/mm ²]
0,071	0,355	10,5	29500
0,070	0,350	10,5	30000
0,069	0,345	10,5	30000

Vyhodnocení naměřených údajů modulu pružnosti betonu proběhly dle normy ČSN ISO 1920-10. Modul pružnosti je definován jako poměr změny napětí k příslušné změně pružného přetvoření. Pro vyhodnocení byly použity data z posledního cyklu zatěžování. Naměřené hodnoty statického modulu pružnosti odpovídají třídě betonu C20/25 dle Eurocode 2.

6.2 LABORATORNÍ ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTI OCELI

6.2.1 Pevnost oceli v tahu

Tahová zkouška patří mezi zkoušky mechanických vlastností, pomocí kterých jsou určovány základní mechanické charakteristiky používané k hodnocení jakosti materiálu. Zkoušky kovových materiálů tahem se v ČR řídí národní normou ČSN EN 10002. Zkouška spočívá v deformaci tahem obvykle až do jejího porušení. Z dat získaných během zkoušky můžeme vyhotovit 4 základní charakteristiky materiálu. Jedná se o mez kluzu, mez porušení, tažnost a kontrakci. Mez kluzu je stav, kdy se zvětšuje relativní prodloužení, aniž by se zvětšovalo normálové napětí (materiál se prodlužuje bez zvětšování síly – tečení materiálu), mění se fyzikální vlastnosti materiálu. Mez pevnosti je stav, kdy dojde k přetržení vzorku.

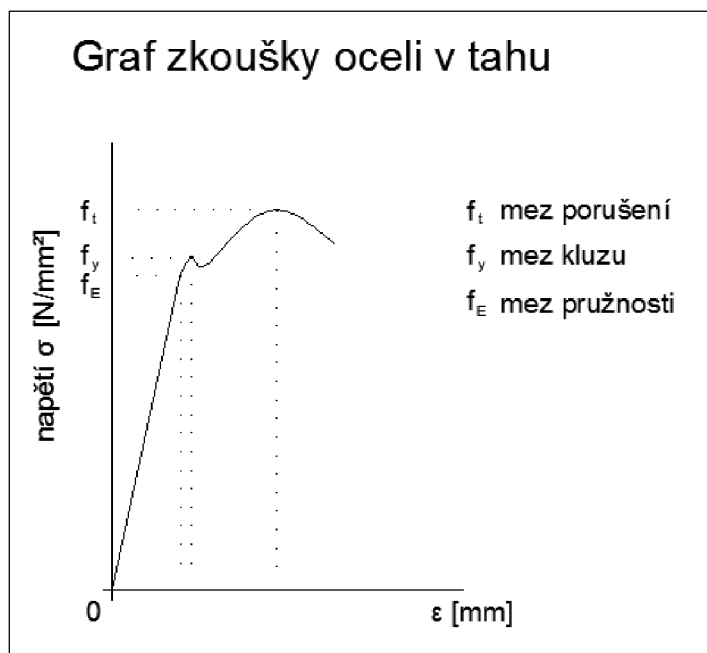
6.2.2 Stanovení pevnosti oceli v tahu na základě zkoušky

Betonářská ocel byla podrobená zkoušce v tahu. Pro zkoušku byly vybrány 3 reprezentativní vzorky z Ø10 a 3 reprezentativní vzorky z Ø6. Při zkoušce byla měřena i poměrná přetvoření výztuže v závislosti na působícím zatížení.

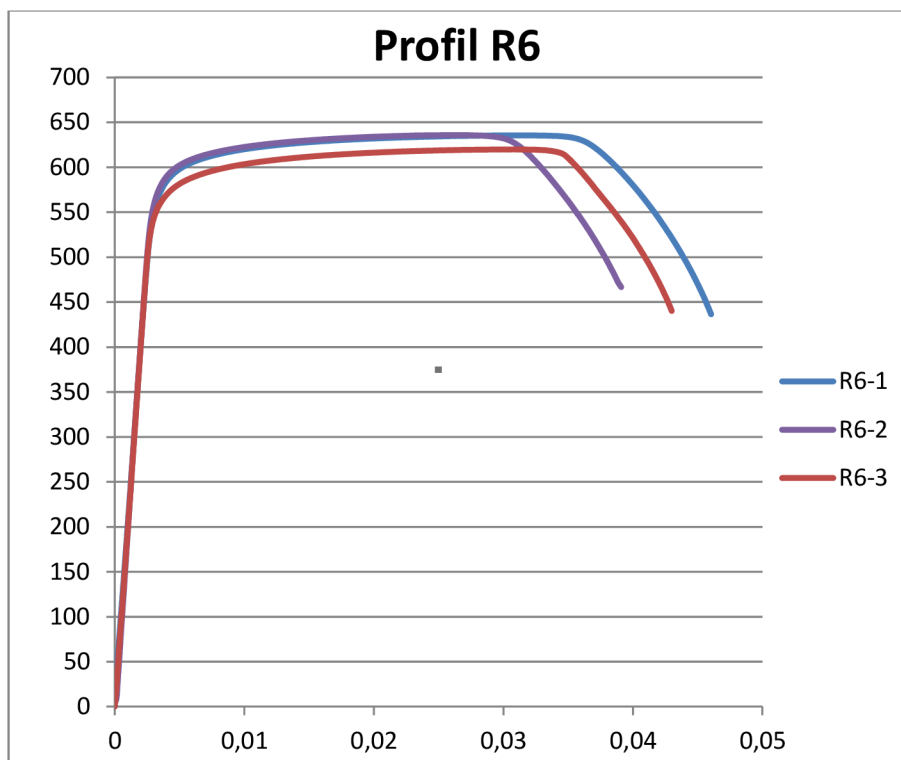
Mez pevnosti oceli v tahu vypočítáme ze vztahu:

$$f_u = \frac{F}{A} \quad [Mpa]$$

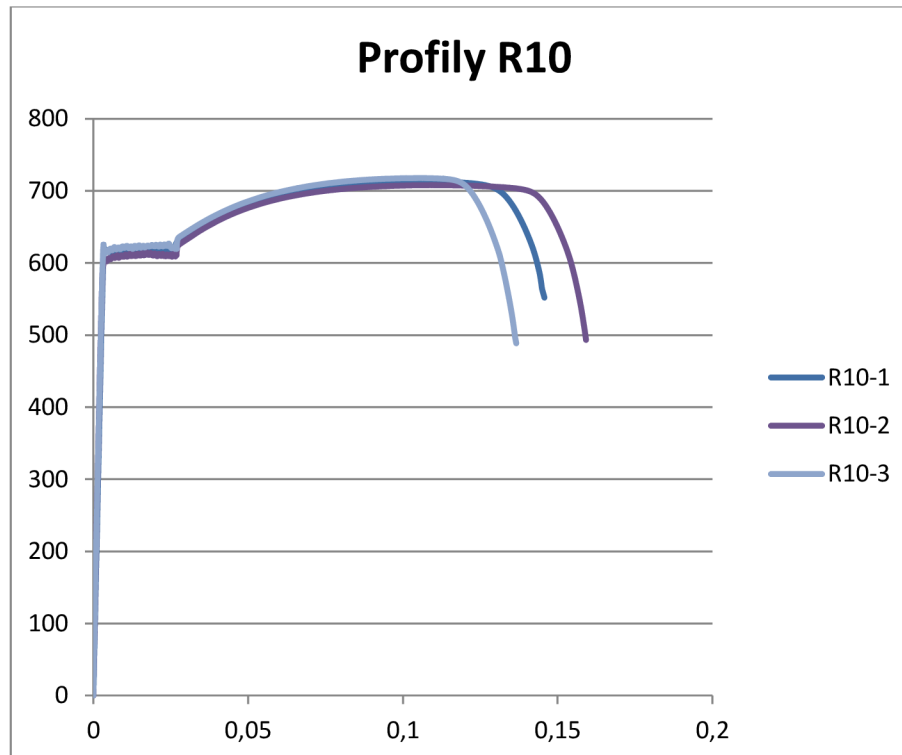
kde: F maximální síla při porušení vzorku [N]
A průřezová plocha profilu [mm²]



graf 1.1. Graf průběhu zkoušky oceli v tahu



graf 1.2. Výsledek zatěžovací zkoušky profilu R6



graf 1.3. Výsledek zatěžující zkoušky profilu R10



Obr. 1.13. Přetržení betonářské výztuže při zkoušce oceli v tahu

Z výsledku zatěžovací zkoušek betonářské oceli byly vyhodnoceny meze kluzu a meze porušení pro každý profil.

Tab 1.7. Naměřené hodnoty meze kluzu a meze pevnosti betonářské oceli

Označení profilu	Ø6-1	Ø6-2	Ø6-2	Ø10-1	Ø10-2	Ø10-3
Mez kluzu $f_{y,i}$ [MPa]	542,2	542,9	533,8	598,6	600,5	596,2
Výsledná mez kluzu f_y [MPa]	535			595		
Mez porušení $f_{u,i}$ [MPa]	635,6	635,8	619,99	712,84	717,85	708,11
Výsledná mez porušení f_u [MPa]	630			710		

Z vyhodnocení zkoušek oceli vyplývá, že u betonářské oceli, že u profilu:

Ø6 je $f_y = 535$ MPa a $f_u = 630$ MPa

Ø10 je $f_y = 595$ MPa a $f_u = 710$ MPa.

7. LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ SMYKOVÝCH ÚČINKŮ

7.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍHO TĚLESA

7.1.1 Skutečná poloha výztuže

Pomocí přístroje pro zjištění polohy výztuže jsme přesně zaměřili polohu hlavních a smykových výztuží ve zkušebním prvku. K určení polohy byl použit přístroj PROCEQ Profoscope+, který je schopen detekovat výztuž v betonu s vizualizací v reálném čase přímo na displeji přístroje. Skutečná poloha výztuže byla vyznačená na zkušební prvek z obou stran. Vzdálenosti byly změřeny ze stejného okraje z obou stran a byla stanovená průměrná poloha výztuže.



Obr. 1.14. Zakreslení polohy výztuže pomocí Profoscopy

7.1.2 Osazení prvku tenzometry

Zkušební prvek byl osazen dvěma Hollanovými můstky o základně 200 mm s kontinuálním snímáním deformací indukčnostními snímači dráhy HBM TT 1 mm na jedné straně v oblasti předpokládaného porušení na smyk pro záznam reálného chování vzorku během zatěžovací zkoušky. Snímače byly zapojeny do sběrné stanice HBM Spider 8 o frekvenci ukládání dat 5 Hz. Stanice byla propojena s notebookem, který pomocí programu vyhodnocoval změny chování v prvku.



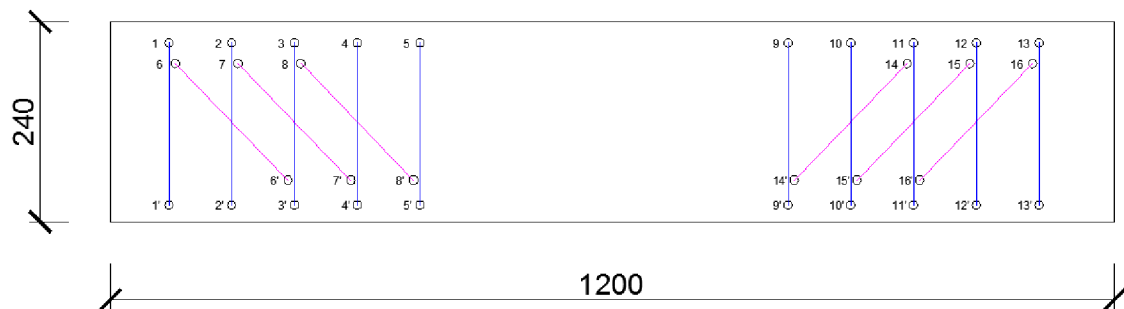
Obr. 1.15. Osazení tenzometru

7.1.3 Osazení měřících bodů pro Hollanův sázezí deformetr

Zkušební prvek byl opatřen celkem 32 měřícími body pro měření Hollanovým sázezím deformetrem v předpokládané oblasti porušení smykem. Pro měření svislých změn délek bylo instalováno 20 měřících bodů vždy naproti sobě a 12 měřících bodů, jejichž spojnice byla kolmo k předpokládanému vytvoření smykové trhliny. Měřící body byly připevněny speciálním lepidle, pro jejich zajištění ve stabilní poloze.



