



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY ŽELEZOBETONOVÉ DESKY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF LOAD TEST CONCRETE SLABS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Jedlička

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	Lukáš Jedlička
Název	Experimentální a numerická analýza zatěžovací zkoušky železobetonové desky
Vedoucí práce	Ing. Petr Žítt
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

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



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

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Lukáš Jedlička *Experimentální a numerická analýza zatěžovací zkoušky železobetonové desky*. Brno, 2017. 45 s., 41 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Žítt

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje návrh, výrobu a experimentální zatěžovací zkoušku železobetonového prvku, za který byla zvolena deska. Součástí laboratorních prací byla výroba zkušebních těles a stanovení jejich fyzikálních a mechanických vlastností. Data získaná z experimentu byla porovnána s výsledky simulace zatěžovací zkoušky v prostředí programu Atena 3D, který využívá pro nelineární analýzu metodu konečných prvků. Dále bylo provedeno srovnání výsledků s výpočtem dle platné normy.

KLÍČOVÁ SLOVA

experimentální zkouška, zatěžovací zkouška, zkoušení betonových prvků, laboratorní zkoušky konstrukcí, laboratorní zkušebnictví, metoda konečných prvků, Atena 3D

ABSTRACT

This bachelor's thesis describes a design, making and experimental load test of reinforced concrete element, which has been selected as a slab. The part of laboratory work was production of testing ensembles and assessment of their physical and mechanical properties. The data from experiment were compared with the results of simulated load test in software Atena 3D, that is using for nonlinear analysis the finite element method. All results were compared with numerical analysis from valid norm.

KEYWORDS

experimental test, load test, testing of concrete elements, laboratory testing of constructions, laboratory testing, finite element method, Atena 3D

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 25. 5. 2017



Lukáš Jedlička
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Petru Žíttovi za trpělivost, odborné vedení a cenné rady při zpracování této práce.

Obsah

1. Úvod	9
2. Návrh a výroba zkušebního prvku a doprovodných těles	10
2.1 Návrh experimentálního tělesa	10
2.2 Výroba experimentálního tělesa	11
2.2.1 Betonová směs pro výrobu zkušebního prvku a doprovodných těles.....	11
2.2.2 Doprovodné zkoušky zkušebních těles.....	11
2.2.3 Příprava betonáže	11
2.2.4 Vlastní betonáž	12
2.2.5 Ošetřování betonu.....	12
3. Experimentální zkoušení železobetonových prvků	13
3.1 Členění a názvosloví	13
3.2 Důvody experimentálního ověření konstrukcí	14
3.3 Příprava zatěžovací zkoušky	14
3.4 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky.....	15
3.5 Určování polohy výztuže	16
3.5.1 Princip určování polohy výztuže	16
3.5.2 Profometer 4	16
3.6 Instrumentace zatěžovací zkoušky	17
3.6.1 Tenzometrie	17
3.6.2 Snímače průhybů a posunů.....	18
4. Zatěžovací zkouška	19
4.1 Příprava zatěžovací zkoušky	19
4.2 Rozmístění snímačů.....	20
4.3 Průběh zatěžovací zkoušky	22
5. Doprovodné zkoušky	24
5.1 Zkušební vzorky	24
5.1.1 Stanovení objemové hmotnosti	24
5.2 Pevnost betonu v tlaku	25
5.2.1 Jádrové vývrty	26
5.3 Pevnost betonu v prostém tahu	26
5.4 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku	27
5.4.1 Zkušební postup.....	27
5.5 Pevnost v tahu ohybem	28
5.5 Lomová energie betonu	29
5.6 Tahová zkouška výztuže za okolní teploty.....	30

5.7 Výsledky doprovodných zkoušek.....	31
6. Numerická analýza.....	33
6.1 Základní informace.....	33
6.2 Model konstrukce.....	33
7. Porovnání výsledků.....	36
8. Závěr.....	39
9. Použitá literatura.....	40
10. Seznam grafů.....	42
11. Seznam tabulek.....	43
12. Seznam obrázků.....	44
13. Seznam příloh.....	45

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá experimentální a numerickou analýzou železobetonového prvku. Jako zkušební prvek byla zvolena prostě vyztužená deska, která bude v rámci experimentální zkoušky zatěžovaná čtyřbodovým ohybem, která se z hlediska zkoušení jeví jako nejvhodnější. Při zkoušce budou sledovány údaje o zatěžovací síle, průhyb uprostřed rozpětí desky, poklesy podpor a napětí ve výztuži a tlačené části betonového prvku.

Jak výroba, tak i samotná zatěžovací zkouška budou probíhat v prostorách zkušeben a dílen Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Betonová směs pro výrobu prvku bude odebrána externě z betonárny. Při samotné betonáži budou zhotovena tělesa pro doprovodně zkoušky, nezbytné pro stanovení mechanických vlastností betonu, které budou dále použita pro srovnávací numerickou analýzu.

Mezi doprovodné zkoušky realizované v této práci patří pevnost betonu v tlaku, pevnost betonu v tahu, pevnost betonu v ohybu, stanovení modulu pružnosti betonu, stanovení lomové energie betonu a tahové zkoušky pevnosti výztuže. Výsledky těchto zkoušek budou použity pro zařídění betonu a budou výchozími parametry pro numerickou analýzu.

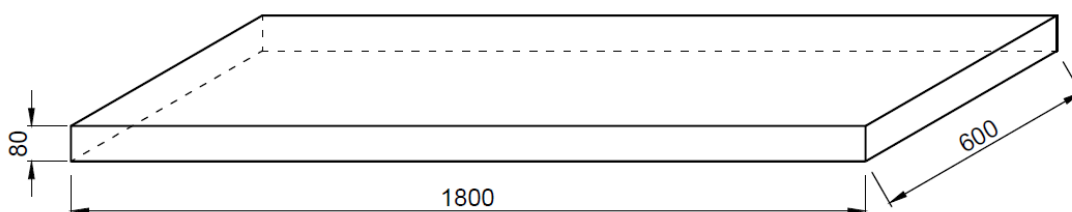
Numerická analýza železobetonového prvku bude probíhat jednak pomocí statického výpočtu mezní únosnosti a mezního přetvoření dle ČSN EN 1992, tak i pomocí výpočetního programu Atena 3D, který využívá metodu konečných prvků.

Cílem této práce je srovnání výsledků získaných ze zatěžovacího experimentu a výsledků numerické analýzy, dále pak popis metodiky, výroby a zkoušení železobetonového prvku.

2. Návrh a výroba zkušebního prvku a doprovodných těles

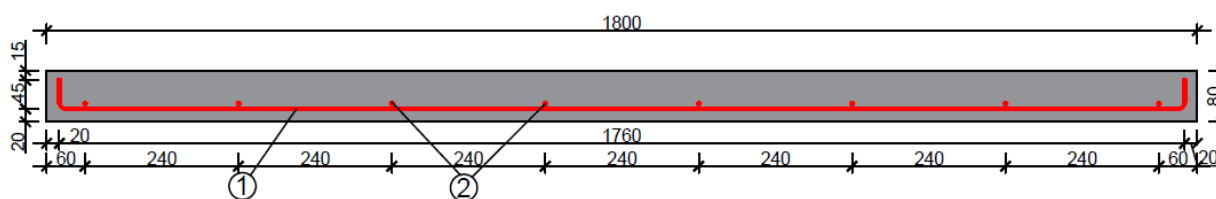
2.1 Návrh experimentálního tělesa

Pro experiment byla zvolena jako zkušební prvek deska. Půdorysné rozměry desky byly zvoleny dle možností zatěžovacího ústrojí a k zajištění příznivé manipulace v rámci zkušeben a dílen. Výška desky byla zvolena tak, aby splňovala konstrukční zásady a zároveň aby byla zachována co nejmenší tuhost desky a docílení většího průhybu. Základní rozměry desky a zároveň vnější rozměry bednění jsou uvedeny na obrázku.



Obr. 1: Základní rozměry prvku

Vzhledem k prostému podepření desky a povaze zatížení, které vyvoluje kladný ohybový moment, bude deska standardně vyztužena při dolním taženém kraji v podélném směru a rozdělena v příčném směru rozdělovací výztuží. Zvolený průměr výztuže by měl splňovat podmínku manuální, a co nejvíce jednoduché výroby v prostředí standardní dílny. Pro hlavní nosnou výztuž byl zvolen průměr 10 mm, pro rozdělovací výztuž průměr 6 mm. Schéma vyztužení desky je uvedeno na obrázku.



Obr. 2: Schéma vyztužení zkušebního prvku

- Legenda:
1. hlavní podélná výztuž $6 \times \phi 10 \text{ mm}$ ($A_{st} = 471,24 \text{ mm}^2$)
 2. rozdělovací příčná výztuž $8 \phi 6 \text{ mm}$ ($A_{sr} = 226,20 \text{ mm}^2$)

2.2 Výroba experimentálního tělesa

2.2.1 Betonová směs pro výrobu zkušebního prvku a doprovodných těles

Betonová směs byla odebrána z betonárny v okolí zkušebny a ihned po odběru byla přepravena do místa betonáže. Počáteční požadavek na betonovou směs byla pevnostní třída C 30/37, s minimální frakcí kameniva 16 mm a v konzistenci odpovídající S3.

2.2.2 Doprovodné zkoušky zkušebních těles

Tab. 1: Přehled zkušebních těles a realizovaných zkoušek

Zkoušky mechanických vlastností betonu		
Zkouška	Základní rozměr tělesa	Počet zkušebních těles
Pevnost v tlaku	Krychle 150x150x150 mm	9
	Jádrový vývrt	6
Pevnost v prostém tahu	Hranol 100x100x400 mm	6
Statický modul pružnosti		
Pevnost v tahu ohybem		
Lomová energie betonu	Hranol 100x100x400 mm	3
Zkouška mechanických vlastností oceli		
Zkouška	Základní rozměr tělesa	Počet zkušebních těles
Pevnost v tahu ($\phi 10$ mm)	Prut délky 700 mm	3
Pevnost v tahu ($\phi 6$ mm)	Prut délky 700 mm	3

Výše zmíněné zkoušky byly realizovány na zkušebních tělesech, která byla vybetonována ve stejný čas, ze stejné betonové směsi a za stejných podmínek jako zkušební prvek pro zatěžovací zkoušku. Tato tělesa byla zkoušena po 28 dnech od betonáže za účelem zjištění mechanických vlastností nezbytných pro numerickou analýzu.

2.2.3 Příprava betonáže

Bednění bylo vyrobeno z voděodolné překližky o vnitřních rozměrech odpovídajících rozměrům samotného prvku. Betonářská výztuž byla vyvázána pomocí vázacího drátu do armokoše, který byl osazen distančními plastovými kroužky pro podélnou výztuž z důvodu zajištění krycí vrstvy. Návrh krycí vrstvy betonu je uveden v příloze P4, rozměry armokoše odpovídají statickému posouzení, uvedeném v příloze P4. Vnitřní povrch bednění byl upraven

univerzálním separačním přípravkem pro zajištění snadného sejmutí dřevěného bednění a možnosti opětovného použití bednění.

2.2.4 Vlastní betonáž

Potřebná litráž betonu pro zkušební prvek činí 86,4 l čerstvého betonu, pro doprovodná tělesa celkem 56,25 l čerstvého betonu, dohromady je tedy potřeba 142,65 l betonové směsi. Betonová směs byla odebrána externě na betonárně v nejbližším okolí zkušebny, z důvodu poměrně velkého objemu směsi s ohledem na zajištění stejnorodosti směsi a usnadnění betonáže.

Forma byla plněná po 1/2 své výšky a po každé etapě lití byl beton zavibrován ponorným vibrátorem. Tento postup byl opakován dvakrát, po úplném zaplnění a zavibrování betonu byl vrchní povrch manuálně srovnán a vyhlazen. Souběžně vyráběná doprovodná tělesa byla plněna stejným způsobem stejnou betonovou směsí neprodleně po betonáži hlavního zkušebního prvku a zavibrována na vibračním stole.

2.2.5 Ošetřování betonu

Prvních sedm dní po betonáži byl zkušební prvek pravidelně vlhčen a zakryt igelitovou plachtou z důvodu zachování stálé vlhkosti nezbytné pro hydrataci. Vzhledem k povaze zkoušení, nebyla tělesa ponořena do vody. Po celou dobu tvrdnutí betonu – 28 dní, byly zachovány v místě uložení prvku konstantní teplotní podmínky.

3. Experimentální zkoušení železobetonových prvků

Dle ČSN 73 2030 [1] je účel zatěžovací zkoušky:

- posouzení spolehlivosti konstrukce,
- ověřit výpočtové modely,
- posoudit spolehlivost konstrukce v případě, že není možno zjistit všechny potřebné parametry pro výpočet.

Z hlediska způsobu vyhodnocení se zatěžovací zkoušky dělí na zkoušky prováděné do dosažení únosnosti konstrukce a na zkoušky bez dosažení únosnosti konstrukce [1].

3.1 Členění a názvosloví

Dle podmínek zkoušky pro provádění rozlišujeme:

- zatěžovací zkoušky nezabudovaných stavebních dílců, prováděné ve vybavených zkušebnách,
- zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí před zahájením provozu nebo v době provozu,
- zatěžovací zkoušky modelů konstrukcí, které jsou prováděny v laboratořích.

Časové působení zkušebního zatížení vymezuje:

- zkoušky krátkodobé (ověření okamžitých vlastností),
- zkoušky dlouhodobé (dlouhodobé vlastnosti přetvářnosti nebo degradace konstrukce,
- zkoušky opakované (pro soustavné sledování změn vybraných konstrukcí v době provozu.

Charakter zatížení vymezuje dvě rozdílné typy zkoušení:

- dynamické zkoušení, při němž zkušební zatížení mění svou velikost nebo polohu a vyvolává takové zrychlení konstrukce, že nelze zanedbat vznik setrvačných sil hmoty konstrukce,
- statické zatěžovací zkoušky, při kterých je přírůstek zatížení pomalé nebo zanedbatelné, vyvolávají na konstrukci pouze statické účinky. Tento charakter odpovídá zatížení pozemních staveb [2].

3.2 Důvody experimentálního ověření konstrukcí

Jedná se zejména o posouzení spolehlivosti konstrukce, zjištění vstupních parametrů modelu konstrukce před provedením výpočtu její odezvy na zatížení. U složitých modelů stavebních konstrukcí lze experimentálně stanovit vybrané parametry modelu, aby bylo dosaženo co nejužitečnějšího výsledku výpočtu. Dalším důvodem může být ověření platnosti předpokladů zavedených do výpočtu nebo ověření výpočtového modelu konstrukce, pokud nastává pochybnost o správnosti výpočtového modelu. Posouzení se provádí na základě porovnání výsledků odezvy na konstrukci vypočtené podle modelu a odezvy na experimentálně stanovené reálné konstrukci [3].

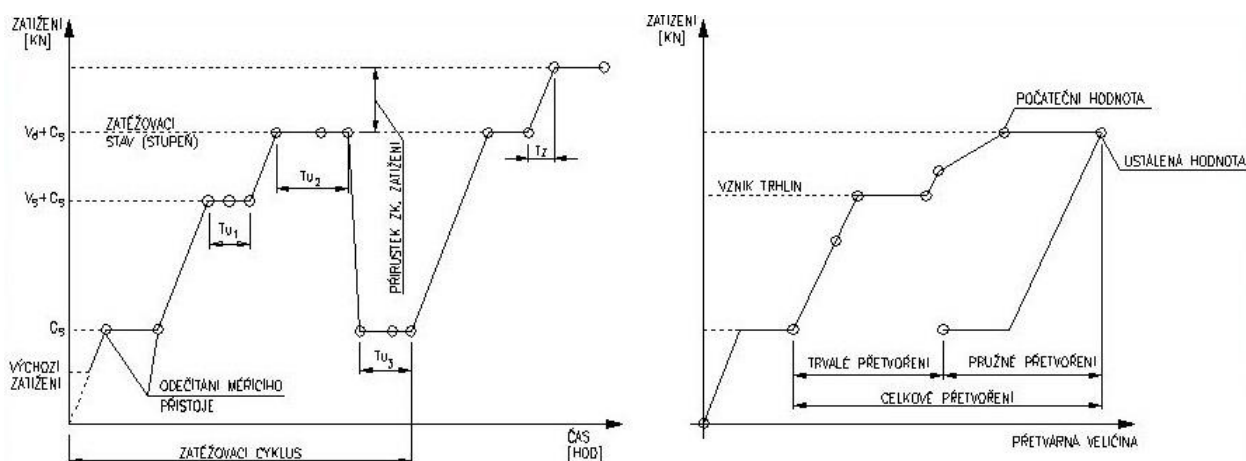
3.3 Příprava zatěžovací zkoušky

Program zkoušky zpravidla obsahuje:

- stanovení účelu a rozsah zkoušky,
- údaje o skutečném stavu konstrukce (geometrii, údaje o materiálech, statické a dynamické chování atd.),
- zjištění požadavků na konstrukci,
- určení druhu a intenzity zatížení, stanovení velikosti zatěžovacího stupně a délky působení zatížení,
- určení měrných veličin, jejich snímání a zpracování, včetně údajů o měřících vyhodnocovacích zařízeních,
- stanovení způsobu hodnocení výsledků zatěžovací zkoušky.

Zatěžovací zkouška se má provádět tak, aby byly pokud možno co nejvíce omezeny vlivy, které by mohli negativně ovlivňovat průběh a výsledek zkoušky. Při zkouškách je nutno zabezpečit co nejpřesnější podmínky odpovídající účelu a druhu konstrukce. Při realizaci se postupně zvyšuje zatížení a měří se odezva účinků na konstrukci, měření musí být provedeno v takovém rozsahu, aby byly zajištěny potřebné informace v požadovaném rozsahu (měřící přístroje, metody a postupy musí být voleny tak, aby splňovaly podmínky nezkráceného zobrazení a odpovídali požadované přesnosti měření [1]).

Při zkušeni do dosažení únosnosti konstrukce je zkouška ukončena po dosažení meze pevnosti.



Obr. 3: Schéma zatěžovacího cyklu [2]

3.4 Vyhodnocení zatěžovací zkoušky

Zkoušená konstrukce se hodnotí podle mezních stavů únosnosti a mezních stavů použitelnosti. Za dosažení únosnosti betonové konstrukce se považuje ztráta stability tvaru konstrukce, nebo její části, neustálé přetváření konstrukce při konstantním zatížení, drcení betonu v tlaku, přetržení nebo vybočení výztuže, posun ve smykových trhlinách, u ohýbaných prvků průhyb větší než je $1/50$ rozpětí a popřípadě jiné porušení konstrukce.

Při statické zatěžovací zkoušce do dosažení meze únosnosti konstrukce se konstrukce považuje za spolehlivou z hlediska mezního stavu únosnosti pokud:

- experimentální hodnota únosnosti je větší než výpočtová hodnota únosnosti násobená součinitelem spolehlivosti γ_{exp} ,
- při zatížení na hodnotu, která odpovídá zatížením G_s+V_d a následným odlehčením na hodnotu, která odpovídá G_s je poměr mezi trvalým a celkovým přetvořením menší než λ_1 [3].

Tab. 2: Přehled součinitelů důležitých pro posuzování betonových konstrukcí zkoušených dle ČSN 73 2030 [1]

Součinitel	Způsob porušení	Konstrukce ze železobetonu	Konstrukce z předpjatého betonu
γ_{exp}	Ohybem	1,6	1,6
	Smykem	1,4	1,4
	Tlakem	1,4	1,4
	Smykem	1,4	1,4
λ_1		0,3-0,1 $[V_d/(V_d+G_s)]$	0,25-0,1 $[V_d/(V_d+G_s)]$
μ		0,4	0,3

3.5 Určování polohy výztuže

3.5.1 Princip určování polohy výztuže

Jedno ze základních podmínek pro dosažení požadovaných vlastností železobetonových konstrukcí je dodržení projektovaného množství, profilu a třídy oceli a rozmístění ocelových výztuží. Pro prvotní orientační informaci o těchto vlastnostech konstrukce slouží magnetické indikátory výztuže. Mezi jejich předností patří rychlost a jednoduchá kontrola polohy výztuže, mezi negativní vlastnosti spadají vlastnosti, které vyplývají z možnosti přístrojů, jež jsou dána fyzikálními principy, na kterých tyto přístroje pracují.

Magnetická metoda zjišťování parametrů výztuže je založena na feromagnetickém jevu nebo na víření proudů, které způsobují změnu charakteristik magnetického pole sondy při jejím přiblížení k prutům výztuže. V případě hustého vyztužení tato metoda přestává být efektivní.

3.5.2 Profometer 4

Pro ověření polohy výztuže v této práci byl použit přístroj Profometer 4.

Napájecí část přístroje je propojena se sondou, ve které je okolo jádra nevinutá cívka. V okolí sondy vzniká elektromagnetické pole, jemuž odpovídá základní stav indikátoru přístroje. Přítomností ocelového materiálu v dosahu přístroje se magnetické pole sondy deformuje (projeví se změnou indikace na displeji přístroje). Sonda má směrový účinek, lze teda najít i směr vyztužení.

Přístroj disponuje pevnou pamětí 1 MB s kapacitou pro 100 000 naměřených hodnot a integrovaným programem pro tisk a přenos do vyhodnocovacího zařízení. Přístroj má grafický

LCD displej, na němž se přehledným způsobem zobrazují jednotlivé funkce. Kromě základní sondy přístroj může obsahovat sondu hloubkovou nebo sondu průměrovou [4].

3.6 Instrumentace zatěžovací zkoušky

3.6.1 Tenzometrie

Tenzometrie zahrnuje rozsáhlý soubor metod, které umožňují stanovit poměrnou deformaci ε ve vybraném diskretním bodě konstrukce nebo jejího modelu. Na základě této experimentálně určené deformace ε , materiálových charakteristik a fyzikálních rovnic z teorie pružnosti lze vypočítat velikost odpovídajícího napětí. Měrná poměrná deformace se většinou udává v jednotkách $[\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}]$.

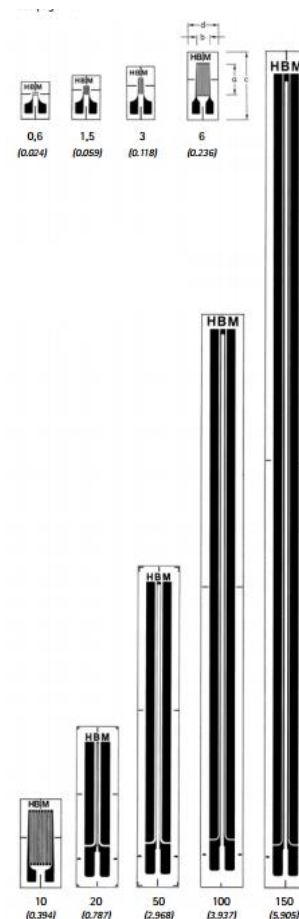
Odporové tenzometry jsou ve stavební praxi využívány nejvíce. U odporových tenzometrů je mechanická veličina (poměrná deformace ε) převedena na změnu elektrického odporu snímače. Nejběžnějšími typy odporových tenzometrů jsou drátkové, foliové a polovodičové tenzometry.

Drátkové a foliové odporové tenzometry jsou založeny na využití elektrického odporu tenkého drátku (vodiče), který zkracuje nebo prodlužuje délku vodiče. Vodič vedený tak, aby měřící vlákno mřížku, je připevněný k izolační podložce, která se přilepí na sledovanou konstrukci.

Různé výrobní řady a typy vyráběných odporových tenzometrů drátkových i foliových se navzájem liší délkou, počtem a umístěním mřížek.

V této práci byly použity odporové tenzometry s jedinou měřící mřížkou, které se používají tehdy, pokud je nutné stanovit poměrnou deformaci (napětí) v jediném, přesně daném směru na konstrukci.

Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků, je nutné při lepení tenzometrů dbát na co nejpečlivější lepení na konstrukci, na zbavení povrchu konstrukce nečistot, pečlivého vybroušení, odmaštění, zbavení vlhkosti. Také je třeba lepit lepidlem, které pro daný typ tenzometru předepisuje právě výrobce. Tenzometr se musí chránit proti vlhkosti a jiným povětrnostním vlivům ochranným povlakem z včelího vosku nebo speciálního parafinu [3].



Obr. 4: Sortiment liniových foliových odporových tenzometrů firmy HBM [5]

3.6.2 Snímače průhybů a posunů

Pro krátkodobé měření průhybů a posunů při zatěžovacích zkouškách statických i dynamických je možnost použití elektronického způsobu měření jako jsou indukčnostní snímače posunutí nebo odporové snímače (potenciometrické snímače dráhy).

Indukčnostní snímače jsou využívány pro měření délkových posunutí. Princip fungování je založen na změně indukčnosti soustavy cívek způsobené změnou jejich magnetického odporu. Konstrukcí jsou řešeny ve formě snímačů s malou vzduchovou mezerou, s otevřeným magnetickým obvodem či s potlačeným polem a zapojeny jako jednoduché, diferenční či jako transformátorové. Nejběžnější konstrukční typ pro měření lineárních posunutí je realizován v diferenčním provedení snímače s otevřeným magnetickým obvodem, u něhož dochází se změnou polohy feromagnetického jádra v dutině cívek ke změně jejich indukčnosti.

Odporové snímače se používají pro snímání lineárního nebo úhlového posunutí. Nejčastěji se jedná o potenciometry, jejichž měrným prvkem bývá buď vinutý drátový element z vodivého plastu a opatřený běžcem spojeným mechanicky s měřeným objektem. Pro převod pohybu konstrukce na běžec se používá struna ovinutá kolem kladky či přímého převodu. Rozlišovací schopnost u drátových potenciometrů bývá okolo 0,1 mm u CP potenciometrů je teoreticky neomezená, prakticky však 0,02 mm [5].