Obr. 1.16. Osazení terčiku pro příložný tenzometr



Obr. 1.17. Schéma osazení terčiku

7.1.4 Osazení indukčních snímačů dráhy

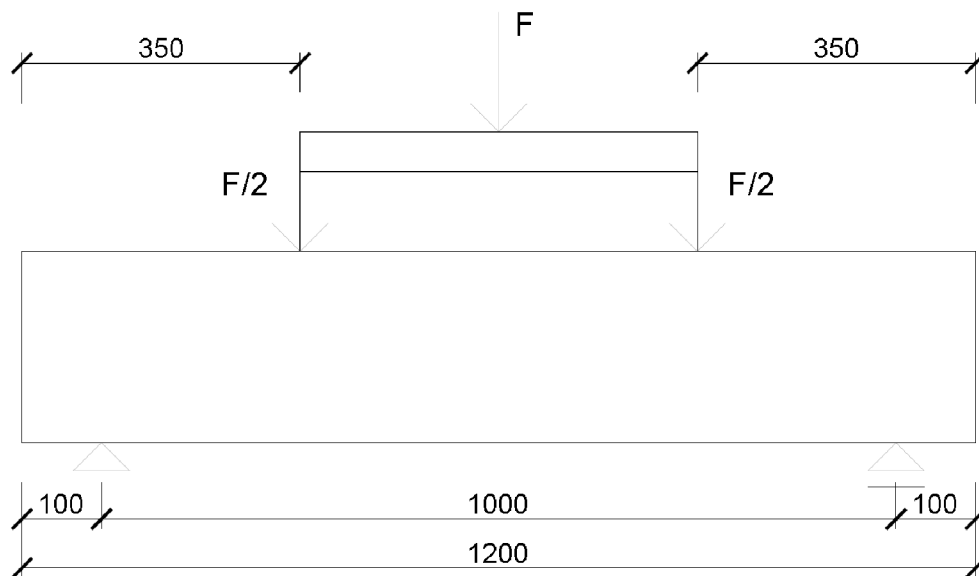
Zkušební prvek byl opatřen indukčními snímači dráhy HBM WA 10 mm pro zjištění poklesu v podporách. Pro zjištění průhybu v polovině zkušebního tělesa, byl prvek opatřen indukčními snímači dráhy HBM WA 50 mm.



Obr. 1.18. Osazení indukčních snímačů nad podporou

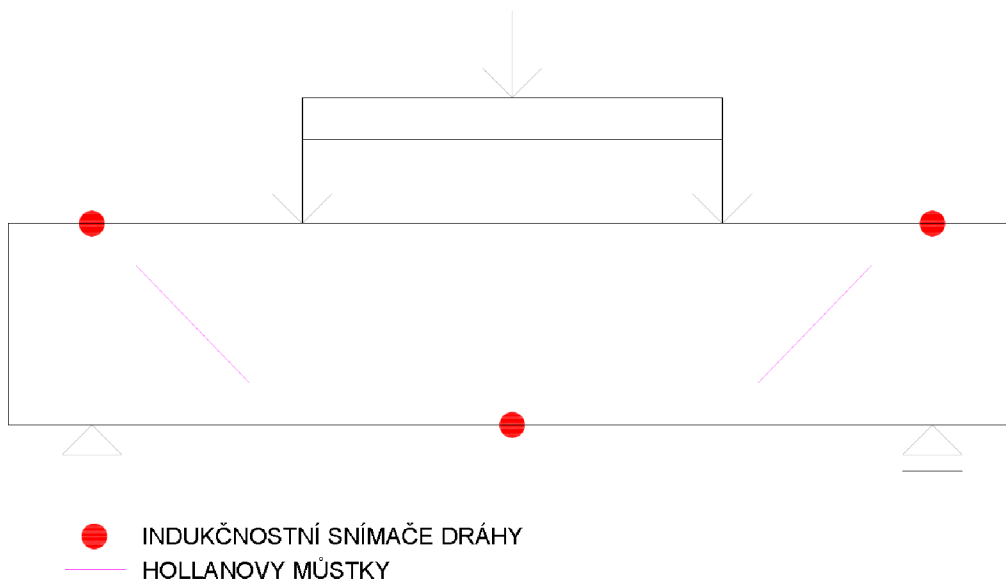
7.1.5 Osazení hydraulického válce

Zatěžovací zkouška bude probíhat na principu čtyřbodového ohybu pomocí hydraulického válce o celkové maximální síle 250 kN. Zatěžování bude probíhat pomocí hydraulické ruční pumpy. Síly od válce bude roznášena pomocí HEB 110.



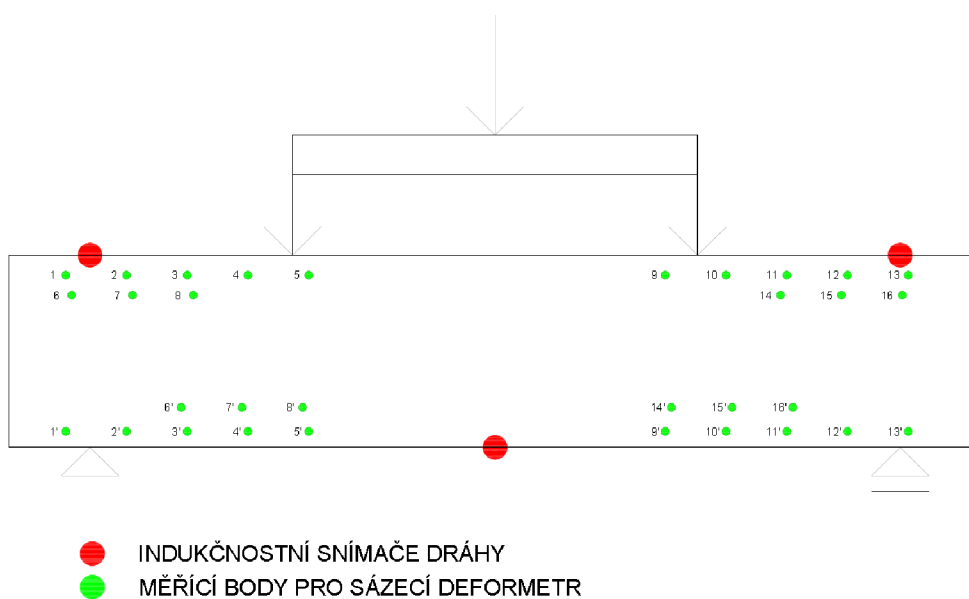
Obr. 1.19. Statické schéma zkušebního tělesa

Osazení čelní strany Hollanovými můstkami o základně 200mm s kontinuálním snímáním deformací indukčnostními snímači dráhy. Hollanové můstky byly připevněny k prvku pomocí dvousložkového lepidla.



Obr. 1.20. Čelní strana - rozmístění měřících bodů

Osazení zadní strany prvku měřícími body o základně 200mm. Mezi jednotlivými kroky zatěžování prvku zatěžovací silou byly měřeny deformace mezi body pomocí Hollanovým sázecím deformetrem. Měřící body byly připevněny k prvku pomocí dvousložkového lepidla.



Obr. 1.21. Zadní strana – rozmístění měřících bodů

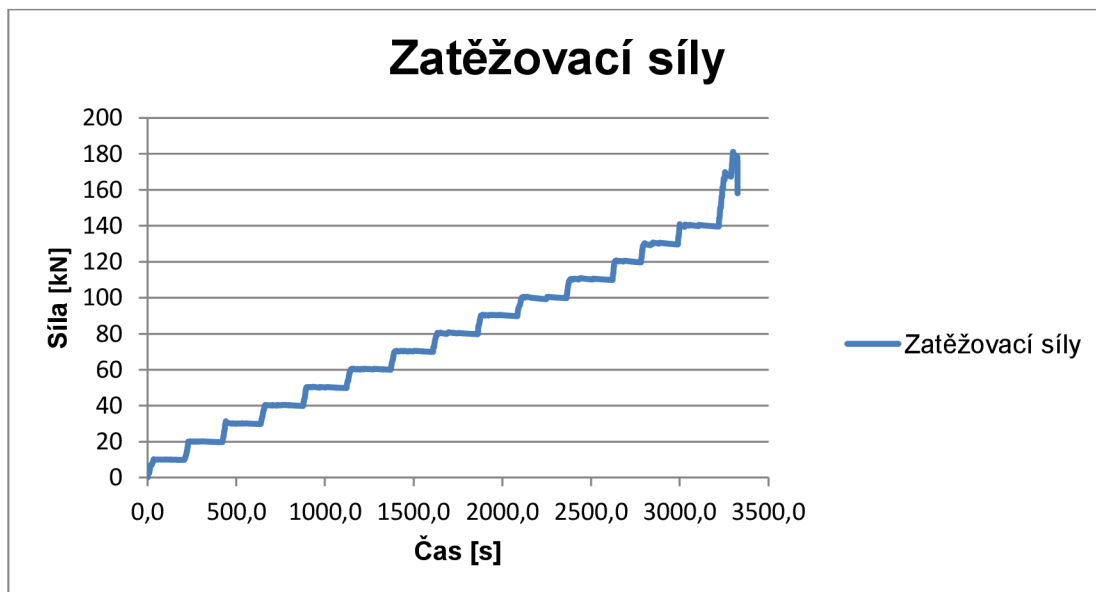
7.1.6 Průběh zatěžovací zkoušky

Zkušební těleso bylo odzkoušeno po uplynutí doby zrání, tedy 28 dní. Zkušební prvek byl postupně zatěžován silou a to v cyklech po 10 kN. Tyto cykly jsou dobře viditelné na grafu 1.3., který popisuje průběh zatěžování v čase. Po každém cyklu proběhlo měření pomocí příložného Hollanovým sázecím deformetrem a měření byly zapsány do tabulky pro konečné vyhodnocení. Data zaznamenávaná pomocí sběrné stanice HBM Spider 8, byla zaznamenávaná v reálném čase. Po každém cyklu byly také sledované vzniky trhlin a jejich případné rozšiřování. Vše bylo diagnostikováno souběžně s výsledky z programu v reálném čase.

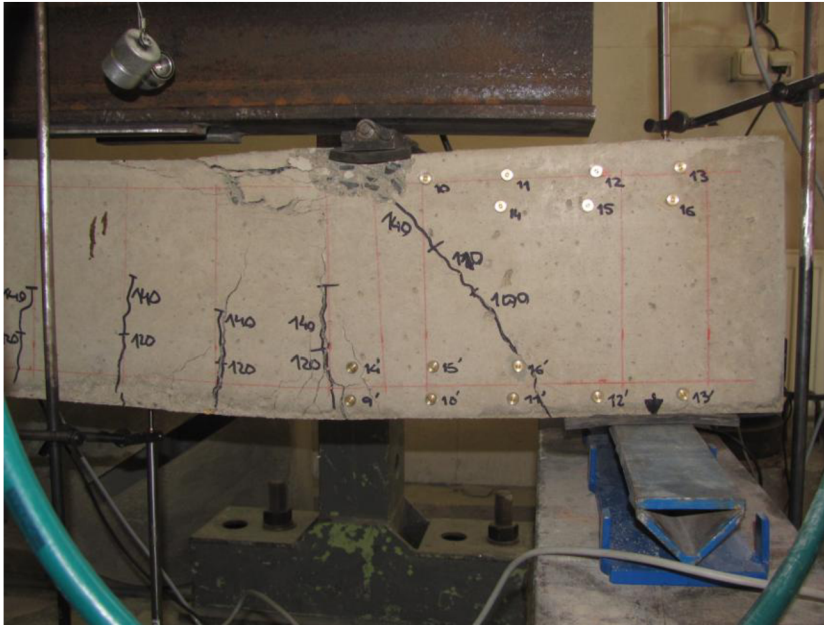
Po každém cyklu zatížení byl vizuálně zkontrolován zkušební prvek, zda vznikají viditelné trhliny. Vznikající trhliny byly označeny, a to jak dráha a poloha vytvoření trhliny, tak konec trhliny byl označen působící silou, která danou trhlinu způsobila.

Zkušební vzorek byl zatěžován silou v intervalech 10 kN a měření hodnot probíhalo až do hodnoty 140kN. Prvek by i dál zatěžován pro zjištění meze únosnosti, měření deformací již neprobíhalo.

Zkušební prvek přenesl sílu na mezi únosnosti 260kN, kdy došlo k porušení vzorku drcením betonu v horních tlačných vláknech a ke vzniku smykových a ohybových trhlin při spodních tažených vláknech.



graf 1.4. Graf zatěžování prvku v závislost na čase



Obr. 1.22. Průběh trhlin při zatěžování na levé zadní straně, kde došlo i k porušení vzorku.

Z předchozího obrázku je dobře patrné vytváření a průběh trhlin od zatěžování až do konečného porušení a vyčerpání pevnosti prvku. Kdy dochází k drcení betonu v horní tlačené oblasti a vytvoření smykových a ohybových trhlin v tažené oblasti.