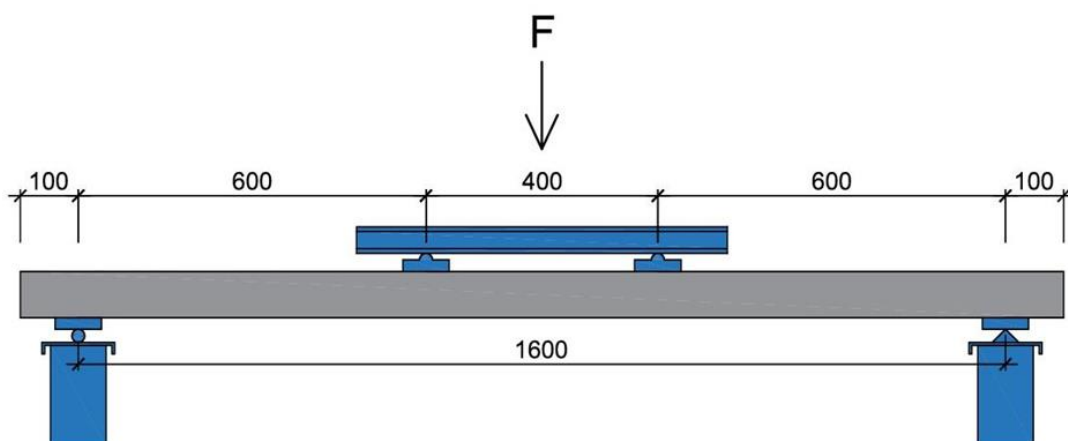
Obr. 5: Indukčnostní snímače firmy HBM [5]

4. Zatěžovací zkouška

4.1 Příprava zatěžovací zkoušky

V rámci této práce byla provedena jedna zatěžovací zkouška železobetonové desky. Postup této zatěžovací zkoušky je popsán v následujících bodech:

- úprava ploch pro osazení snímačů, schéma rozmístění snímačů je uvedeno v kapitole 4.2,
- příprava a osazení lepených snímačů,
- osazení ocelového rámu do požadované polohy,
- umístění ocelových podpor do osové vzdálenosti podpor od osy hydraulického válce,
- umístění ocelových prvků simulujících posuvnou a pevnou podporu na pryžové podložky,
- umístění zkušebního tělesa na podpory a jeho následné vycentrování vůči středu osy zatěžování,
- osazení snímačů posunu pro zjištění průhybu uprostřed rozpětí a nad podporami z důvodu měření poklesu podpor,
- umístění hydraulického lisu do ocelového rámu nad střed desky,
- nachystání ocelového I-profilu, které bude sloužit jako vahadlo pro rozdělení účinku síly lisu do dvou bodů podle statického schématu (zajištění čtyřbodového ohybu),
- zapojení snímačů do sběrné stanice a následná kontrola funkčnosti snímačů,
- po zkontrolování geometrie podle statického schématu je možno začít zkoušku.



Obr. 6: Schéma zatěžovací zkoušky

4.2 Rozmístění snímačů

Zkoušená deska byla na několika místech osazena snímači, které zajišťují co možná nejpřesnější záznam chování tělesa při zatěžovací zkoušce. Všechny snímače byly po osazení a kontrole zapojeny do sběrné stanice HBM Spider 8. Tato stanice byla připojena k PC, do kterého byly posílány data v reálném čase. Data byla snímána s ohledem na typ a charakter zatěžovací zkoušky (statická zatěžovací zkouška) ve frekvenci 5 Hz.

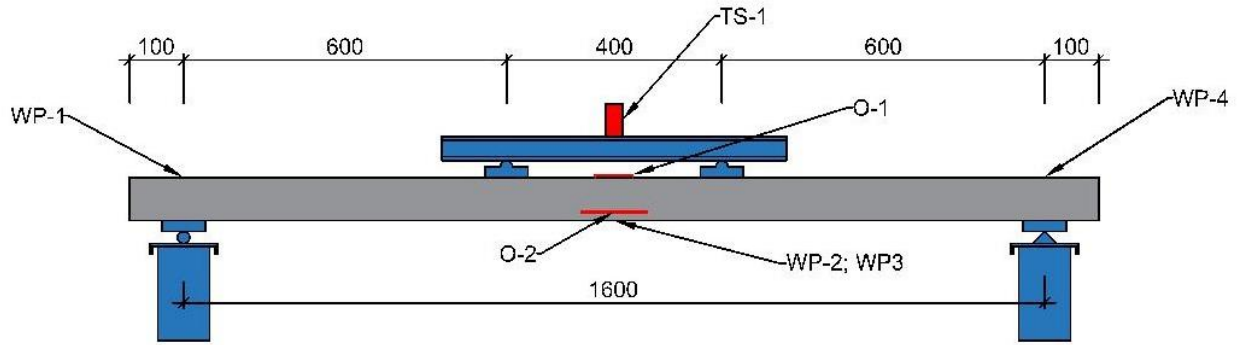
Vyvozovaná zatěžovací síla byla vnášena do konstrukce desky přes ocelové vahadlo pomocí hydraulického lisu panenky. Maximální dosažitelná síla hydraulického lisu je 250 kN. Reakce vznikající při zatížení byla přenášena do ocelového rámu, ve kterém byl zatěžovací válec usazen. Pro záznam síly vyvozované lisem sloužil integrovaný tenzometrické siloměr CSP 250 kN.

Pro záznam napětí ve výztuži byl zvolen odporový tenzometr firmy HBM typu 1-LY41-6/120. Tento tenzometr byl osazen na jedné z hlavních podélných výztuží uprostřed rozpětí, kde vzniká největší tahové napětí. Pro zajištění funkčnosti tenzometru byl prut ocelové výztuže zbroušen. Tento proces byl proveden před betonáží, při samotném betonování tělesa bylo nutné dbát na neporušení a správné vyvedení vodičů tenzometru nad betonovaný povrch desky.

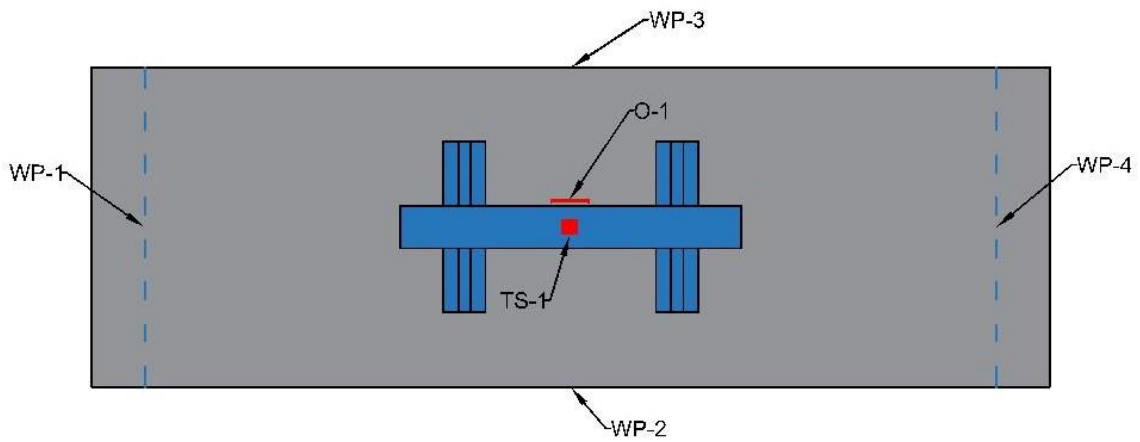
Napětí v nejlépe tlačené části betonu, tedy na horním povrchu v půdorysném středu desky bylo měřeno pomocí odporového tenzometru firmy HBM typu 1-LY41-100/120. Tento tenzometr byl nalepen na obroušenou a očištěnou plochu desky (drobné nerovnosti v betonu byly srovnány vrstvou lepidla a opět přebroušeny) a nalepen pomocí dvousložkového lepidla.

Měření posunů pro stanovení průhybu uprostřed rozpětí a pro stanovení poklesu podpor bylo provedeno indukčnostními snímači dráhy WA HBM a upevněny pomocí můstku typu Holan. Pro měření průhybu uprostřed rozpětí byla využita dvojice těchto snímačů, jejich výsledky byly zprůměrovány. Stejně tak pokles podpor byl měřen dvojicí indukčnostních snímačů a výsledky byly rovněž zprůměrovány.

Schéma rozmístění všech snímačů je znázorněno na obrázku.



Obr. 7: Rozmístění snímačů v řezu



Obr. 8: Rozmístění snímačů v půdorysu

Legenda:	O-1;O-2	odporový tenzometr na výztuži nebo betonu,
	TS-1	tenzometrický siloměr na hydraulickém válci,
	WP-1~ WP-4	potenciometrické snímače dráhy (průhyb).

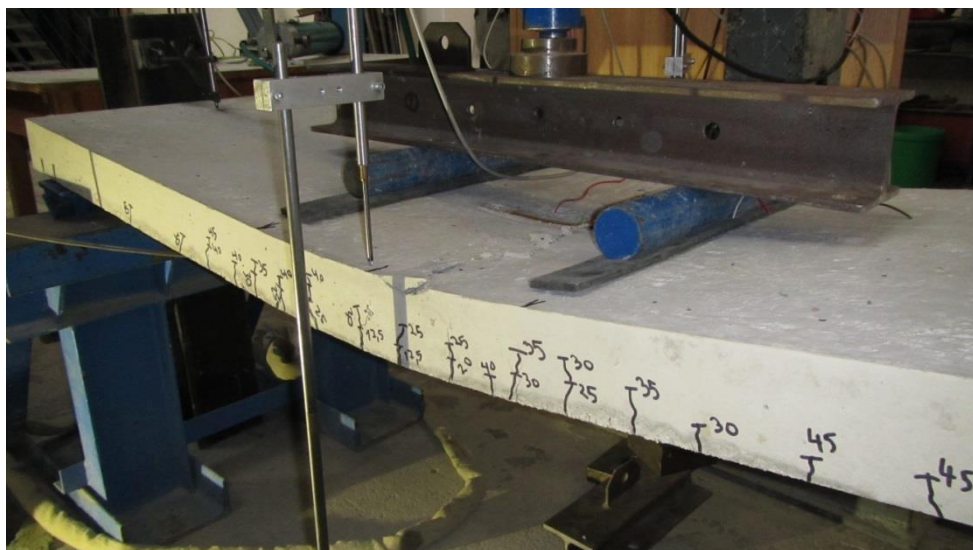
4.3 Průběh zatěžovací zkoušky

Zatěžovací zkouška byla realizována po uplynutí normové doby pro zrání betonu, tedy minimálně po 28 dnech.

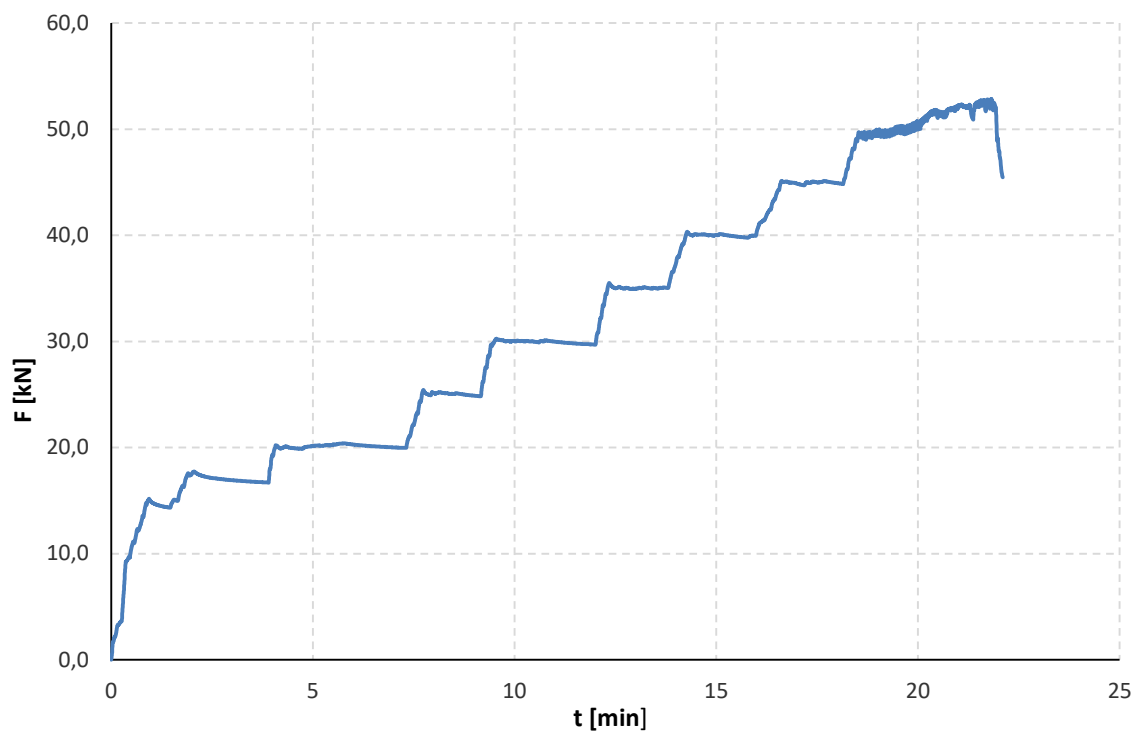
Deska byla zatěžována jako prostý nosník pomocí hydraulického válce, přitěžování nastávalo manuálně ruční pumpou. Zatěžování probíhalo postupně po 5 kN krocích a následným setrváním z důvodu ustálení deformací, až do porušení prvku. Doba podržení konstantní síly v lise byla využita pro zakreslení vzniku trhlin a jejich rozšiřování. Měření bylo ukončeno po poklesu síly zatěžovacího lisu, samotná zkouška byla ukončena po vytvoření plastického kloubu uprostřed rozpětí.

Zkoušku lze popsat v následujících krocích:

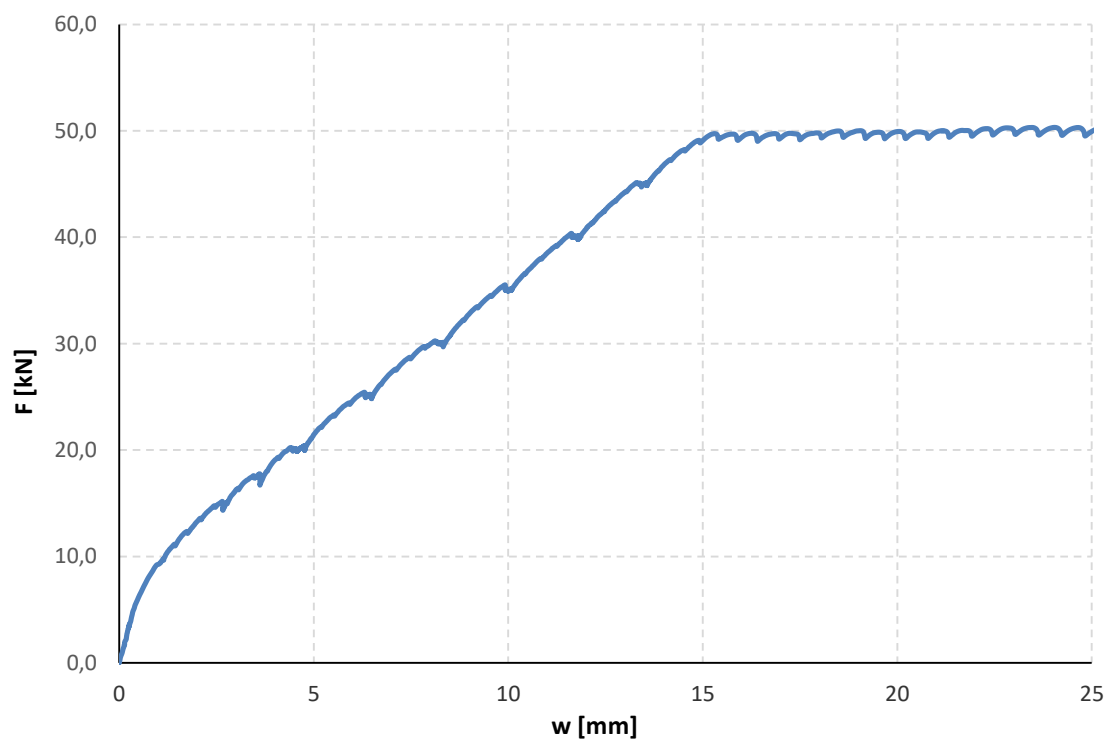
- 1) počátek snímání a zatěžování,
- 2) pozorování vzniku viditelných trhlin v tlačené oblasti betonu uprostřed rozpětí při zatěžovací síle $F \approx 17,5$ kN,
- 3) zastavení vzniku nových trhlin, rozšiřování stávajících trhlin při zatěžovací síle $F \approx 45,0$ kN,
- 4) dosažení meze únosnosti prvku při zatížení $F \approx 50,0$ kN,
- 5) ukončení měření při průhybu ≈ 35 mm,
- 6) tvoření nadměrných deformací při stávající zatěžovací síle
- 7) ukončení zkoušky při vzniku plastického kloubu v betonu.



Obr. 9: Dosažení meze únosnosti při zatěžovací zkoušce



Graf 1: Průběh zatěžovací zkoušky



Graf 2: Průměrný průhyb uprostřed rozpětí v závislosti na zatížení

5. Doprovodné zkoušky

5.1 Zkušební vzorky

Pro každý tvar zkušebního tělesa (krychle, válec, hranol), se volí jmenovitý průměr d tak, aby byl nejméně třiapůlkrát větší než je velikost maximálního zrna kameniva.

Formy, do kterých probíhá betonáž těles, musí být vodotěsné a nenasákavé. V této práci byly použity kalibrované formy pro výrobu doprovodných zkušebních těles. Kalibrované formy musí být zhotoveny z litiny nebo oceli, musí být dostatečně tuhé, aby nedocházelo k jejich deformaci.

Betonová směs ve formě byla hutněna dle normy pomocí vibračního stolu s minimální frekvencí 40Hz. Zde bylo nutno dbát, aby nedošlo k převibrování, které by mohlo způsobit ztrátu provzdušnění. Vrchní povrch je nutno uhladit zednickou lžící. Všechny vzorky byly značeny odpovídající konvencí (krychle K1-K6, hranoly H1-H9, jádrové vývrty V1-V6) [6].

5.1.1 Stanovení objemové hmotnosti

Nejmenší objem tělesa je 0,785 l, u zkoušky se rozlišuje, zda je zkušební těleso nasyceno vodou, vyschlé v sušárně, popřípadě ve stavu, v jakém bylo dodáno. Objem tělesa se stanovuje buď referenční metodou ponořením do vody, nebo výpočtem ze skutečných změřených rozměrů. Rozměry prvku byly stanoveny pomocí posuvného měřítka s přesností na 0,5 %. Rozměry musí vyhovovat tolerančním odchylkám uvedených v normě ČSN EN 12390-1 [6].

Objemová hmotnost se stanoví podle rovnice [7]:

$$D = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Kde: D = objemová hmotnost [kg/m^3]

m = hmotnost vzorku stanovená příslušným způsobem [kg]

V = objem stanovený příslušným způsobem [m^3]

Výsledky se zaokrouhlí na nejbližších $10 \text{ kg}/\text{m}^3$.

5.2 Pevnost betonu v tlaku

Podstatou zkoušky je zatěžování těles až do porušení ve zkušebním lisu, který odpovídá požadavkům normy ČSN EN 12390-4 [8]. Maximální zatížení v podobě síly se zaznamená při porušení tělesa a následně se z něj vypočte pevnost betonu v tlaku.

Povrch tělesa i ploch zkušebního lisu musí být zbaven nečisto a musí být suchý. Krychle se osazuje tak, aby byl vyvozen co nejvíce centrický účinek zatížení, zatěžovací rychlost je konstantní a nabývá hodnot od 0,6 MPa/s [9].

Pevnost betonu v tlaku je dána následujícím způsobem:

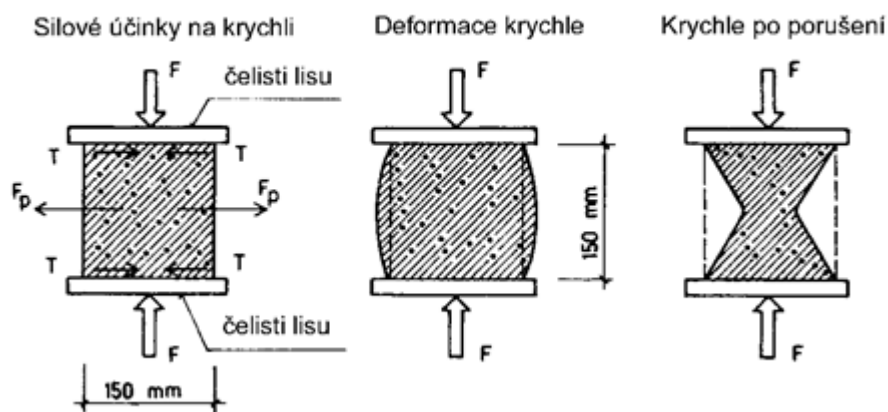
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

Kde: f_c = pevnost betonu v tlaku [MPa]

F = maximální síla při porušení [kN]

A_c = průřezová plocha tělesa [mm²]

Výsledky se zaokrouhlují na nejbližších 0,1 MPa.



Obr. 10: Průběh zkoušení pevnosti betonu v tlaku [9]

5.2.1 Jádrové vývrty

Jádrové vývrty se odebírají z konstrukce za účelem destruktivního stanovení mechanických vlastností materiálu. Vývrty se provádějí speciální vrtací soupravou s dutými válci, které jsou na spodní straně vrtáku tvrdokovovými, popřípadě diamantovými břity. Vrtačka je osazena do speciálního stojanu, který umožňuje vrtat v svisle, vodorovně a pod úhlem. Břity vrtáku jsou obvykle chlazeny vodou. Vrtací průměry se pohybují v rozmezí 25 – 150 mm.

Samotný vrt konstrukcí se provede do požadované hloubky, poté se vrták vyjme a jádrový vývrt se opatrně vylomí z vrtu. Vrty slouží převážně k ověření pevnosti staviva v tlaku. Válce se na pile s diamantovým kotoučem seříznou na požadovanou délku, obě plochy se zabrousí popř. zakončí v souladu s normovými postupy. Po zvážení se provede zkouška v prostém tlaku pro zjištění válcové popř. krychelné pevnosti [9].

5.3 Pevnost betonu v prostém tahu

Je největší síla, kterou je zkušební těleso schopno přenášet při zatížení jednoosým tahem, vztaženým na počáteční průřez tohoto tělesa. Za zkušební těleso se volí válece nebo krychle dostatečné délky. Problémem pro přenos síly ze zkušebního lisu do zkoušeného vzorku. Vzorek je po obou stranách lepen k ocelovým destičkám. Musí být dbán důraz na způsob namáhání vzorku, jakákoliv mimostřednost může negativně ovlivnit výsledek tohoto stanovení. Z tohoto důvodu jsou vzorky v lisu uchyceny do kloubových hlavic [10].

Pevnost betonu v prostém tahu je dána rovnicí:

$$f_t = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Kde: f_t = pevnost betonu v prostém tahu [MPa]

F = maximální síla při porušení [kN]

A_c = průřezová plocha tělesa [mm²]

5.4 Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku

Zkušební těleso je při této zkoušce vystaveno základnímu napětí 0,5 MPa a poté se napětí plynule zvětšuje až do jedné třetiny pevnosti betonového tělesa v tlaku. Zaznamenává se poměrné přetvoření při odpovídajícím napětí. Zkouška probíhá v zatěžovacím lisu, zařízením které měří poměrné přetvoření použité v této práci je součástí příslušenství zatěžovacího lisu. Pro zkoušku musí být vyrobeno nejméně 5 zkušebních těles, přičemž 3 se použijí na stanovení pevnosti v tlaku a zbylá 2 na stanovení modulu pružnosti. Nejmenší rozměr tělesa pro zkoušení je 100 mm, poměr délky k průměru L/d se musí rovnat 2 až 4.

5.4.1 Zkušební postup

Prvním krokem je stanovení pevnosti v tlaku F_c , dále je zkušební tělesu umístěno do lisu a osazeno měřidlem přetvoření a vystaveno základnímu napětí 0,5 MPa (σ_0). Toto napětí je udržováno 60 sekund, potom se zaznamenávají hodnoty přetvoření. Dále se napětí konstantě zvyšuje rychlostí 0,2 až 0,6 MPa/s dokud se napětí nerovná 1/3 hranolové pevnosti betonu

($\sigma_a = F_c/3$), toto napětí se udržuje po dobu 60 sekund a poté se zaznamenává výsledné přetvoření [11].

Statický modul pružnosti E_c je dán následujícím vztahem:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_0}{\varepsilon_a - \varepsilon_0} \quad (4)$$

Kde: E_c = statický modul pružnosti [GPa]

σ_a = horní zatěžovací napětí [MPa]

σ_0 = základní napětí tj. 0,5 MPa

ε_a = průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [-]

ε_0 = průměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí [-]

Výsledek se vyjádří v GPa na tři platné číslice.

5.5 Pevnost v tahu ohybem

Podstatou zkoušky je vystavení hranolových těles ohybovému momentu od horních zatěžovacích a spodních podpěrných válečků. Největší dosažené zatížení v kN se zaznamenává a vypočte se z něj pevnost v tahu ohybem. Zařízení se skládá ze dvou podpěrných válečků a horních dvou zatěžovacích válečků, které jsou kloubově připojeny k lisu tak, aby bylo zatížení rovnoměrně rozneseno mezi oba válečky, současně zatěžovací lis musí vyhovovat požadavků uvedených v ČSN EN 12390-4 [9].

Dotykové plochy lisu a tělesa musí být před zatěžováním zbaveny nečistot a vody, těleso je nutno umístit centricky s ohledem na geometrii zatěžování. Rychlost zatěžování je udávána jako konstantní v rozsahu 0-04 – 0,06 MPa [13].

Pevnost v tahu ohybem je dána:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2} \quad (5)$$

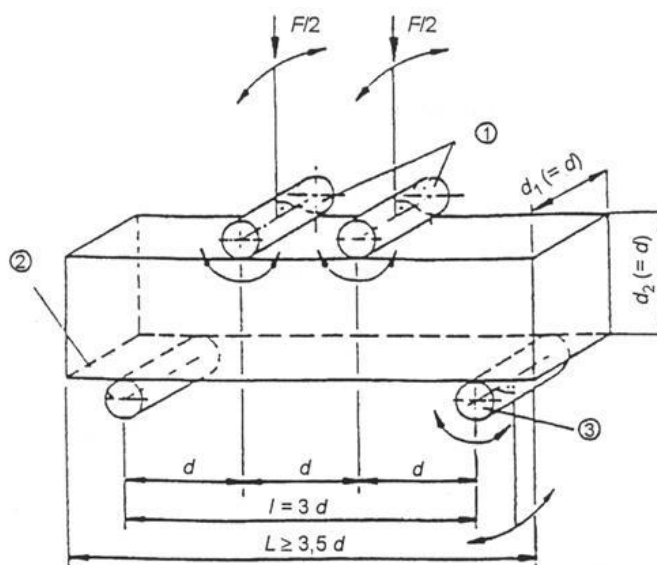
Kde: f_{cf} = pevnost v tahu ohybem [MPa]

F = maximální dosažená síla v N

l = vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d_1 a d_2 = rozměry příčného řezu tělesa [mm]

Výsledek je zaokrouhlený na 0,1 MPa.