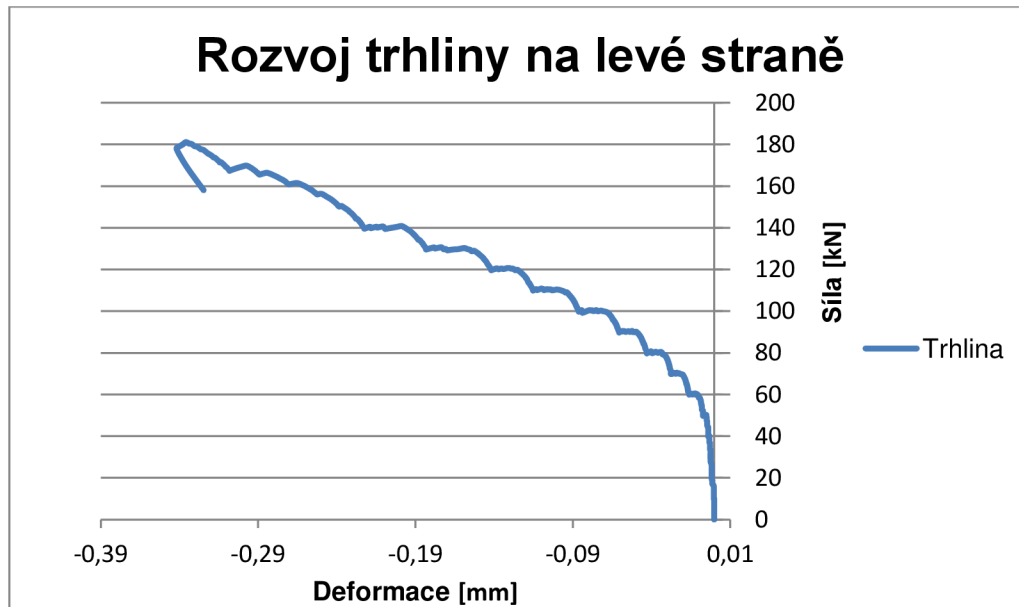


Obr. 1.23. Celkový pohled na vývoj trhlin při zatěžovací zkoušce

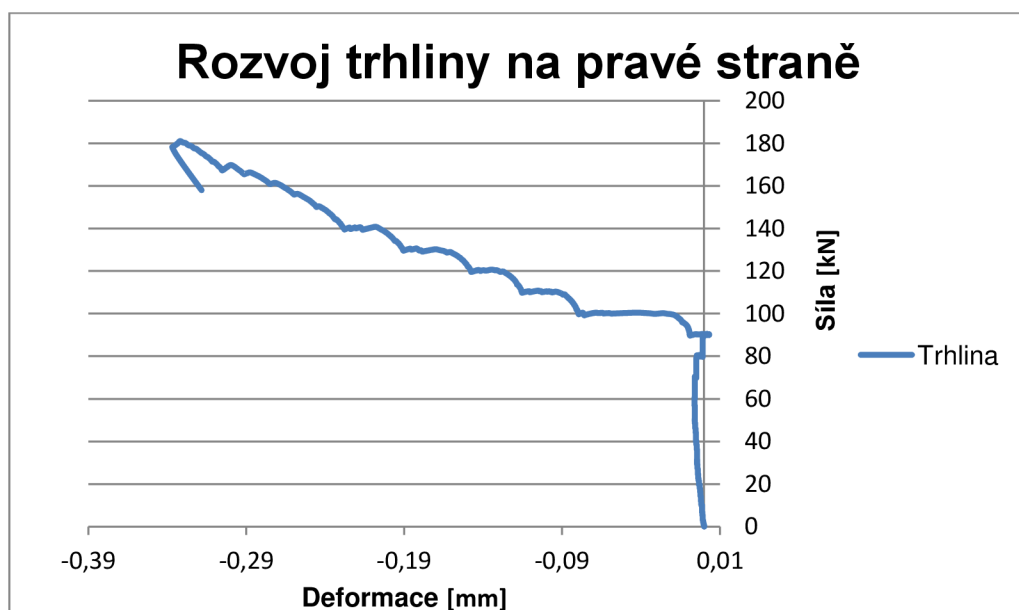
7.2 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO ZKOUŠENÍ

7.2.1 Deformace a rozvoj trhlin pomocí Hollanových můstku

Pomocí Hollanových můstku o základně 200mm s kontinuálním snímáním deformací jsme naměřili velikosti deformací v oblasti předpokládaného smykového napětí prvku. Naměřená data jsme zaznamenali do grafu závislosti rozvoje trhliny na zatěžovací síle.



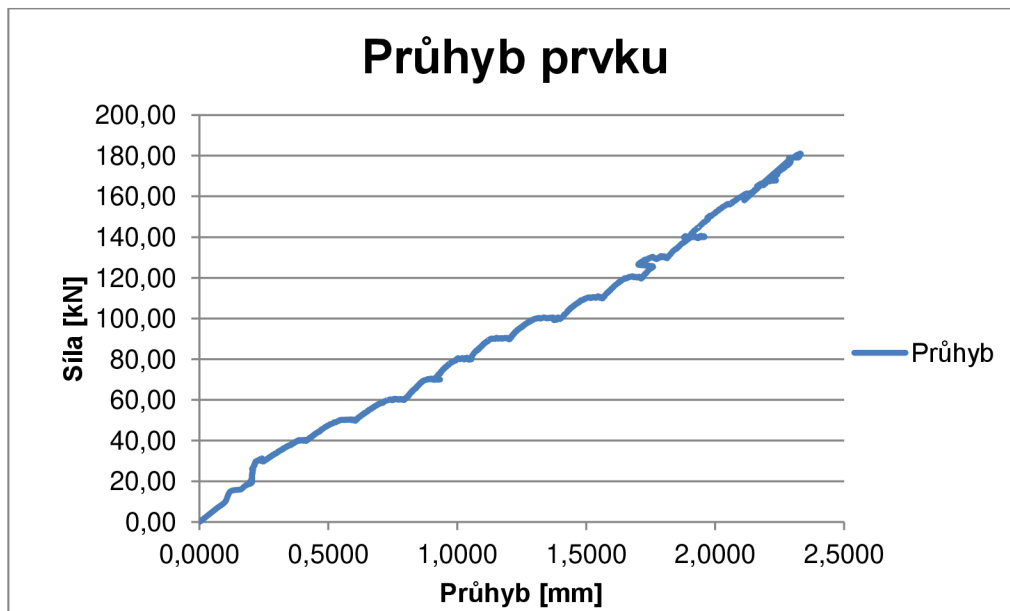
graf 1.5. Závislost deformací v oblasti smykových napětí na zatížení



graf 1.6. Závislost deformací v oblasti smykových napětí na zatížení.

7.2.2 Průhyb nosníků

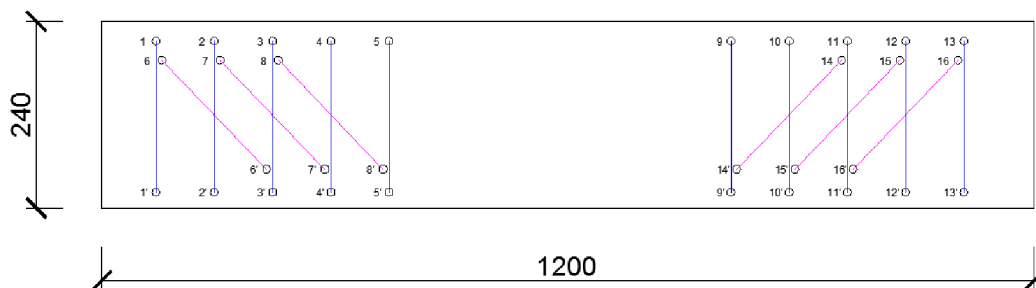
Primárně v experimentu nešlo o vyšetření průhybu, přesto tato hodnota byla měřena pro další použití. Na níže uvedeném grafu je vidět maximální průhyb prvku v závislosti na zatěžovací síle v polovině rozpětí resp. v místě osazení indukčním snímačem dráhy HBM WA 50 mm.



graf 1.7. Závislost průhybu v polovině rozpětí na zatížení.

7.2.3 Deformace nosníku a rozvoj trhlin pomocí Hollanova sázecího deformometru

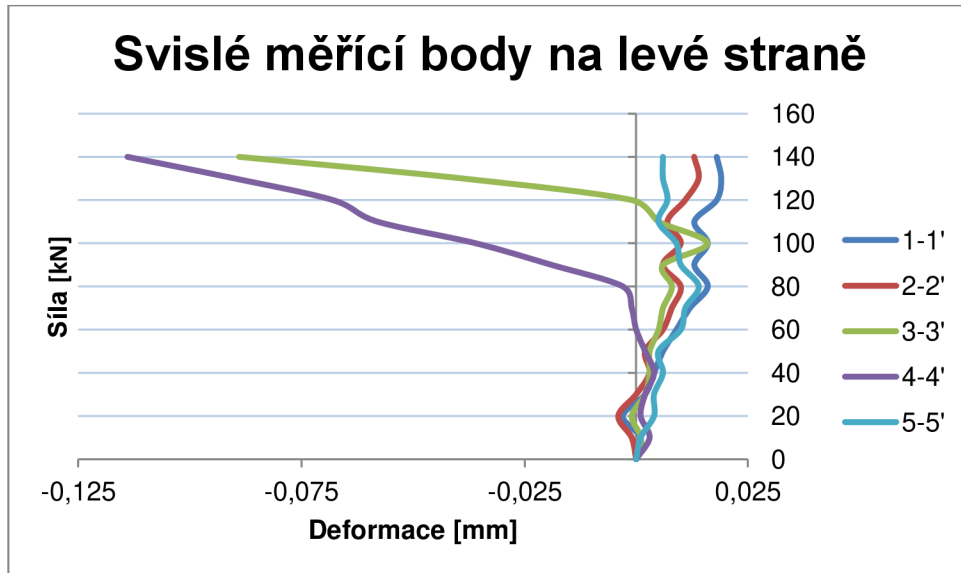
Zatěžování prvku probíhalo v cyklech po 10kN. Po každém cyklu byly měřeny deformace pomocí Hollanova sázecího deformometru mezi příslušnými měřícími body, které byly osazeny před zahájením zkoušky. Data byly zapisovány a poté vyhodnocena do čtyř grafů. Graf 1.7 a 1.8 popisují deformace nosníku nad podporou ve svislých směrech. Graf 1.9 a 1.10 popisuje deformace kolmo na předpokládaný vznik trhlin.



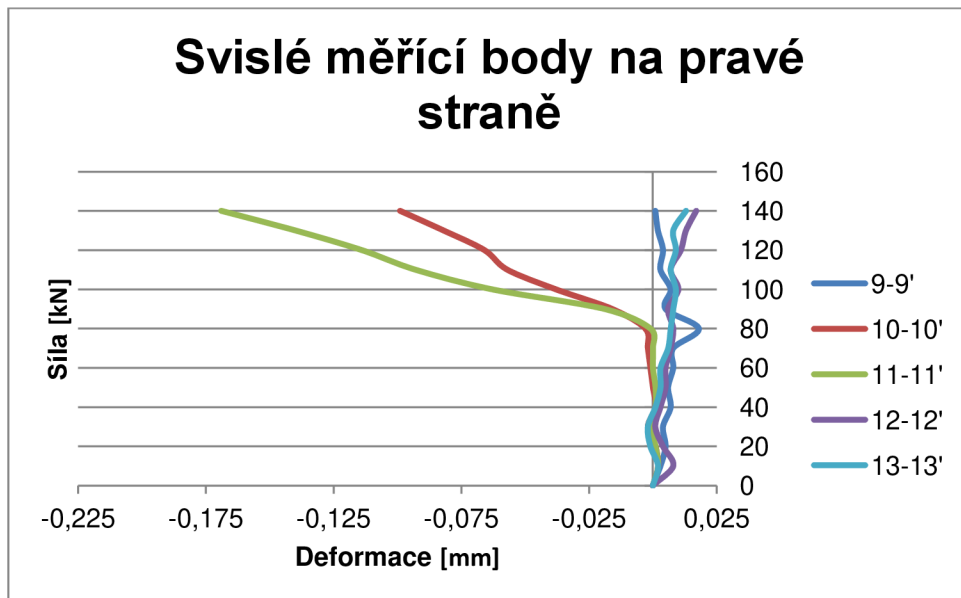
Obr. 1.24. Rozmístění měřících bodů a jejich číslování

Deformace ve svislých měřicích bodech

Z grafu níže je viditelné, že v oblasti nad podporou dochází ke stlačování betonu a vzniká tak tlaková oblast v betonu. Čím dále se pohybujeme od podpory, tak se tlaková oblast mění v tahovou oblast betonu, což je dobře patrné na deformacích mezi 3-3' a 4-4'.



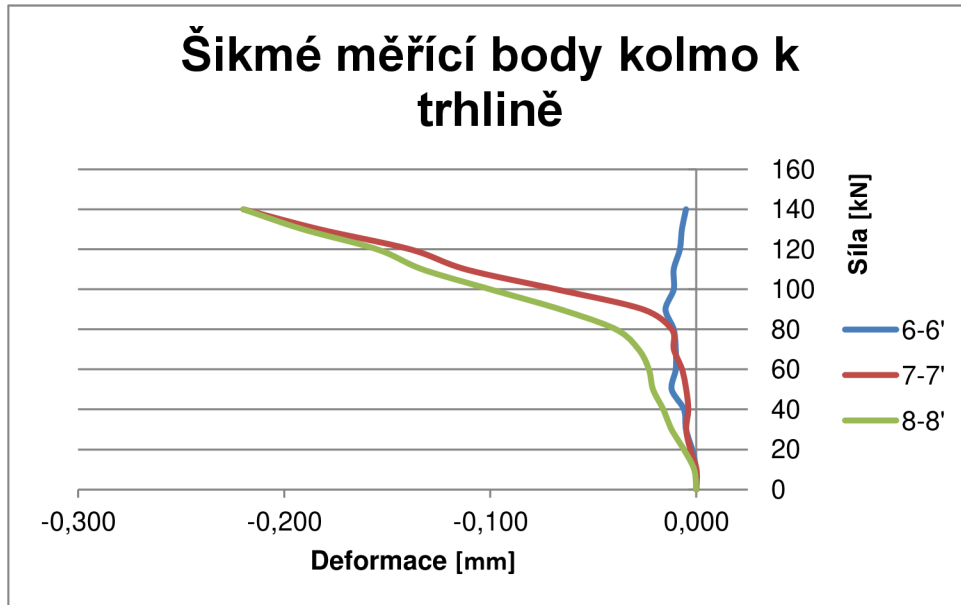
graf 1.8. Svislé měřicí body na levé straně zadní strany prvku



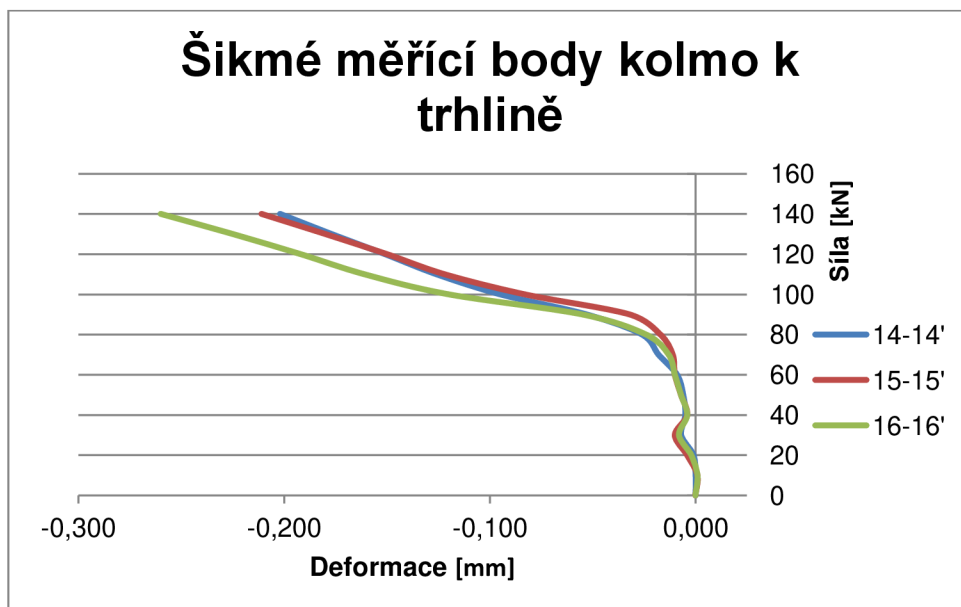
graf 1.9. Svislé měřicí body na pravé straně zadní části prvku

Deformace v šikmých měřících bodech, kolmo na vznik trhlin

Na grafech níže je viditelné vytvoření trhlin a jejich rozvoj v závislosti na působícím zatížení. Vznikají tahová napětí v betonu a po překonání pevnosti betonu v tahu k vytvoření a rozvoji trhlin.



graf 1.10. Měřící body na levé straně kolmo na předpokládaný vznik trhlin



graf 1.11. Měřící body na pravé straně kolmo na předpokládaný vznik
trhliny

8. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ V PROGRAMU

Numerická analýza navrženého zkušební tělesa byla provedena ve výpočetním softwaru ATENA 2D. Počítačový software pro nelineární analýzu betonových a železobetonových konstrukcí. Program ATENA je založen na deformační metodě konečných prvků a jeho hlavní charakteristikou je použití nelineárních modelů materiálu, což umožňuje analyzovat chování stavební konstrukce v kritických podmínkách, kdy dochází k jejímu porušení.

8.1 MATEMATICKÝ MODEL

Model zkušební tělesa byl vytvořen v programu AutoCAD 2014 a transportován do softwaru ATENA 2D.

Numerický postup řešení se sestává ze tří částí:

- Základní definice vztahu mezi napětím a deformací
- Princip metody konečných prvků, diskretizace modelu
- Řešení nelineárního problému pomocí souboru lineárních řešení

8.1.1 Řešení modelu

Model zkušební tělesa byl vyšetřován metodou Newton – Rapshon. Síť konečných prvků byla nastavena jako čtyřúhelníková s délkou strany 0,05m. Byl vymodelován 1 železobetonový prvek.

Tab 1.8. Reálné vlastnosti betonu

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	31000	MPa
Pevnost v tlaku	f_c	44,4	MPa
Pevnost v tahu	f_{ctm}	2,9	MPa
Objemová hmotnost	ρ	$2,3 \cdot 10^{-2}$	MN/m ³

Tab 1.9. Reálné vlastnosti profilu Ø6

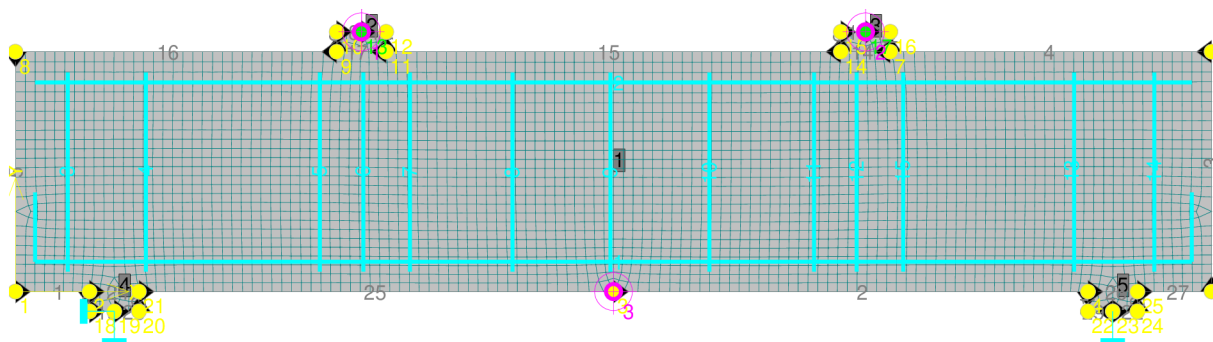
Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	200 000	MPa
Mez kluzu	f_y	530	MPa
Mez porušení	f_u	615	MPa
Objemová hmotnost	ρ	$7,85 \cdot 10^{-2}$	MN/m ³

Tab 1.10. Reálné vlastnosti profilu Ø10

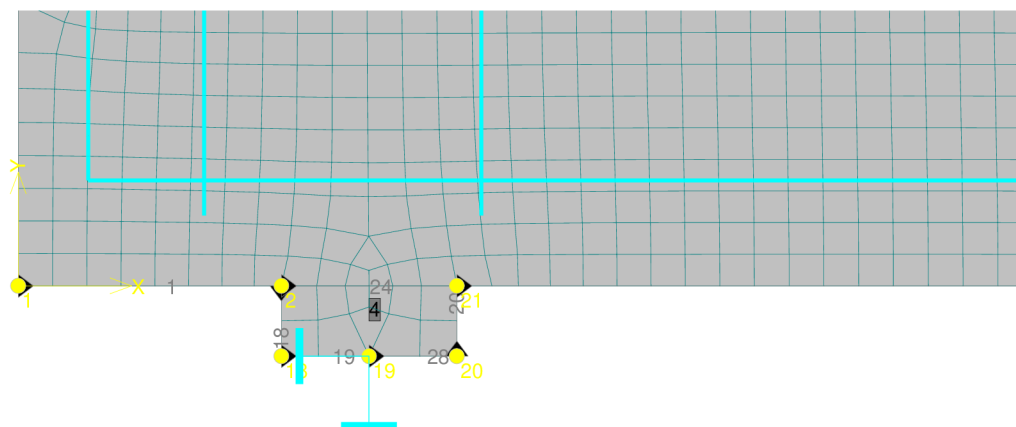
Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	200 000	MPa
Mez kluzu	f_y	565	MPa
Mez porušení	f_u	700	MPa
Objemová hmotnost	ρ	$7,85 \cdot 10^{-2}$	MN/m ³

8.1.2 Grafické zobrazení modelu

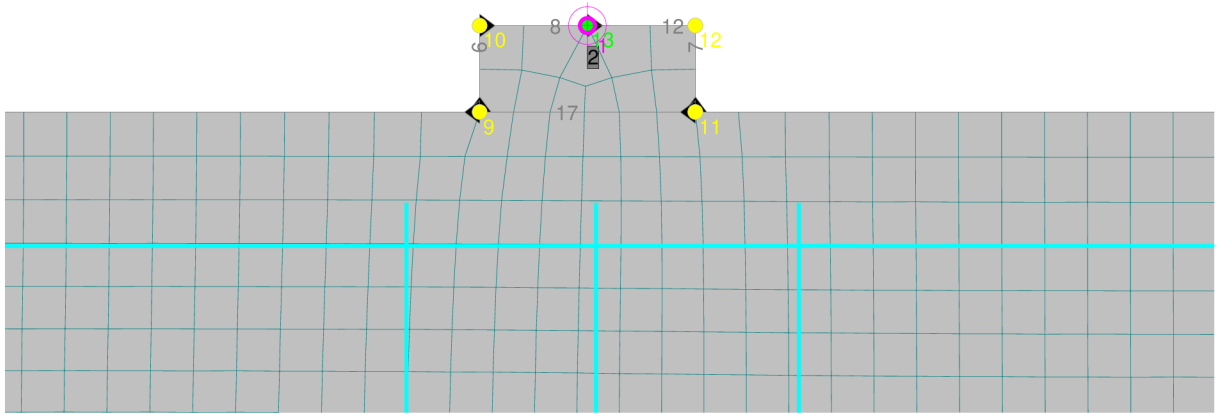
Základní model



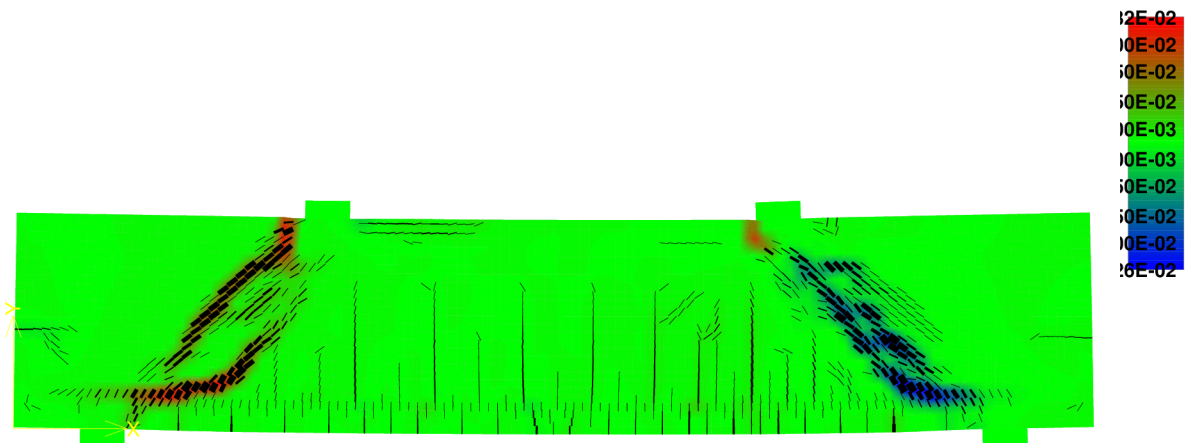
Obr. 1.25. Numerický model zkušebního prvku s vygenerovanou sítí