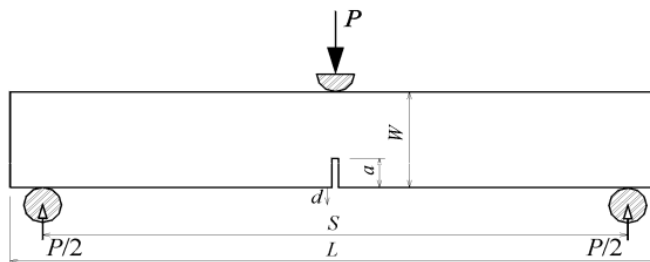
Obr. 11: Uspořádání zatěžovaného tělesa ve čtyřbodovém ohybu [13]

- Legenda: 1 – zatěžovací válečky (otočné a výkyvné),
 2 – podpěrný váleček,
 3 – podpěrný váleček (otočný a výkyvný).

5.5 Lomová energie betonu

Lomová energie betonu G_f je jedním z údajů zadávaných do specifikace materiálu pro program Atena 3D. Pro stanovení lomových charakteristik slouží, mimo jiné zkouška tříbodovým ohybem, při které je zkušební tělesu upraveno zářezem přibližně do jedné třetiny výšky. V průběhu zkoušky se zaznamenává průhyb a zatěžovací síla. Přítěžování se provádí přírůstkem deformace a zkouška probíhá do úplného vzniku trhliny po celé části průřezu. Výstupem této zkoušky je efektivní lomová energie betonu.

Pro zkoušku byly použity tři hranoly o základních rozměrech 100x100x400 mm. Každý z hranolů byl opatřen zářezem uprostřed rozpětí, který zasahoval přibližně do jedné třetiny výšky hranolu. Těleso bylo usazeno do ocelového rámu, který zajišťuje tříbodový ohyb



Obr. 12: Konfigurace zkoušky lomové energie

ve zkušebním lisu. Vzorky byly zatěžovány deformací rychlostí 0,05 mm/min do porušení vzorku. Pro měření deformací byl vzorek osazen indukčnostními snímači dráhy. Výsledky byly zaznamenávány do vyhodnocovacího zařízení a následně exportovány a upraveny pomocí program Excel [14].

Hodnota lomové energie betonu se stanoví dle vzorce:

$$G_f = \frac{A_F}{BW} \quad (6)$$

Kde: G_f = průměrná lomová energie betonu [J/m^2]

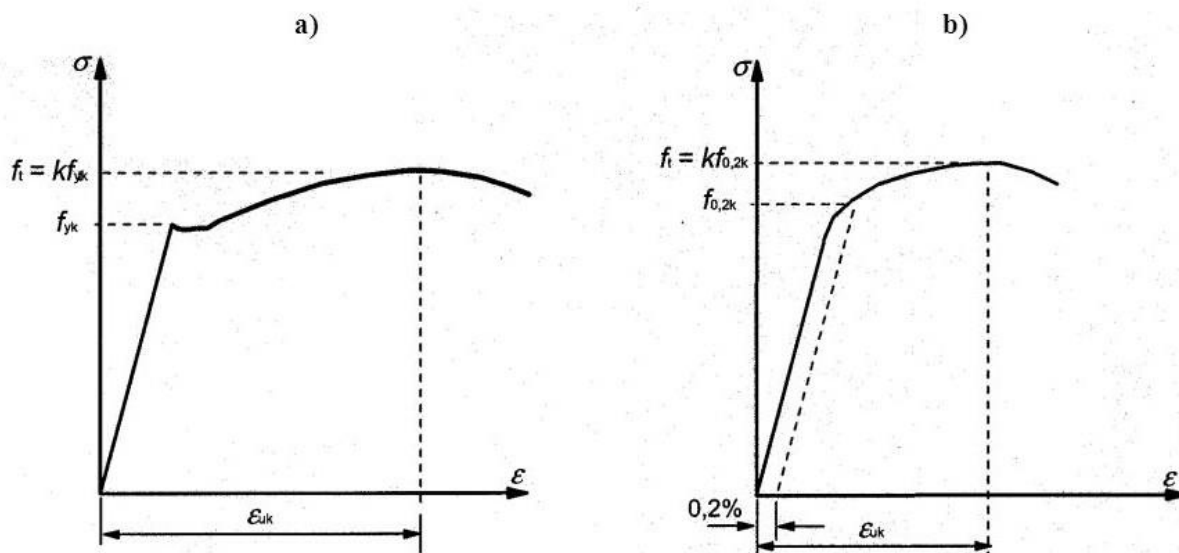
A_F = práce působící síly [J]

BW = plocha průřezu ligamentu [m^2]

5.6 Tahová zkouška výztuže za okolní teploty

Jedná se o deformaci zkušebního prvku tahovým zatížením, obvykle do lomu, za účelem stanovení jedné nebo více mechanických vlastností oceli. Jelikož je předmětem této zkoušky betonářská výztuž, nemusí se tělesa nijak obrábět ani upravovat.

Těleso bylo pro zkoušku upevněno do lisu pomocí čelistí a osazeno dvěma indukčnostními snímači pro měření prodloužení prvku. Výsledky obou hodnot byly zprůměrovány. U výztuží s výraznou mezí kluzu (výrobním postupem za tepla válcovaných) byla výsledná mez kluzu stanovena jako průměrná mezi horní mezí kluzu R_{eH} (maximální hodnota napětí před prvním poklesem zatížení) a R_{eD} (nejnižší hodnota napětí během plastického kluzu ignorující veškeré počáteční jevy. U výztuží bez výrazné meze kluzu byla výsledná mez kluzu stanovena jako smluvní a to 0,2 % z celkového přetvoření [15].



Obr. 13: Pracovní diagram výztuže, a) ocel za tepla válcovaná, b) ocel za studena tvářená [15]

Hodnota modulu pružnosti byla stanovena podle změny napětí ΔR a odpovídající změny přetvoření $\Delta \epsilon$ měřené na vzestupné větvi grafu v mezi úměrnosti.

$$E_s = \frac{\Delta R}{\Delta \epsilon} \quad (7)$$

Kde: E_s = modul pružnosti oceli [GPa]

ΔR = změna napětí [MPa]

$\Delta \epsilon$ = odpovídající změna přetvoření [-]

5.7 Výsledky doprovodných zkoušek

V tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty výsledků doprovodných zkoušek.

Tab. 3: Vyhodnocení zkoušek betonu

Krychelná pevnost v tlaku (krychle)	$f_{c,cube} = 56,4 \text{ MPa}$
Krychelná pevnost v tlaku (vývrty)	$f_{c,cube} = 53,0 \text{ MPa}$
Pevnost v prostém tahu	$f_{c,t} = 3,3 \text{ MPa}$
Pevnost v tahu ohybem	$f_{c,f} = 4,6 \text{ MPa}$
Statický modul pružnosti	$E_c = 30,7 \text{ GPa}$
Specifická lomová energie	$G_f = 2,02 \cdot 10^{-4} \text{ J/m}^2$

Zatřídění betonu dle ČSN EN 206 [16] (krychle):

- Kritérium 1

$$f_{ci,min} \geq f_{ck} - 4$$

$$f_{ci,min} = 54,5 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} - 4 = 50 - 4 = 46 \text{ MPa}$$

$$\underline{54,5 \text{ MPa} \geq 46 \text{ MPa}}$$

- Kritérium 2

$$f_{cm,min} \geq f_{ck} + 4$$

$$f_{cm,min} = 55,8 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} + 4 = 50 + 4 = 54 \text{ MPa}$$

$$\underline{54,5 \text{ MPa} \geq 54 \text{ MPa}}$$

- dle obou kritérií beton vyhovuje třídě C 40/50.

Zatřídění betonu dle ČSN EN 13791 [17] (jádrové vývrty):

- $f_{ck,is} = \min \{f_{m(n),is} - k; f_{is,nejmenší} + 4\}$

$$f_{m(n),is} - k = 53,0 - 7 = 46,0 \text{ MPa}$$

$$f_{is,nejmenší} + 4 = 51,4 + 4 = 55,4 \text{ MPa}$$

$$\underline{f_{ck,is} = \min \{46,0; 55,4\} \text{ MPa} = 46,0 \text{ MPa}}$$

Dle EN 206 [16] se provádí zatřídění válcových těles dle poměru $f_{ck, is}$ v konstrukci ku f_{ck} normových těles, který je stanoven jako 0,85. Zatřídění se provede dle tabulky.

Tab. 4: Úryvek tabulky pro zatřídění pevnosti betonu v tlaku v konstrukci [16]

Pevnostní třída betonu	Poměr $f_{ck, is}$ ku f_{ck}	$f_{ck, is, cyl}$ [N/mm²]	$f_{ck, is, cube}$ [N/mm²]
C 20/25	0,85	17	21
C 25/30	0,85	21	26
C 30/37	0,85	26	31
C 35/45	0,85	30	38
C 40/50	0,85	34	43
C 45/55	0,85	38	47

- dle uvedených parametrů beton vyhovuje třídě C 40/50

Tab. 5: Vyhodnocení tahové zkoušek oceli $\phi 6mm$

Smluvní mez kluzu	$f_{y(0,2)} = 533,8$ MPa
Mez pevnosti	$f_u = 653,3$ MPa
Modul pružnosti	$E_s = 200,5$ GPa

Tab. 6: Vyhodnocení tahové zkoušky oceli $\phi 10mm$

Mez kluzu	$f_y = 599,3$ MPa
Mez pevnosti	$f_u = 693,2$ MPa
Modul pružnosti	$E_s = 199,4$ GPa

6. Numerická analýza

6.1 Základní informace

Pro porovnání výsledků experimentu a výsledků ručního normového výpočtu bylo zvoleno vymodelování zkušební desky v programu firmy Červenka Consulting – Atena 3D.

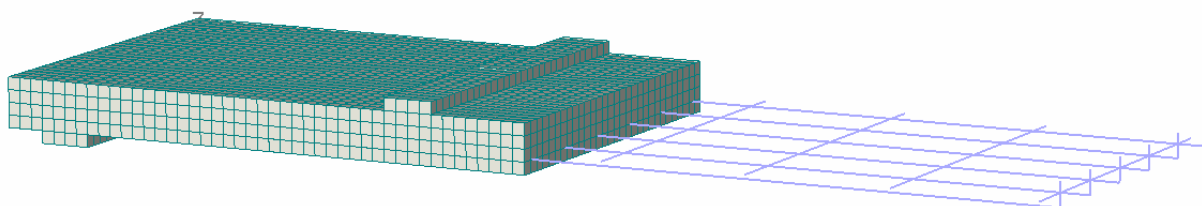
Program Atena 3D je navržen pro 3D nelineární analýzu chování konstrukce se speciálními funkcemi pro vyztužené betonové prvky. Software však dokáže pracovat i s jinými materiály, například zeminami nebo ocelí. Atena má tři hlavní funkce:

- preprocesor, specifikace geometrie prvků, výztuže, zatížení, podepření, materiálové charakteristiky apod.,
- analýza, umožňující v reálném čase sledovat průběh výsledků při výpočtu,
- postprocesor, který nabízí přístup k nahlížení do výsledků analýzy v numerické i grafické podobě.

Výhodou programu je sledování chování konstrukce z pohledu tvorby a rozšiřování trhlin [18].

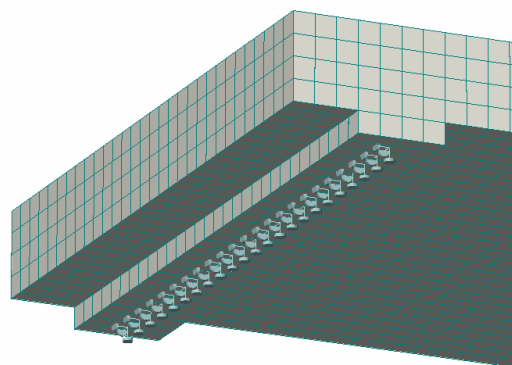
6.2 Model konstrukce

Pro zadání materiálů byly použity hodnoty stanovené z doprovodných zkoušek materiálů, uvedených v kapitole 5.7. Materiál betonu byl zadán jako SBETA model pomocí údajů o tlakové pevnosti, tahové pevnosti, modulu pružnosti a specifické lomové energie. Ocel byla zadána pomocí multilinerárního diagramu, který umožňuje pomocí ručního zadání bodů vytvořit pracovní diagram oceli. Pro simulaci roznášecích prvků byly v místech zatěžování a podpor vytvořeny ocelové pásy z bilineární oceli.