Obr. 1.26. Detail podpory



Obr. 1.27. Detail místa zatěžování vnější silou

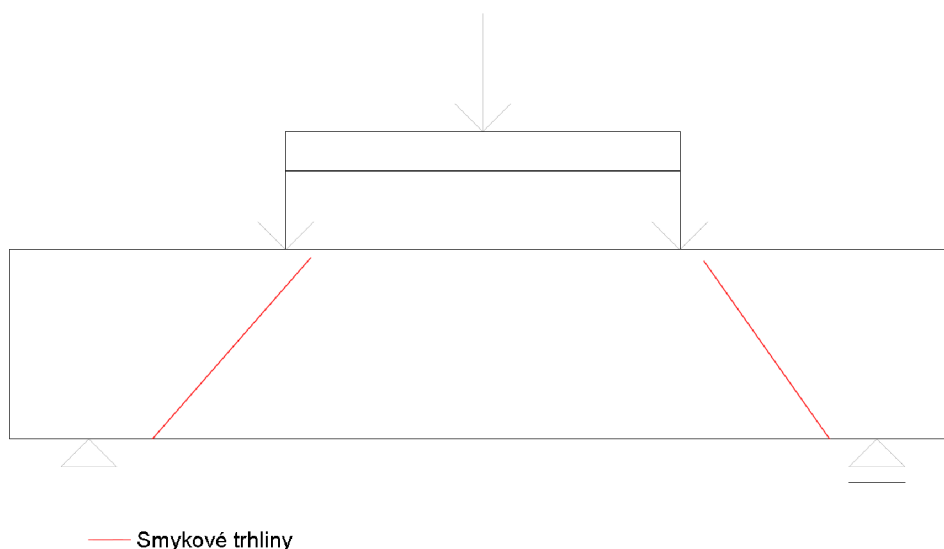


Obr. 1.28. Porušený průřez smykovými a ohybovými trhlinami

9. VYHODNOCENÍ

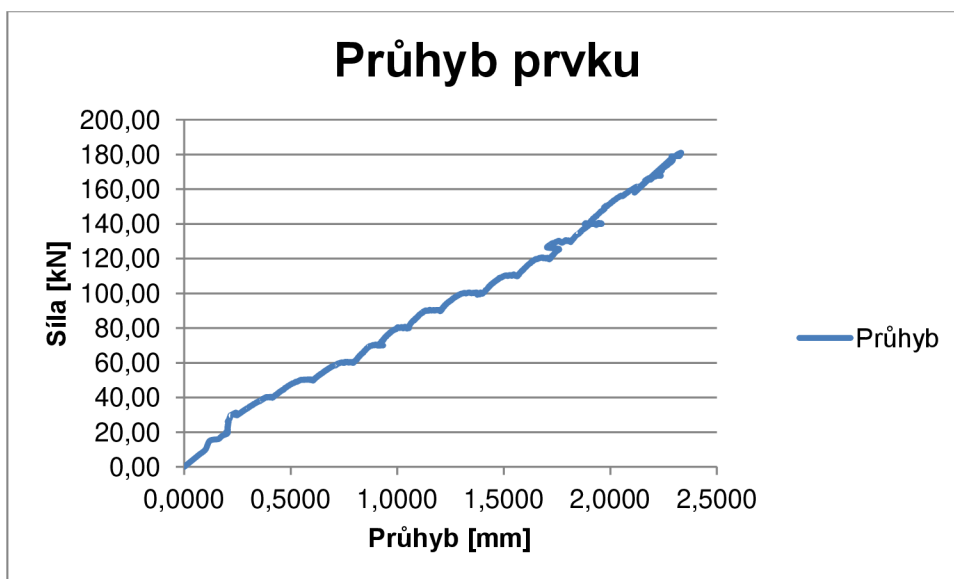
9.1 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

Předpokladem úspěšné experimentální analýzy bylo navržení zkušebního železobetonového prvku tak, aby u něj došlo primárně ke smykovému porušení. Díky předdimenzování ohybové výztuže a rozložení smykové výztuže v prvku byl výrazně ovlivněn vznik smykových trhlin při zatěžovací zkoušce.



Obr. 1.29. Směr smykové trhliny vzniklé při zatěžování

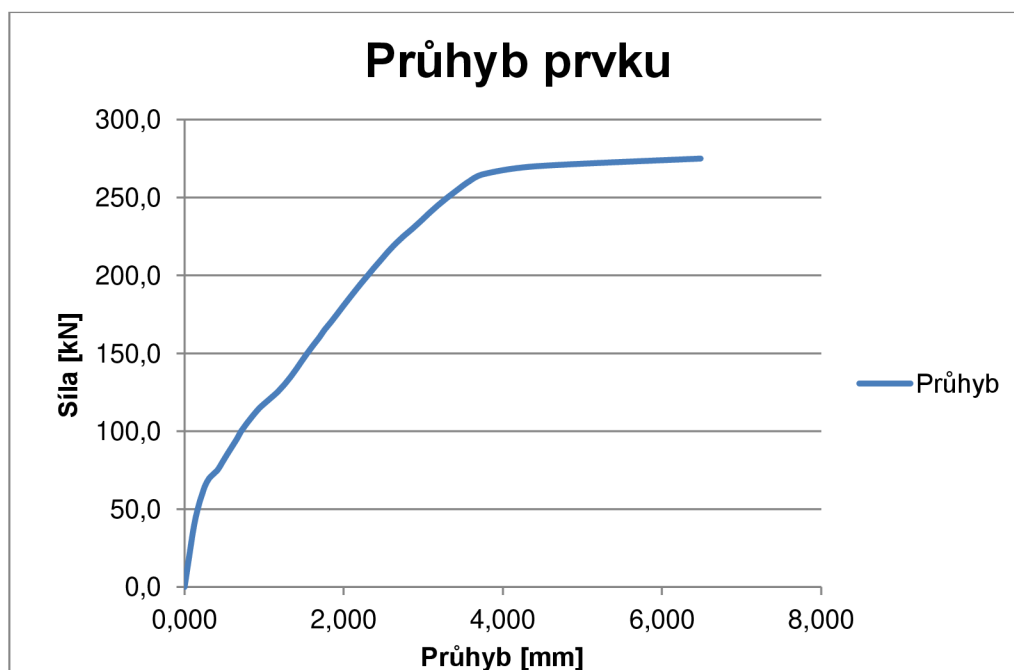
Zkušební prvek byl schopen přenést sílu na mezi porušení 260 kN. Měření a vyšetřování směru a velikosti smykových trhlin bylo přerušeno na síle 140kN, kdy již byly plně rozvinuté smykové trhliny.



graf 1.12. Průhyb během experimentálního zkoušení

9.2 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ – ATENA 2D

Numerická analýza zkušebního prvku byla provedena pro porovnání s experimentálním výsledkem zkoušky. Prvek byl schopen přenést na mezi porušení 265 kN a průhybem 3,757 mm.

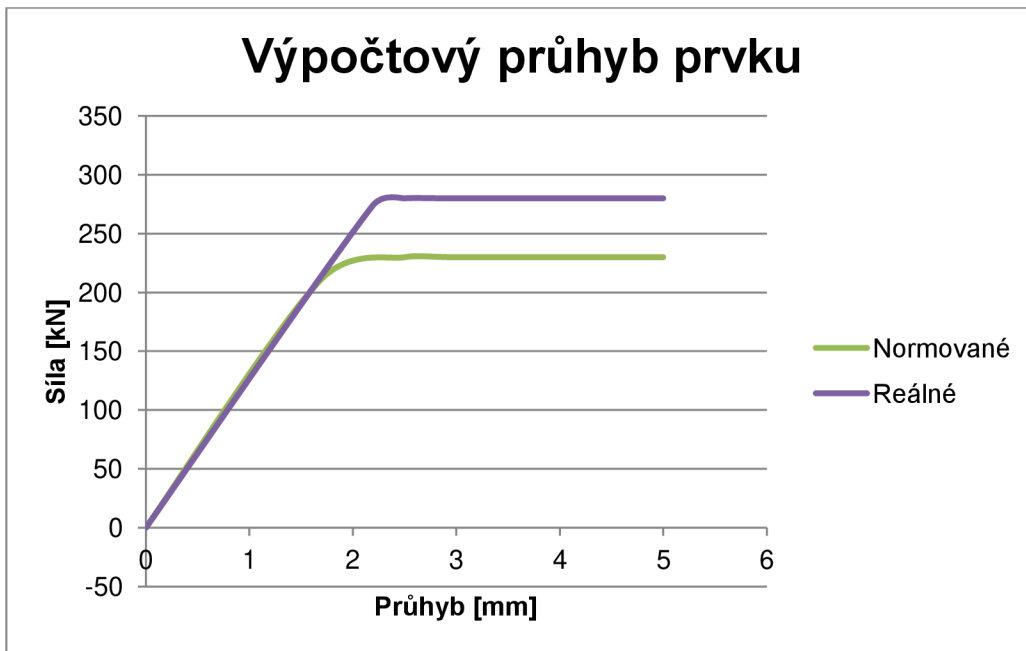


graf 1.13. Průběh numerické analýzy

9.3 STATICKÝ VÝPOČET

Statickým výpočtem byly vyhotoveny dvě sady výsledku podle materiálových charakteristik. První výpočet byl proveden s normovanými charakteristikami a druhý výpočet s reálně získanými na zkušebních tělesech v laboratoři. Statické výpočty jsou v příloze.

Výpočet obou sad je zaznamenán v grafu.



graf 1.14. Únosnost a průhyb stanovená statickým výpočtem

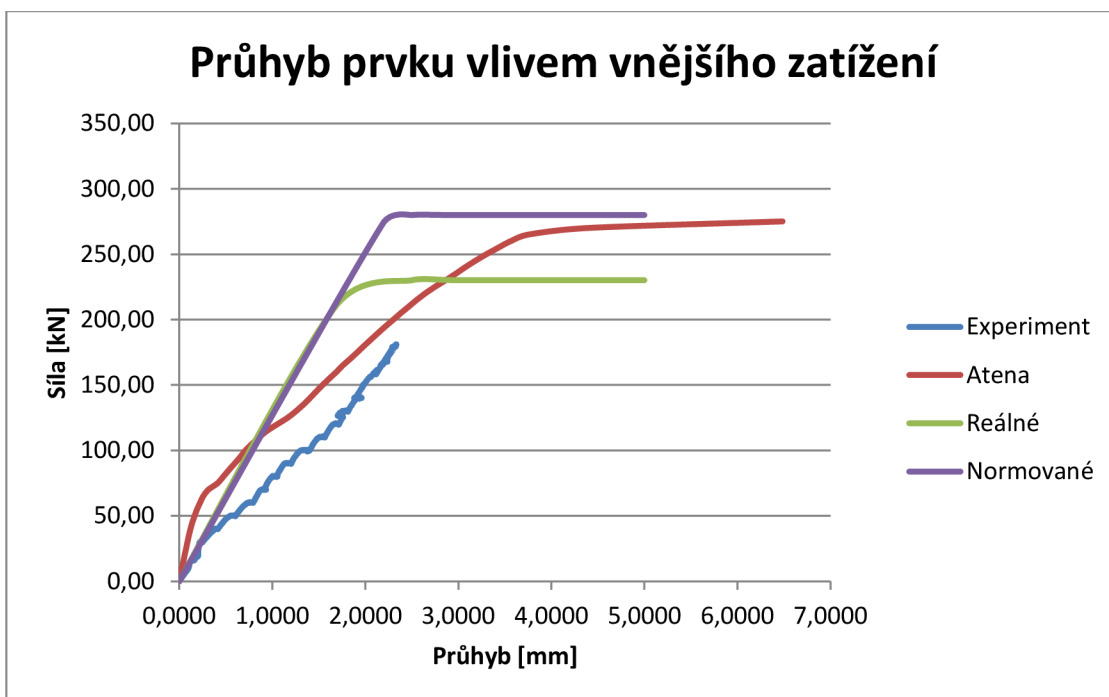
10. POROVNÁNÍ VÝSLEDKU A ZÁVĚR

10.1 POROVNÁNÍ NA ZÁKLADĚ PRŮHYBU PRVKU

Prvek se vlivem vnějšího zatížení deformuje a vzniká tím průhyb prvku ve směru působení síly. Experimentálně zjištěný průhyb prvků porovnáme s výsledky matematického modelování na principu metody konečných prvků, výpočtem na základě normových hodnot a výpočtem na základě reálně zjištěných charakteristických vlastností prvků.