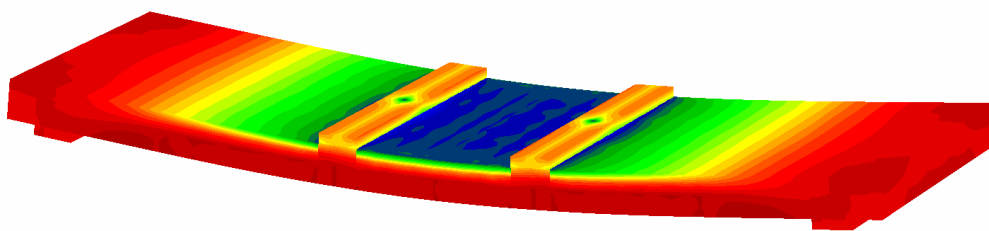


Obr. 14: Model desky v řezu s vymodelovanou výztuží

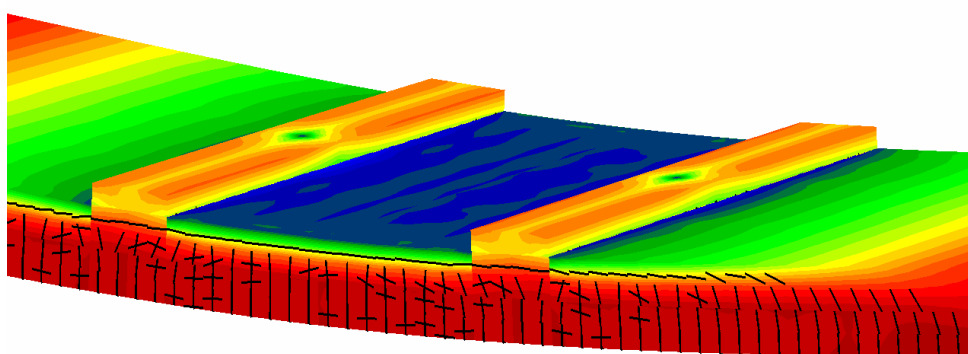
Podepření bylo vymodelováno jako liniové, levá podpora jako posuvná, pravá podpora pevná, dle statického schématu. Zatěžování bylo stanoveno přírůstkem deformace. Konečný model byl rozdělen na konečné prvky o velikosti hrany 0,02 m, po výšce byly vytvořeny čtyři konečné prvky. Pro záznam potřebných údajů byl model osazen monitory napětí (ve výztuži a tlačené části betonu), monitory deformací (dolní okraj uprostřed rozpětí) a monitorem reakcí pro vyhodnocení zatěžovací síly. Výpočet probíhal pomocí analýzy Newton-Raphson.



Obr. 15: Liniové pevné podepření



Obr. 16: Isoplochy napětí a průhyb (trojnásobně převýšený) při dosažení meze únosnosti



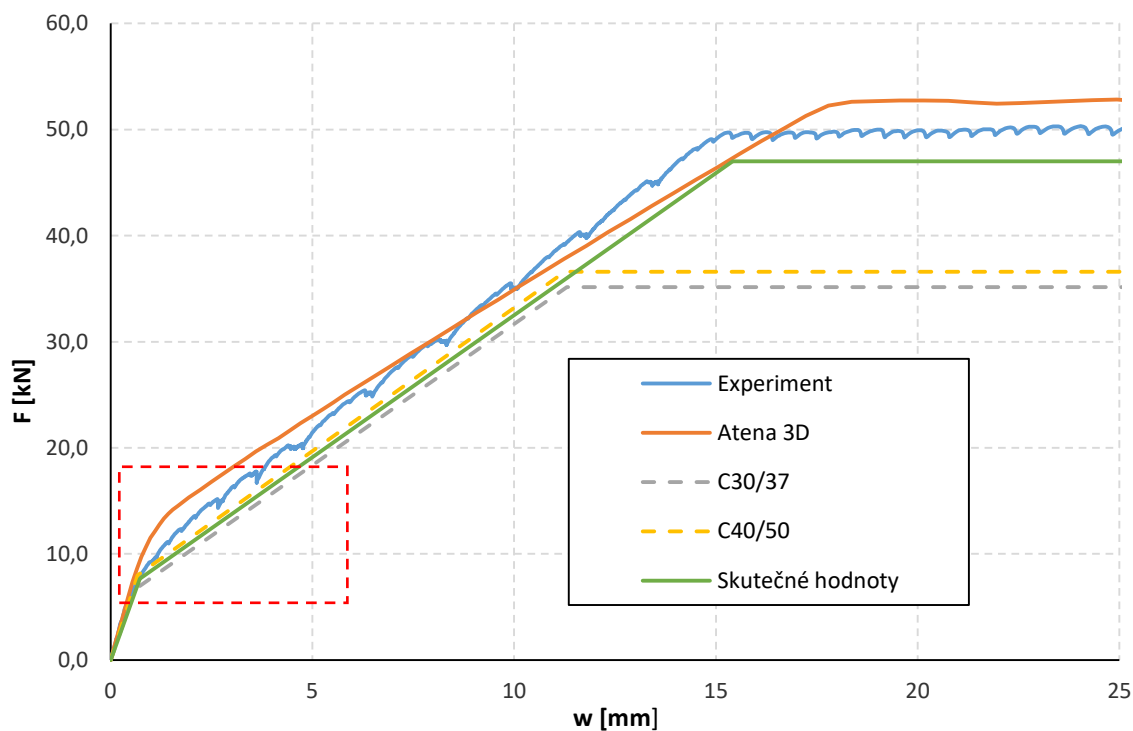
Obr. 17: Simulace trhlin v tažené oblasti betonu při dosažení meze únosnosti

Zatěžování bylo zvoleno pomocí přírůstku deformace z důvodu nepřesvědčivých výsledků při zatěžování silou. Přitěžování probíhalo v krocích s postupným zvětšováním deformace, celkem bylo počítáno 81 kroků výpočtu.

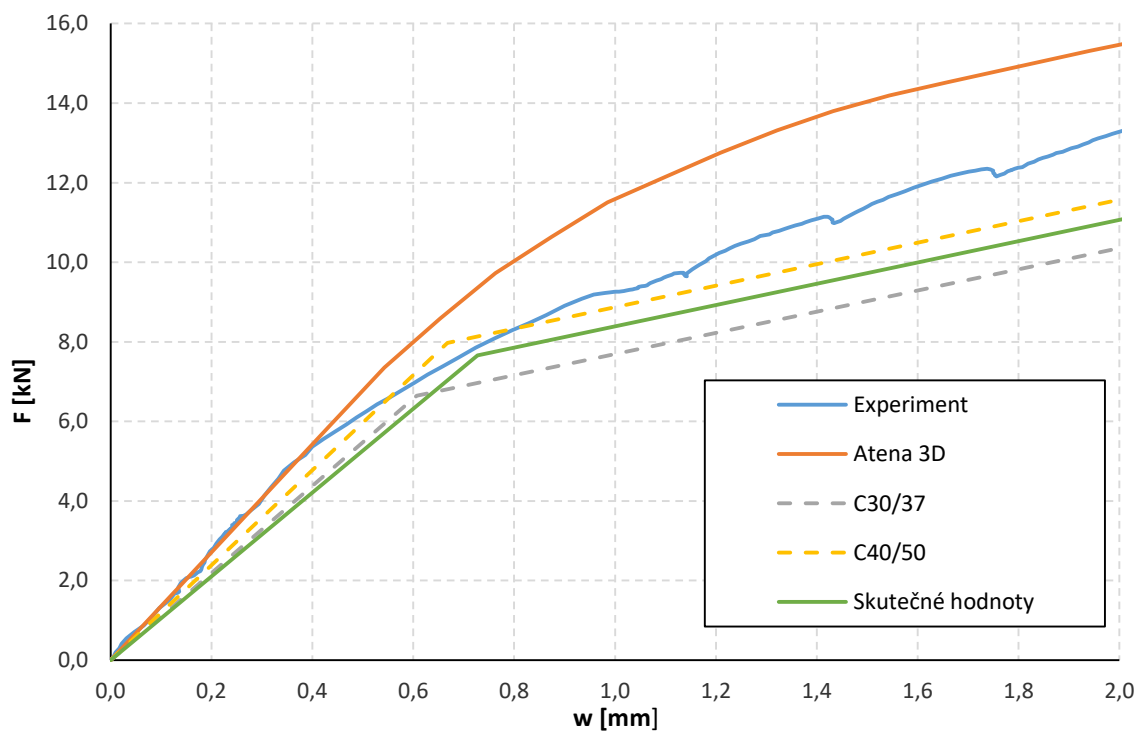
Zatěžovací stavy a výpočtové kroky:

- ZS1: Vlastní tíha,
- ZS2: Podpory 2-1 1 krok,
- ZS3: Přírůstek deformace 0,1 mm 2-3 15 kroků,
- ZS4: Přírůstek deformace 0,25 mm 2-4 15 kroků,
- ZS5: Přírůstek deformace 0,5 mm 2-5 35 kroků,
- ZS6: Přírůstek deformace 1,0 mm 2-6 15 kroků.

7. Porovnání výsledků



Graf 3: Grafické srovnání všech výsledků



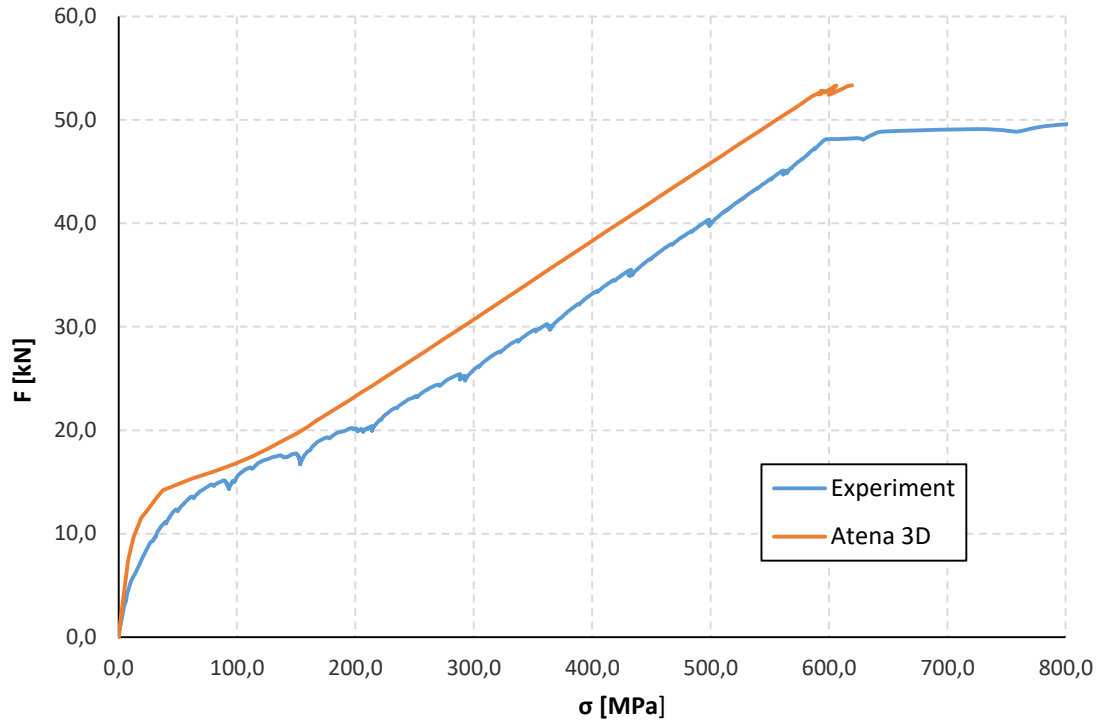
Graf 4: Detail oblasti vzniku trhliny

Tab. 7: Číselné porovnání výsledků

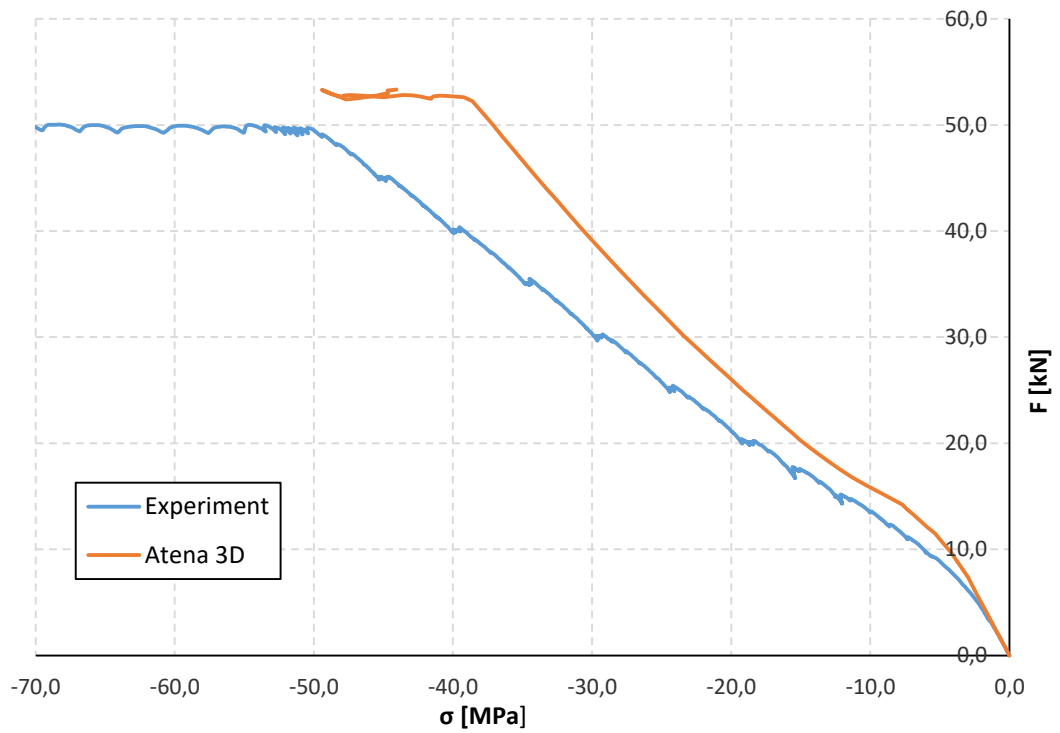
	Experiment	Atena 3D	C 30/37	C 40/50	Skut. hodnoty
Síla na mezi vzniku trhlin F_{cr}	5,37 kN	8,59 kN	6,65 kN	7,98 kN	7,65 kN
Porovnání meze vzniku trhlin	100 %	160,0 %	123,8 %	148,6 %	142,5 %
Průhyb na mezi vzniku trhlin w_{cr}	0,40 mm	0,65 mm	0,61 mm	0,67 mm	0,73 mm
Porovnání průhybu na mezi vzniku trhlin	100%	162,5 %	152,5 %	167,5 %	182,5 %
Síla na mezi únosnosti F_{Rd}	49,39 kN	52,26 kN	35,15 kN	36,60 kN	52,30 kN
Porovnání meze únosnosti	100 %	105,8 %	71,2 %	74,1 %	105,9 %
Průhyb na mezi únosnosti w_{Rd}	15,10 mm	17,79 mm	11,31 mm	11,26 mm	17,20 mm
Porovnání průhybu na mezi únosnosti	100 %	117,8 %	74,9 %	74,6 %	113,9 %

Mezi základní sledované a porovnávané hodnoty při analýzách byly síly na mezi vzniku trhlin a síly při dosažení únosnosti prvku a jejich odpovídající průhyby. Dalšími stanovovanými parametry bylo napětí v tlačené části betonu uprostřed rozpětí a tahové napětí v hlavní výztuži. Tyto dva parametry byly vyhodnocovány pouze z experimentu a ze softwarové analýzy v Ateně 3D.