Tab 1.11. Porovnání výsledku

	Experiment	Atena	Výpočet normové hodnoty	Výpočet reálné hodnoty
Síla na mezi vzniku trhlin [kN]	-	-	12,004	15,822
Průhyb na mezi vzniku trhlin [mm]	-	-	0,091	0,120
Síla na mezi únosnosti [kN]	261	260	210,798	273,92
Průhyb na mezi únosnosti [mm]	3,461	3,565	1,684	2,193
Porovnání únosnosti	100%	99,6%	76,66%	105,08%

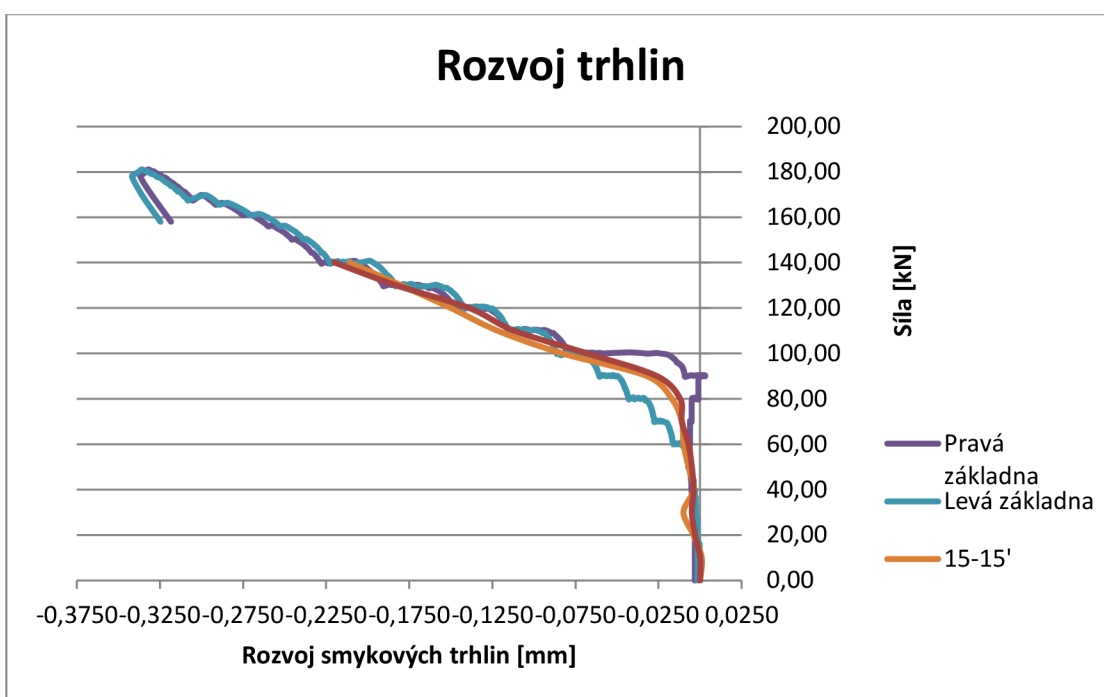


graf 1.15. Průhyby

10.2 POROVNÁNÍ NA ZÁKLADĚ ROZVÍJENÍ TRHLIN NA PROTĚJŠÍCH STRANÁCH PRVKU

Při laboratorním zatěžování prvku byly měřeny deformace pomocí Holannového sázecím deformetru na zadní straně prvků a Hollanovými můstky na přední straně. Umístění Holanových můstku na jedné straně prvku odpovídá umístění Hollanova sázecího deformetru na straně druhé. Pravá základna Hollanova můstku odpovídá základně 7-7' pro Hollanův sázecí deformetr. Levá základna pak základně 15-15'.

Oblast vzniku trhlin je oblast s největší posouvající silou v prvku nacházející se ve spojnici působíště zatížení a podpory. Pomocí diagnostiky rozvoje a směru trhlin, lze navrhnout smykové vyztužení prvku v postižené oblasti, které by zachytilo příčné tahy v betonu a zabránilo rozvoji smykových trhlin.



graf 1.16. Deformace měřené v oblasti rozvoje smykových trhlin

Smykové porušení je druhé nejvýznamnější porušení železobetonových konstrukcí po porušení na ohyb. Vzhledem k tomu, že beton má velmi špatné mechanické vlastnosti a nízkou pevnost v tahu, je nutné jej vyztužovat. Návrh smykové vyztuže a její správné umístění v prvku je tedy velmi důležité pro celkovou únosnost průřezu.

Z námi provedených analýz a výpočtu je zřetelné, že teoretický návrh je zatížen spoustou součinitelů, které eliminují případné chyby při výrobě a posouvají výslednou únosnost průřezu na stranu bezpečnou. Skutečná únosnost prvku je ve většině případů vyšší než teoretický návrh.

11. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Statický výpočet
Příloha č. 2	Výstupy z ATENA 2D
Příloha č. 3	Výstupy z průběhu měření

Příloha č. 1

Statický výpočet

Statický výpočet

Výpočet s charakteristickými vlastnostmi materiálu – normované parametry

Beton C20/25

$$f_{ck} = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20}{1,5} = 13,33 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$$

$$f_{ctm} = 2,2 \text{ MPa}$$

Ocel B500

$$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{uk} = 2,5 \text{ ‰}$$

Smyková únosnost železobetonového průřezu:

$$V_{Rd} = \min (V_{Rd,max}; V_{Rd,s})$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + tg\theta}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta$$

kde: α_{cw} součinitel zohledňující stav napětí v tlačené pásu ($\alpha_{cw} = 1,0$)

b_w šířka průřezu v tlačené oblasti

z rameno vnitřních sil

v_1 redukční součinitel pevnosti betonu ve smyku

f_{cd} návrhová pevnost betonu

θ úhel mezi betonovými tlakovými diagonálami a osou nosníku

A_{sw} průřezová plocha smykové výztuže

s osová vzdálenost třmínku

f_{ywd} návrhová mez kluzu smykové výztuže

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{20}{250} \right] = 0,552$$

$$f_{ywd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20}{1,5} = 13,33 \text{ MPa}$$

Rameno vnitřních sil

$$d_1 = c + \emptyset_{sw} + \frac{\emptyset_{st}}{2} = 0,015 + 0,006 + 0,005 = 0,026 \text{ m}$$

$$d = h - d_1 = 0,24 - 0,026 = 0,214 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,214 = 0,193 \text{ m}$$

Kde: d účinná výška průřezu
 d_1 poloha hlavní podélné výztuže

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{1,0 \cdot 0,12 \cdot 0,193 \cdot 0,552 \cdot 13,33 \cdot 10^3}{\cot 45^\circ + \tan 45^\circ} = \mathbf{85,21 \text{ kN}}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta = \frac{0,57 \cdot 10^{-4}}{0,170} \cdot 0,193 \cdot 434,78 \cdot 10^3 \cdot \cot 45^\circ = \mathbf{28,14 \text{ kN}}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}; V_{Rd,s}) = \min(85,21; 28,14) = \mathbf{28,14 \text{ kN}}$$

Konstrukční zásady

osová vzdálenost třmínku

$$s_{max} = 0,170 \text{ m} \leq 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 0,214 = 0,1605 \text{ m} \rightarrow \text{nevyhovuje}$$

$$s_{min} = 0,05 \text{ m} \leq 0,1605 \text{ m} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

osová vzdálenost větví třmínku

$$s_t = b_w - 2 \cdot c - \emptyset_{sw} = 0,12 - 2 \cdot 0,015 - 0,006 = 0,084 \text{ m}$$

$$s_t = 0,084 \text{ m} \leq 0,75d = 0,75 \cdot 0,214 = 0,1605 \text{ m}$$

$$s_t \leq 0,600 \text{ m} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

stupeň vyztužení

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s_{max}} = \frac{0,57 \cdot 10^{-4}}{0,12 \cdot 0,175} = 2,714 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_w \geq \rho_{w,min} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{20}}{500} = 7,155 \cdot 10^{-4} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Smyková únosnost získaná experimentálním zkoušením

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího průřezu

Plocha betonu

$$A_c = h \cdot b = 0,24 \cdot 0,12 = 0,0288 \text{ m}^2$$

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Poměr modulu pružnosti

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200\,000}{30\,000} = 6,67$$

Plocha ideálního průřezu

$$A_i = A_c + \alpha_e \cdot A_{st} = 0,0288 + 6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} = 0,0309 \text{ m}^2$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot 0,5h + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d = 0,0288 \cdot 0,5 \cdot 0,24 + 6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,214$$

$$S_i = 3,904 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{3,904 \cdot 10^{-3}}{0,0309} = 0,126 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_e \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot 0,12 \cdot 0,24^3 + 0,12 \cdot 0,24 \cdot \left(\frac{0,24}{2} - 0,126\right)^2 + 6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot (0,214 - 0,126)^2$$

$$I_i = 1,555 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{I_i}{(h - x_i)} = (2,2 \cdot 10^3) \cdot \frac{1,555 \cdot 10^{-4}}{(0,24 - 0,126)} = 3,001 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 12,004 \text{ kN}$$

Výpočet pro plně působící průřez

Průhyb od působení dvojice sil (zanedbáváme vlastní tíhu)

$$w = \frac{23}{648} \cdot \frac{F \cdot l^3}{EI_i} = \frac{23}{648} \cdot \frac{12,004 \cdot 10^3 \cdot 1^3}{30 \cdot 10^{-3} \cdot 1,555 \cdot 10^{-4}} = 9,13 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 0,091 \text{ mm}$$

Celkový průhyb

$$w = 0,091 \text{ mm}$$

Charakteristiky oslabeného průřezu

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$x_i = -\frac{\alpha_e \cdot A_{st}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st}}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d}{b}}$$

$$x_i = -\frac{6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{0,12} + \sqrt{\left(\frac{6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{0,12}\right)^2 + 2 \cdot \frac{6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,24}{0,12}} = 0,075 \text{ m} = 75 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_i^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 0,12 \cdot 0,075^3 + 6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot (0,24 - 0,075)^2$$

$$I_i = 7,389 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Moment

$$M_k = \frac{\sigma_{c2} \cdot I_i}{x_i} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 7,389 \cdot 10^{-5}}{0,075} = 19,704 \text{ kNm}$$

$$F_k = 78,82 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

Průhyb od působení dvojice sil

$$w = \frac{23}{648} \cdot \frac{F \cdot l^3}{EI_i} = \frac{23}{648} \cdot \frac{78,82 \cdot 10^3 \cdot 1^3}{30 \cdot 10^{-3} \cdot 7,389 \cdot 10^{-5}} = 1,262 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,262 \text{ mm}$$

Celkový průhyb

$$w = 1,262 \text{ mm}$$

Statický výpočet

Výpočet s reálnými vlastnostmi materiálu – reálné naměřené parametry

Beton C20/25

Ocel B500

$f_c = 44,4 \text{ MPa}$

$f_y = 565 \text{ MPa}$

$\varepsilon_{cu3} = 3,5 \text{ ‰}$

$\varepsilon_{uk} = 2,5 \text{ ‰}$

Smyková únosnost železobetonového průřezu:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}; V_{Rd,s})$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_c}{\cot\theta + tg\theta}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_y \cdot \cot\theta$$

- kde: α_{cw} součinitel zohledňující stav napětí v tlačené pásu ($\alpha_{cw} = 1,0$)
 b_w šířka průřezu v tlačené oblasti
 z rameno vnitřních sil
 v_1 redukční součinitel pevnosti betonu ve smyku
 f_{cd} návrhová pevnost betonu
 θ úhel mezi betonovými tlakovými diagonálami a osou nosníku
 A_{sw} průřezová plocha smykové výztuže
 s osová vzdálenost třmínku
 f_{ywd} návrhová mez kluzu smykové výztuže

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_c}{250}\right] = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{44,4}{250}\right] = 0,493$$

Rameno vnitřních sil

$$d_1 = c + \emptyset_{sw} + \frac{\emptyset_{st}}{2} = 0,015 + 0,006 + 0,005 = 0,026 \text{ m}$$

$$d = h - d_1 = 0,24 - 0,026 = 0,214 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,214 = 0,193 \text{ m}$$

Kde: d účinná výška průřezu
 d_1 poloha hlavní podélné výztuže

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_c}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{1,0 \cdot 0,12 \cdot 0,193 \cdot 0,493 \cdot 44,4 \cdot 10^3}{\cot 45^\circ + \tan 45^\circ} = 251,19 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_y \cdot \cot\theta = \frac{0,57 \cdot 10^{-4}}{0,170} \cdot 0,193 \cdot 565 \cdot 10^3 \cdot \cot 45^\circ = 36,56 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}; V_{Rd,s}) = \min(251,19 ; 36,56) = 36,56 \text{ kN}$$