Při grafickém porovnání výsledků lze pozorovat téměř splývající mez vzniku trhlin (Graf 3) a mez únosnosti stanovenou experimentálně a numericky (se skutečnými hodnotami). Při analýze s normovými parametry dle EC [19] můžeme vidět snížení meze únosnosti v závislosti použití bezpečnostních součinitelů γ_c a γ_s .



Graf 5: Srovnání napětí ve výztuži



Graf 6: Srovnání napětí v tlačené části betonu

8. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a provést experimentální zatěžovací zkoušku železobetonové, prostě vyztuženého prvku (desky). Dalšími cíli bylo stanovení fyzikálních a mechanických vlastností betonu a oceli stanovených na zkušebních tělesech, která byla vyrobena souběžně při betonáži prvku. Některé parametry z těchto zkoušek (pevnost v tlaku, pevnost v tahu, objemová hmotnost, lomová energie betonu, modul pružnosti betonu a oceli a pevnostní údaje výztuže) byly použity pro analýzu prvku konstrukce v softwaru Atena 3D, který je založen na metodě konečných prvků a také pro ruční výpočet dle platného Eurokódu. Statický výpočet dle EC byl prováděn ve třech stupních (pro návrhové parametry, charakteristické parametry a skutečné parametry). Výsledky všech analýz byly následně srovnány.

Po vyhodnocení hlavních kontrolovaných hodnot (síla a průhyb na mezi vzniku trhlin, síla a průhyb na mezi únosnosti) je zřejmé, že došlo k uspokojivému výsledku ve všech použitých metodách analýzy a cíl práce je tedy splněn, můžeme tedy tvrdit, že jak analýza metodou konečných prvků, tak i ruční výpočet poměrně přesně kopírují průběh experimentu.

Pro další možnosti výzkumu je možné použít metodicky stejnou zatěžovací zkoušku, ale za zkušební těleso zvolit jiný prvek, o složitějším průřezu nebo složitějším vyztužení, s jiným statickým schématem apod. Také je možno tento experiment rozšířit o moderní metody zlepšování mechanických vlastností materiálů (použití drátkobetonu, recyklátu), popřípadě dodatečným zpevněním hotového tělesa (například pomocí externí lepené výztuže apod.).

9. Použitá literatura

- [1] ČSN 73 2030. *Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí: Společná ustanovení*. 1994.
- [2] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1816-8.
- [3] POLÁK, Michal. *Experimentální ověřování konstrukcí 10*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-2032-0.
- [4] ANTON, Ondřej. *Základy zkušebnictví: návody do cvičení*. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2079-0.
- [5] CIKRLE, Petr, Ondřej ANTON, Petr DANĚK, Barbara KUCHARCZYKOVÁ, Petr MISÁK a Tereza KOMÁRKOVÁ. *NDT Zkušebnictví ve stavebnictví: Příručka kurzu CŽV*. 1. Brno, 2016.
- [6] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. 2013.
- [7] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 2009.
- [8] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2009.
- [9] ČSN EN 12390-4. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy*. 2001.
- [10] SCHMID, Pavel. *Zkušebnictví a technologie: Modul BI02-M02 Stavební zkušebnictví*. 1. Brno, 2006.
- [11] HORÁK, Vladislav. *Mechanika Hornin: Modul BF05-M01 Laboratoř mechaniky hornin*. Brno, 2006.
- [12] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. 2016.
- [13] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 2009.
- [14] KERŠNER, Zbyněk. *Křehkost a lomová mechanika cementových kompozitů: Brittleness and fracture mechanics of cement-based composites : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2005. ISBN 8021430729.
- [15] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2017.
- [16] ČSN EN 206. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 1. vyd. 2014.

- [17] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. 2007.
- [18] ČERVENKA, Vladimír a Jan ČERVENKA. *ATENA Program documentation Part 2-2: User's Manual for ATENA 3D*. Praha, 2017.
- [19] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. 2006.

10. Seznam grafů

<i>Graf 1: Průběh zatěžovací zkoušky.....</i>	<i>23</i>
<i>Graf 2: Průměrný průhyb uprostřed rozpětí v závislosti na zatížení.....</i>	<i>23</i>
<i>Graf 3: Grafické srovnání všech výsledků.....</i>	<i>36</i>
<i>Graf 4: Detail oblasti vzniku trhliny.....</i>	<i>36</i>
<i>Graf 5: Srovnání napětí ve výztuži.....</i>	<i>38</i>
<i>Graf 6: Srovnání napětí v tlačené části betonu.....</i>	<i>38</i>

11. Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Přehled zkušebních těles a realizovaných zkoušek.....</i>	<i>11</i>
<i>Tab. 2: Přehled součinitelů důležitých pro posuzování betonových konstrukcí zkoušených dle 16</i>	<i></i>
<i>Tab. 3: Vyhodnocení zkoušek betonu</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4: Úryvek tabulky pro zařídění pevnosti betonu v tlaku v konstrukci.....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 5: Vyhodnocení tahové zkoušek oceli $\phi 6\text{mm}$</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 6: Vyhodnocení tahové zkoušky oceli $\phi 10\text{mm}$</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 7: Číselné porovnání výsledků</i>	<i>37</i>

12. Seznam obrázků

Obr. 1: Základní rozměry prvku.....	10
Obr. 2: Schéma vyztužení zkušebního prvku	10
Obr. 3: Schéma zatěžovacího cyklu.....	15
Obr. 4: Sortiment liniových foliových odporových tenzometrů firmy HBM.....	17
Obr. 5: Indukční snímače firmy HBM.....	18
Obr. 6: Schéma zatěžovací zkoušky	19
Obr. 7: Rozmístění snímačů v řezu.....	21
Obr. 8: Rozmístění snímačů v půdorysu	21
Obr. 9: Dosažení meze únosnosti při zatěžovací zkoušce	22
Obr. 10: Průběh zkoušení pevnosti betonu v tlaku	25
Obr. 11: Uspořádání zatěžovaného tělesa ve čtyřbodovém ohybu.....	28
Obr. 12: Konfigurace zkoušky lomové energie	29
Obr. 13: Pracovní diagram výtzuže, a) ocel za tepla válcovaná, b) ocel za studena tvářená.....	30
Obr. 14: Model desky v řezu s vymodelovanou výtzuží.....	33
Obr. 15: Liniové pevné podepření.....	34
Obr. 16: Isoplochy napětí a průhyb (trojnásobně převyšeny) při dosažení meze únosnosti	34
Obr. 17: Simulace trhlin v tažené oblasti betonu při dosažení meze únosnosti	34

13. Seznam příloh

Příloha P1 – Výkres provedení železobetonové desky

Příloha P2 – Fyzikální a mechanické vlastnosti betonu a oceli

Příloha P3 – Vyhodnocení zatěžovací zkoušky

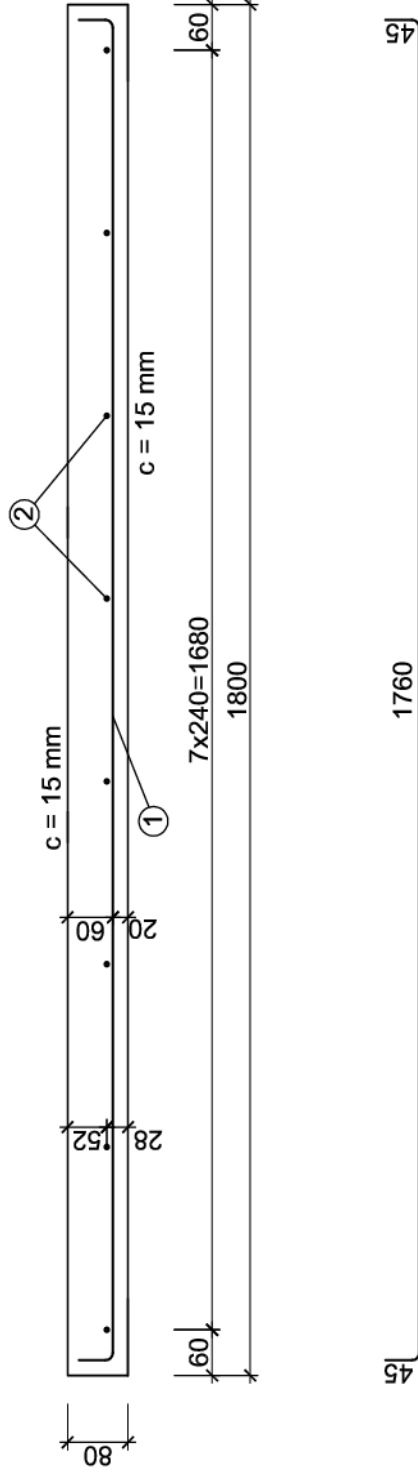
Příloha P4 – Numerická analýza

Příloha P5 - Fotodokumentace

PŘÍLOHA P1
VÝKRES PROVEDENÍ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY

VÝKRES PROVEDENÍ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY

M 1:10



① $\phi 10$ po 110/1850/6 ks

570

② r.v. $\phi 6$ po 240/570/8 ks

SPECIFIKACE VÝZTUŽE

	PROFIL [mm]	KS	DÉLKA [m]	B 500 B		
				$\phi 6$	$\phi 10$	
1	10	6	1,85		11,10	
2	6	8	0,57	4,56		
DÉLKA [m]				4,56	11,10	
HMOTNOST [kg/m]				0,222	0,617	
HMOTNOST [kg]				1,0	6,9	
HMOTNOST CELKEM [kg]				7,9		

KRYTÍ VÝZTUŽE 15 mm
 STUPEŇ VLIVU PROSTŘEDÍ XC0
 SOUČINITEL SPOLEHLIVOSTI KFI = 1,0
 KONZISTENCE ČERSTVÉHO BETONU S3

BETON C 30/37
OCEL B 500 B

NAVŘENO DLE ČSN EN 1992-1-1

PŘÍLOHA P1	
VÝKRES PROVEDENÍ ŽELEZOBETONOVÉ DESKY	MĚŘITKO 1:10
LUKÁŠ JEDLIČKA	FORMÁT 1xA4

PŘÍLOHA P2
FYZIKÁLNĚ MECHANICKÉ VLASTNOSTI BETONU A
OCELI

Obsah

1. Fyzikální a mechanické vlastnosti betonu	3
2. Fyzikální a mechanické vlastnosti betonu (jádrové vývrty)	4
3. Geometrie zkušebních těles (hranolů), stanovení obj. hmotnosti; princip zkoušení	5
4. Stanovení hranolové pevnosti v tlaku	5
5. Pevnost v tahu ohybem	6
6. Stanovení modulu pružnosti	6
7. Pevnost betonu v prostém tahu	7
8. Stanovení lomových parametrů betonu	7
9. Fyzikálně mechanické vlastnosti oceli	9

1. Fyzikální a mechanické vlastnosti betonu

Tab. P2-1 Fyzikálně mechanické vlastnosti betonu

ozn.	výroba	zkoušení	stáří	prům. rozměry			hmotnost
	[datum]	[datum]	[dnů]	a ₁	a ₂	a ₃	m
				[mm]	[mm]	[mm]	[g]
K1	24.3.2017	27.4.2017	28	148,31	149,99	150,12	7643,3
K2				148,83	150,15	149,95	7712,3
K3				148,52	150,61	150,64	7781,3
K4				148,39	150,19	150,09	7715,9
K5				149,61	150,02	149,90	7716,8
K6				147,93	150,01	150,02	7678,4

ozn.	obj. hmotnost		síla	krychelná pevnost		
	D		F	f_{c,cube}		
	[kg/m ³]		[kN]	[MPa]		
K1	2290	2300	1257,4	56,5	56,4	
K2	2300		1239,3	55,5		
K3	2310		1313,2	58,7		1,4
K4	2310		1254,2	56,3		2,5
K5	2290		1269,4	56,6		
K6	2310		1209,8	54,5		

Pozn.: **2300** aritmetický průměr hodnot sledovaných veličin
9,8 výběrová směrodatná odchylka
0,4 variační koeficient [%]

2. Fyzikální a mechanické vlastnosti betonu (jádrové vývrty)

Tab. P2-2 Fyzikálně mechanické vlastnosti betonu (jádrové vývrty)

ozn.	výroba	odběr	zkoušení	prům. rozměry		hmotnost	objemová hmotnost	
				d	v	m	D	
	[datum]	[datum]	[datum]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	
V1	24.3.2017	5.5.2017	10.5.2017	74,00	76,22	765,5	2340	2340 22 0,9
V2				74,03	76,31	775,2	2360	
V3				74,02	76,03	764,7	2340	
V4				74,00	76,36	761,1	2320	
V5				74,00	75,66	748,7	2300	
V6				74,04	70,74	715,4	2350	