Konstrukční zásady

osová vzdálenost třmínku

$$s_{max} = 0,170 \text{ m} \leq 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 0,214 = 0,1605 \text{ m} \rightarrow \text{nevyhovuje}$$

$$s_{min} = 0,05 \text{ m} \leq 0,1605 \text{ m} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

osová vzdálenost větví třmínku

$$s_t = b_w - 2 \cdot c - \emptyset_{sw} = 0,12 - 2 \cdot 0,015 - 0,006 = 0,084 \text{ m}$$

$$s_t = 0,084 \text{ m} \leq 0,75d = 0,75 \cdot 0,214 = 0,1605 \text{ m}$$

$$s_t \leq 0,600 \text{ m} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

stupeň vyztužení

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s_{max}} = \frac{0,57 \cdot 10^{-4}}{0,12 \cdot 0,175} = 2,714 \cdot 10^{-3}$$

$$\rho_w \geq \rho_{w,min} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_c}}{f_y} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{44,4}}{565} = 9,435 \cdot 10^{-4} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Smyková únosnost získaná experimentálním zkoušením

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího průřezu

Plocha betonu

$$A_c = h \cdot b = 0,24 \cdot 0,12 = 0,0288 \text{ m}^2$$

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Poměr modulu pružnosti

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200\,000}{30\,000} = 6,67$$

Plocha ideálního průřezu

$$A_i = A_c + \alpha_e \cdot A_{st} = 0,0288 + 6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} = 0,0309 \text{ m}^2$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot 0,5h + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d = 0,0288 \cdot 0,5 \cdot 0,24 + 6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,214$$

$$S_i = 3,904 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{3,904 \cdot 10^{-3}}{0,0309} = 0,126 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_e \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot 0,12 \cdot 0,24^3 + 0,12 \cdot 0,24 \cdot \left(\frac{0,24}{2} - 0,126\right)^2 + 6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot (0,214 - 0,126)^2$$

$$I_i = 1,555 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{I_i}{(h-x_i)} = (2,9 \cdot 10^3) \cdot \frac{1,555 \cdot 10^{-4}}{(0,24-0,126)} = 3,956 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 15,822 \text{ kN}$$

Výpočet pro plně působící průřez

Průhyb od působení dvojice sil (zanedbáváme vlastní tíhu)

$$w = \frac{23}{648} \cdot \frac{F \cdot l^3}{EI_i} = \frac{23}{648} \cdot \frac{15,823 \cdot 10^3 \cdot 1^3}{30 \cdot 10^{-3} \cdot 1,555 \cdot 10^{-4}} = 1,204 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,120 \text{ mm}$$

Celkový průhyb

$$w = 0,120 \text{ mm}$$

Charakteristiky oslabeného průřezu

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$x_i = -\frac{\alpha_e \cdot A_{st}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st}}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d}{b}}$$

$$x_i = -\frac{6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{0,12} + \sqrt{\left(\frac{6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{0,12}\right)^2 + 2 \cdot \frac{6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,24}{0,12}} = 0,075 \text{ m} = 75 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_i^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 0,12 \cdot 0,075^3 + 6,67 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot (0,24 - 0,075)^2$$

$$I_i = 7,389 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Moment

$$M_k = \frac{\sigma_{c2} \cdot I_i}{x_i} = \frac{44,4 \cdot 10^3 \cdot 7,389 \cdot 10^{-5}}{0,075} = 43,75 \text{ kNm}$$

$$F_k = 87,5 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

Průhyb od působení dvojice sil

$$w = \frac{23}{648} \cdot \frac{F \cdot l^3}{EI_i} = \frac{23}{648} \cdot \frac{87,5 \cdot 10^3 \cdot 1^3}{30 \cdot 10^{-3} \cdot 7,389 \cdot 10^{-5}} = 2,802 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2,802 \text{ mm}$$

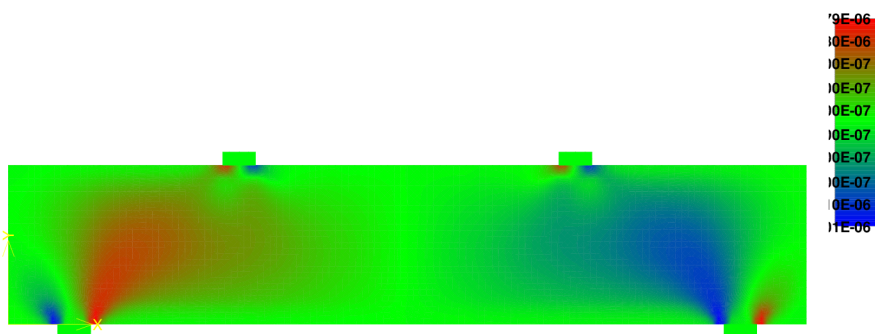
Celkový průhyb

$$w = 2,802 \text{ mm}$$

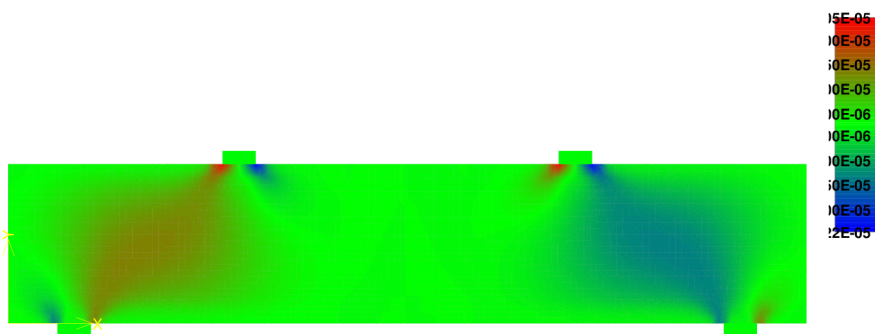
Příloha č.2

Výstupy z ATENA 2D

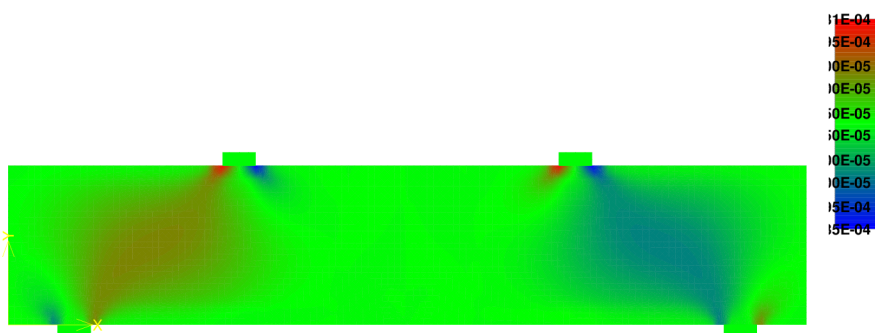
Výstupy z ATENA 2D



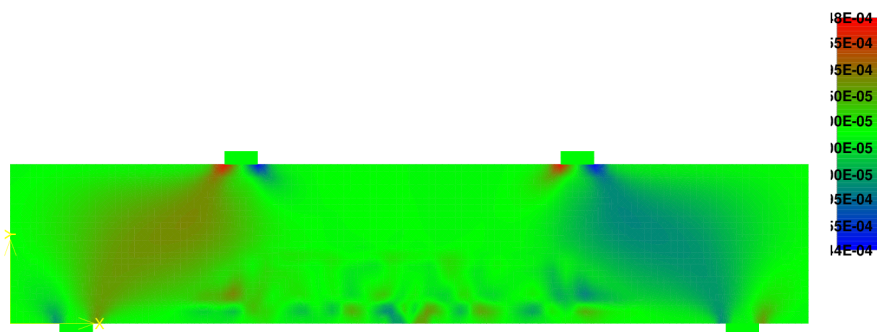
Obr. 1.30. Napětí v prvku před zahájením zatěžování



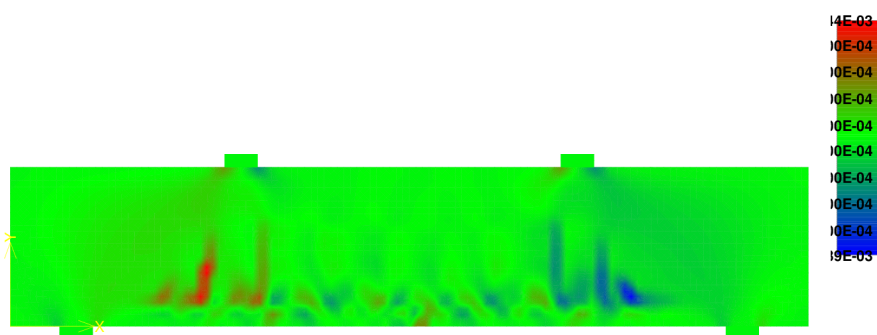
Obr. 1.31. Napětí v prvku při zatěžovací síle $F = 25 \text{ kN}$



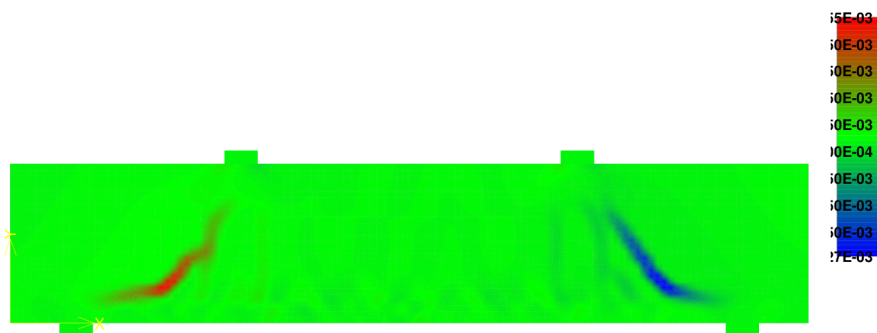
Obr. 1.32. Napětí v prvku při zatěžovací síle $F = 50 \text{ kN}$



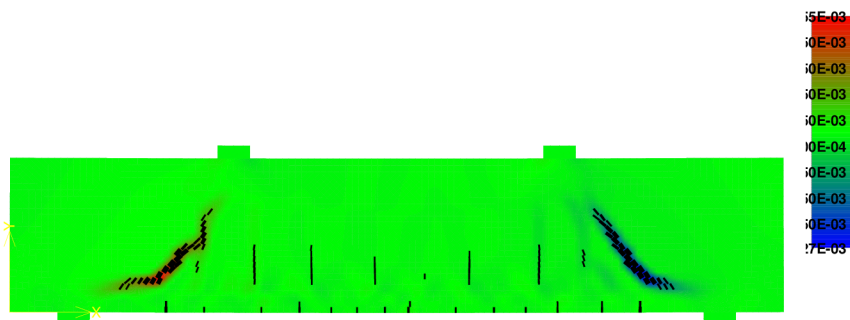
Obr. 1.33. Napětí v prvku při zatěžovací síle $F = 75 \text{ kN}$



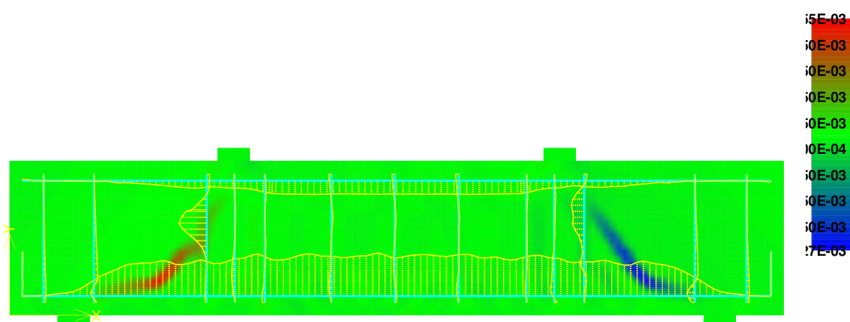
Obr. 1.34. Napětí v prvku při zatěžovací síle $F = 100 \text{ kN}$



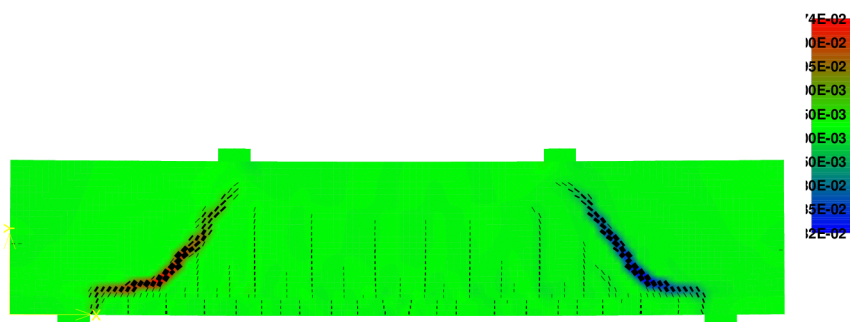
Obr. 1.35. Napětí v prvku při zatěžovací síle $F = 125 \text{ kN}$



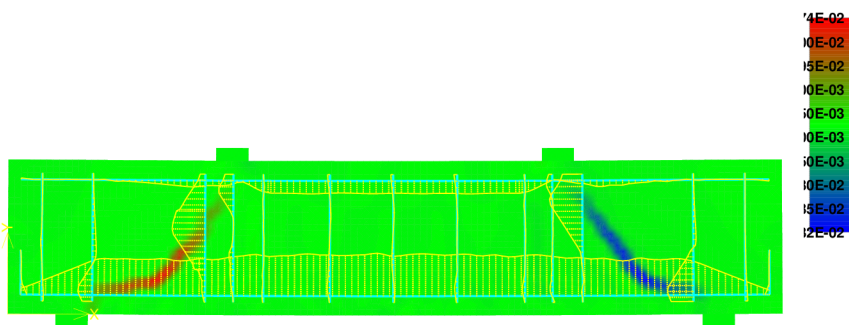
Obr. 1.36. Rozvoj trhlin při zatěžovací síle $F = 125 \text{ kN}$



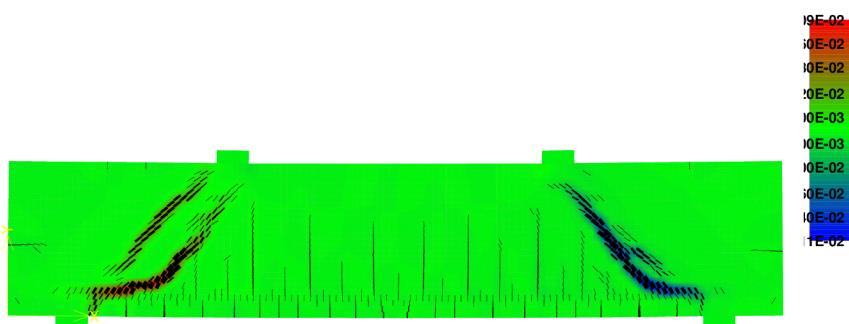
Obr. 1.37. Napětí ve výztuži při zatěžující síle $F = 125 \text{ kN}$



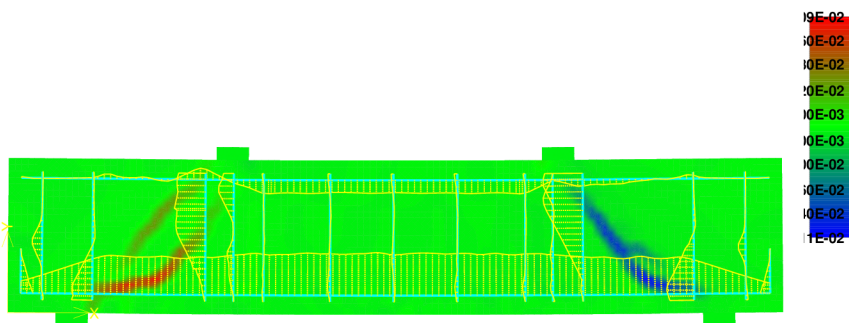
Obr. 1.38. Rozvoj trhlin při zatěžující síle $F = 200 \text{ kN}$



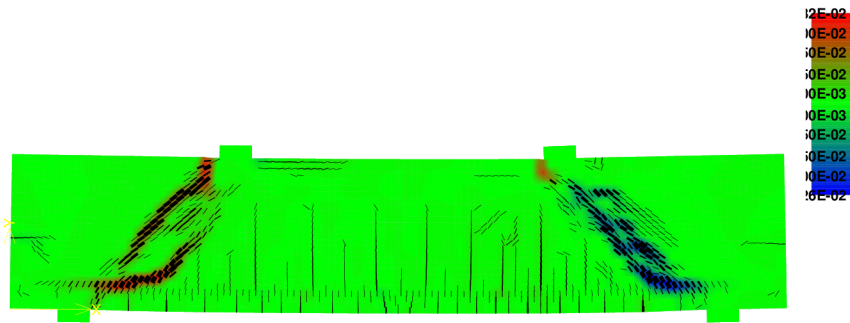
Obr. 1.39. Napětí ve výztuži při zatěžující síle $F = 200$ kN



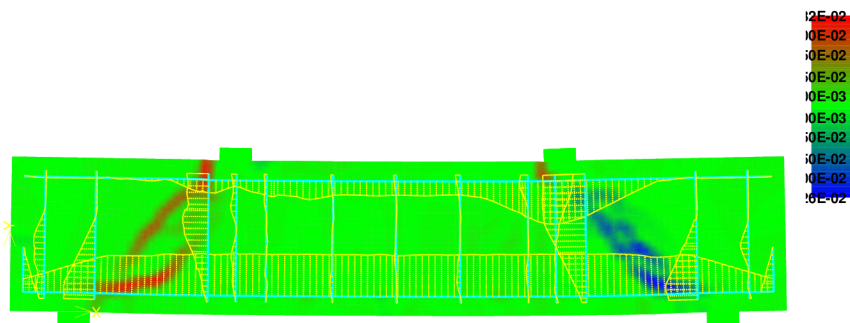
Obr. 1.40. Rozvoj trhlin při zatěžující síle $F = 250$ kN



Obr. 1.41. Napětí ve výztuži při zatěžující síle $F = 250$ kN



Obr. 1.42. Rozvoj trhlin při zatěžující síle $F = 280 \text{ kN}$



Obr. 1.43. Napětí ve výztuži při zatěžující síle $F = 280 \text{ kN}$

Příloha č.3

Výstupy z průběhu zkoušky

Výstupy z průběhu zkoušky

Tab 1.12. Vzdálenost osy výztuže od kraje prvku

Vzdálenost výztuže od líce [mm]	57	143	314	358	404	515	613	714	820	856	910	1078	1165
Vzdálenost výztuže od líce [mm]	49	120	302	345	394	490	591	689	796	846	885	1063	1139
Průměrná vzdálenost od líce [mm]	53	132	308	352	399	503	602	702	808	851	898	1071	1152

Tab 1.13. Vzdálenost osy výztuže od okraje prvku

Krytí výztuže					Průměrné krytí
Horní výztuž [mm]	30	36	26	31	31
Dolní výztuž [mm]	32	26	30	30	30

Výška prvku [mm]
242

Tab 1.14. Rozměry prvku měřené posuvným měřidlem

Měřené údaje kvádr	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Měřené údaje krychle	a [mm]	b [mm]	c [mm]
1	98,99	99,55	400,08	1	149,42	149,88	149,82
	98,3	99,52			149,65	149,84	149,82
	98,04	99,6		2	149,87	149,72	149,76
2	99,43	99,86	399,63		3	149,53	149,71
	99,27	99,57		149,77		150,05	150,32
	98,67	99,73		149,96	150,04	150,1	
3	98,11	99,8	399,78	3	4	399,92	399,95
	97,95	100,06					
	97,92	100,09					
4	99,14	99,59	399,92		5	399,95	
	99,35	99,38					
	99,8	99,51					
5	99,29	99,89	399,95		5	399,95	
	99,75	100,22					
	98,99	99,9					

Tab 1.15. Výsledky měření pomocí Hollanova sázečního deformetru

Síla	0kN	10kN	20kN	30kN	40kN	50kN	60kN	70kN	80kN	90kN	100kN	110kN	120kN	130kN	140kN
1-1'	0,122	0,123	0,119	0,124	0,126	0,128	0,131	0,134	0,138	0,135	0,138	0,135	0,14	0,141	0,14
2-2'	0,409	0,408	0,405	0,409	0,412	0,411	0,415	0,417	0,419	0,415	0,419	0,416	0,42	0,423	0,422
3-3'	0,186	0,187	0,185	0,188	0,189	0,189	0,191	0,192	0,194	0,192	0,202	0,191	0,185	0,147	0,097
4-4'	0,212	0,215	0,213	0,214	0,216	0,214	0,212	0,211	0,209	0,193	0,176	0,154	0,144	0,122	0,098
5-5'	0,361	0,362	0,365	0,365	0,367	0,366	0,371	0,372	0,375	0,371	0,37	0,366	0,368	0,367	0,367
6-6'	0,452	0,452	0,45	0,447	0,446	0,44	0,442	0,442	0,441	0,437	0,441	0,441	0,444	0,445	0,447
7-7'	0,372	0,372	0,369	0,367	0,368	0,367	0,365	0,361	0,36	0,346	0,304	0,26	0,233	0,189	0,152
8-8'	0,424	0,423	0,418	0,412	0,408	0,403	0,401	0,396	0,385	0,358	0,324	0,291	0,269	0,233	0,204
9-9'	0,34	0,343	0,345	0,344	0,347	0,346	0,348	0,348	0,358	0,345	0,347	0,343	0,344	0,342	0,341
10-10'	0,263	0,265	0,264	0,261	0,264	0,263	0,262	0,261	0,26	0,247	0,225	0,206	0,197	0,181	0,164
11-11'	0,25	0,252	0,251	0,249	0,251	0,251	0,25	0,25	0,249	0,231	0,187	0,157	0,136	0,11	0,081
12-12'	0,382	0,39	0,386	0,383	0,385	0,387	0,387	0,389	0,39	0,388	0,392	0,389	0,393	0,395	0,399
13-13'	0,294	0,296	0,293	0,292	0,295	0,297	0,297	0,3	0,301	0,302	0,303	0,301	0,303	0,302	0,307
14-14'	0,346	0,346	0,345	0,339	0,341	0,34	0,337	0,328	0,32	0,293	0,251	0,22	0,195	0,169	0,144
15-15'	0,488	0,489	0,484	0,478	0,484	0,481	0,478	0,477	0,471	0,456	0,405	0,366	0,338	0,308	0,277
16-16'	0,683	0,684	0,681	0,675	0,679	0,676	0,673	0,67	0,659	0,628	0,563	0,522	0,491	0,458	0,423

Tab 1.16. Upravené výsledky pomocí Hollanova sázecího deformetru

Síla	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
1-1'	0,000	0,001	-0,003	0,002	0,004	0,006	0,009	0,012	0,016	0,013	0,016	0,013	0,018	0,019	0,018
2-2'	0,000	-0,001	-0,004	0,000	0,003	0,002	0,006	0,008	0,010	0,006	0,010	0,007	0,011	0,014	0,013
3-3'	0,000	0,001	-0,001	0,002	0,003	0,003	0,005	0,006	0,008	0,006	0,016	0,005	-0,001	-0,039	-0,089
4-4'	0,000	0,003	0,001	0,002	0,004	0,002	0,000	-0,001	-0,003	-0,019	-0,036	-0,058	-0,068	-0,090	-0,114
5-5'	0,000	0,001	0,004	0,004	0,006	0,005	0,010	0,011	0,014	0,010	0,009	0,005	0,007	0,006	0,006
6-6'	0,000	0,000	-0,002	-0,005	-0,006	-0,012	-0,010	-0,010	-0,011	-0,015	-0,011	-0,011	-0,008	-0,007	-0,005
7-7'	0,000	0,000	-0,003	-0,005	-0,004	-0,005	-0,007	-0,011	-0,012	-0,026	-0,068	-0,112	-0,139	-0,183	-0,220
8-8'	0,000	-0,001	-0,006	-0,012	-0,016	-0,021	-0,023	-0,028	-0,039	-0,066	-0,100	-0,133	-0,155	-0,191	-0,220
9-9'	0,000	0,003	0,005	0,004	0,007	0,006	0,008	0,008	0,018	0,005	0,007	0,003	0,004	0,002	0,001
10-10'	0,000	0,002	0,001	-0,002	0,001	0,000	-0,001	-0,002	-0,003	-0,016	-0,038	-0,057	-0,066	-0,082	-0,099
11-11'	0,000	0,002	0,001	-0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	-0,001	-0,019	-0,063	-0,093	-0,114	-0,140	-0,169
12-12'	0,000	0,008	0,004	0,001	0,003	0,005	0,005	0,007	0,008	0,006	0,010	0,007	0,011	0,013	0,017
13-13'	0,000	0,002	-0,001	-0,002	0,001	0,003	0,003	0,006	0,007	0,008	0,009	0,007	0,009	0,008	0,013
14-14'	0,000	0,000	-0,001	-0,007	-0,005	-0,006	-0,009	-0,018	-0,026	-0,053	-0,095	-0,126	-0,151	-0,177	-0,202
15-15'	0,000	0,001	-0,004	-0,010	-0,004	-0,007	-0,010	-0,011	-0,017	-0,032	-0,083	-0,122	-0,150	-0,180	-0,211
16-16'	0,000	0,001	-0,002	-0,008	-0,004	-0,007	-0,010	-0,013	-0,024	-0,055	-0,120	-0,161	-0,192	-0,225	-0,260