Tab. P2-3 Stanovení krychelné pevnosti jádrových vývrťů

ozn.	síla	štíhlost tělesa	opravný součinitel	převodní součinitel	převodní součinitel	pevnost vzorku	válcová pevnost	krychelná pevnost	
	F	i	k_c	k_{c,cyl}	k_{c,cube}	f_c	f_{c,cyl}	f_{c,cube}	
	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
V1	238,8	1,03	0,86	0,928	1,22	55,5	44,3	54,0	53,0 1,3 2,4
V2	233,5	1,031	0,861	0,928	1,221	54,3	43,4	53,0	
V3	243,6	1,027	0,859	0,928	1,218	56,6	45,1	54,9	
V4	230,8	1,032	0,861	0,928	1,222	53,7	42,9	52,4	
V5	232,0	1,022	0,858	0,928	1,222	53,9	42,9	52,4	
V6	235,2	0,955	0,829	0,928	1,224	54,6	42,0	51,4	

Pozn.: **2340**

22

0,9

aritmetický průměr hodnot sledovaných veličin

výběrová směrodatná odchylka

variační koeficient [%]

3. Geometrie zkušebních těles (hranolů), stanovení obj. hmotnosti; princip zkoušení

Tab. P2-4: Geometrie zkušebních těles (hranolů), stanovení obj. hmotnosti, princip zkoušení

ozn.	výroba	prům. rozměry			hmotnost	obj. hmotnost		zkouška
		d_1	d_2	L	m	D		
	[datum]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]		
H1	24.3.2017	99,89	100,57	401,14	9115,3	2260	2280	pevnost v tlaku
H2		100,22	100,82	401,21	9295,7	2290		
H3		100,27	100,41	400,04	9226,5	2290		
H4		100,10	100,46	400,80	9190,5	2280	28	modul pružnosti, 4-bodový ohyb, pevnost v tahu
H5		99,95	100,37	400,55	9169,3	2280		
H6		101,05	100,41	400,68	9082,0	2230	1,2	lomová zkouška
H7		100,08	100,73	399,85	9374,8	2330		
H8		99,55	100,18	400,20	9259,9	2320		
H9		100,69	100,29	400,50	9197,5	2270		

Pozn.: **2280** aritmetický průměr hodnot sledovaných veličin
27,8 výběrová směrodatná odchylka
1,2 variační koeficient [%]

4. Stanovení hranolové pevnosti v tlaku

Tab. P2-5 Stanovení hranolové pevnosti v tlaku

ozn.	výroba	zkoušení	stáří	prům. rozměry			síla	hranolová pevnost	
				d_1	d_2	L	F	$f_{c,beam}$	
	[datum]	[datum]	[dnů]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	
H1	24.3.2017	27.4.2017	28	99,89	100,57	401,14	464,1	46,2	45,3
H2				100,22	100,82	401,21	444,7	44,0	1,2
H3				100,27	100,41	400,04	460,8	45,8	2,6

Pozn.: **45,3** aritmetický průměr hodnot sledovaných veličin
1,2 výběrová směrodatná odchylka
2,6 variační koeficient [%]
 rychlost zatěžování 0,60 MPa/s

5. Pevnost v tahu ohybem

Tab. P2-6 Pevnost v tahu ohybem

ozn.	výroba	zkoušení	stáří	prům. rozměry			vzdálenost podpor	síla	pevnost v tahu ohybem		
				d_1	d_2	L			l	F	f_{ct}
				[datum]	[datum]	[dnů]			[mm]	[mm]	[mm]
H4	24.3.2017	27.4.2017	28	100,1	100,5	400,8	300,0	13,6	4,1	4,6	
H5				99,9	100,4	400,6	300,0	16,6	4,9	0,5	
H6				101,1	100,4	400,7	300,0	16,0	4,7	10,1	

Pozn.: **4,6** aritmetický průměr hodnot sledovaných veličin
 0,5 výběrová směrodatná odchylka
 10,1 variační koeficient [%]
 rychlost zatěžování 0,1 kN/s

6. Stanovení modulu pružnosti

Tab. P2-7 Stanovení modulu pružnosti

ozn.	výroba	zkoušení	stáří	prům. rozměry			modul pružnosti
				d_1	d_2	L	
				[datum]	[datum]	[dnů]	
H4	24.3.2017	27.4.2017	28	100,10	100,46	400,80	31,0
H5				99,95	100,37	400,55	
H6				101,05	100,41	400,68	

ozn.	dolní zatížení	dolní napětí	horní zatížení	horní napětí	rozdíl napětí	poměrné přetvoření	modul pružnosti	
	F_d	σ_d	F_h	σ_h	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon$		
	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]		
H4	5,0	0,50	150,1	14,93	14,43	0,000466	31,0	30,7
H5	5,0	0,50	150,0	14,95	14,45	0,000462	31,3	0,8
H6	5,0	0,49	150,0	14,78	14,29	0,000480	29,8	2,6

Pozn.: **30,7** aritmetický průměr hodnot sledovaných veličin
 0,8 výběrová směrodatná odchylka
 2,6 variační koeficient [%]

7. Pevnost betonu v prostém tahu

Tab. P2-8 Pevnost betonu v prostém tahu

ozn.	výroba	zkoušení	stáří	rozměry		síla	pevnost v prostém tahu	
				d_1	d_2	F	f_{ct}	
	[datum]	[datum]	[dnů]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	
H4	24.3.2017	27.4.2017	28	100,15	100,62	34,7	3,4	3,3
H5				99,97	100,32	33,8	3,4	0,1
H6				100,06	100,43	31,8	3,2	4,4

Pozn.: **3,3** aritmetický průměr hodnot sledovaných veličin
0,1 výběrová směrodatná odchylka
4,4 variační koeficient [%]

8. Stanovení lomových parametrů betonu

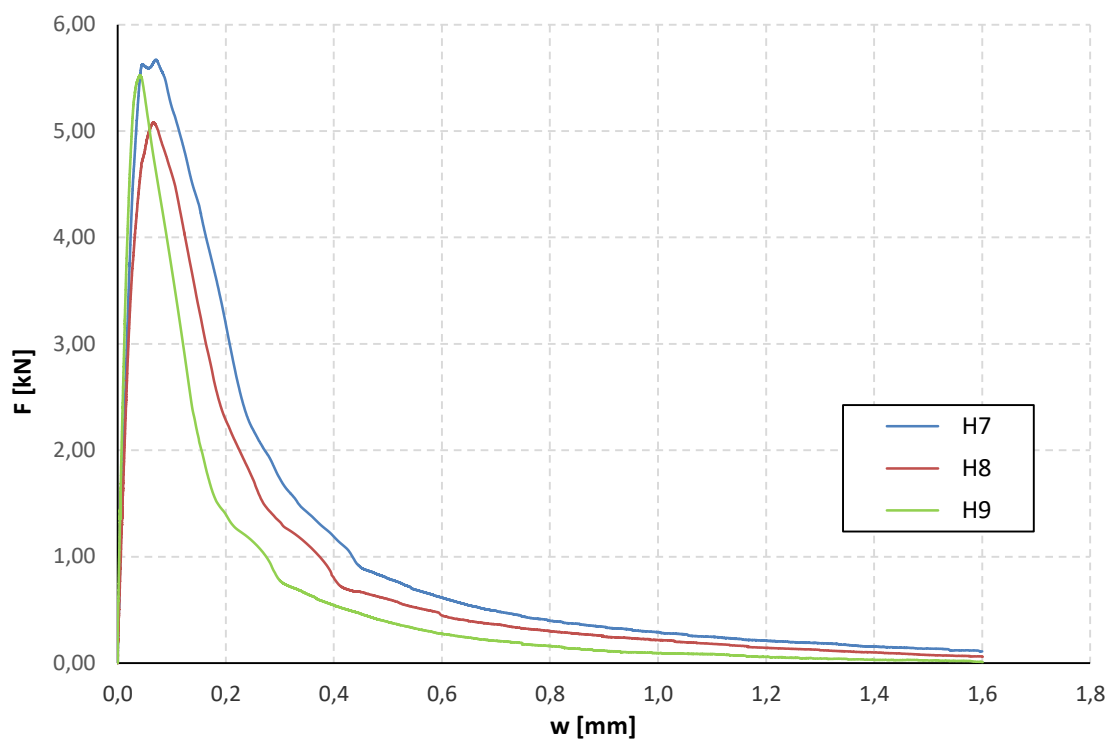
Tab. P2-9 Geometrie

ozn.	výroba	zkoušení	stáří	prům. rozměry		výška zářezu	plocha ligamentu	vzdálenost podpor
				d_1	d_2	v_z	BW	I
	[datum]	[datum]	[dnů]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm]
H7	24.3.2017	28.4.2017	29	100,08	100,73	33,87	6657,15	300,0
H8				99,55	100,18	33,23	6645,29	300,0
H9				100,69	100,29	33,13	6717,70	300,0

Tab. P2-10 Stanovení lomových parametrů a pevnosti v tahu ohybem (tříbodový ohyb)

ozn.	plocha pod křivkou	max. síla	lomová energie		pevnost v tahu ohybem	
	A_F	F	G_f		f_{cf}	
	[J]	[kN]	[J/m ²]		[MPa]	
H7	1,706	5,7	2,562E-04	2,021E-04	5,7	5,4
H8	1,343	5,1	2,021E-04	5,4E-05	5,1	0,3
H9	0,994	5,5	1,480E-04	26,8	5,5	5,4

Pozn.: **2,0E-04** aritmetický průměr hodnot sledovaných veličin
5,4E-05 výběrová směrodatná odchylka
26,8 variační koeficient [%]



Graf P2-1: Lomová energie betonu

9. Fyzikálně mechanické vlastnosti oceli

Tab. P2-11: Ocelové pruty $\phi 6\text{mm}$

prut	zkoušení	hmotnost	délka	průřezová plocha	měřená základna	smluvní mez kluzu		mez pevnosti		modul pružnosti	
		m	l	A_s	l₀	f_{y(0,2)}		f_u		E	
		[g]	[mm]	[mm ²]	[mm]	[MPa]		[MPa]		[GPa]	
6_1	27.4.2017	154,8	710	27,77	153	542,6	533,8	666,5	653,3	199,8	200,5
6_2		154,9	709	27,83	156	533,0	8,4	654,9	14,1	201,3	0,8
6_3		154,6	706	27,90	154	525,8	1,6	638,4	2,2	200,3	0,4

Tab. P2-12 : Ocelové pruty $\phi 10\text{mm}$

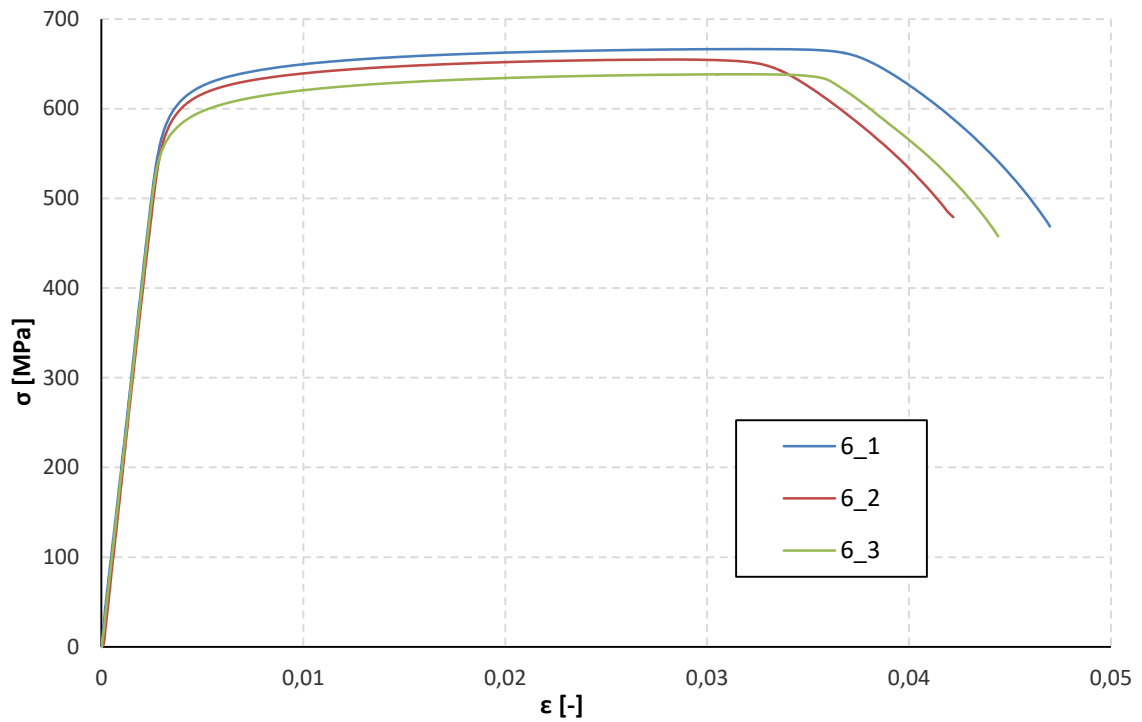
prut	zkoušení	hmotnost	délka	průřezová plocha	měřená základna	mez kluzu		mez pevnosti		modul pružnosti	
		m	l	A_s	l₀	f_y		f_u		E	
		[g]	[mm]	[mm ²]	[mm]	[MPa]		[MPa]		[GPa]	
10_1	27.4.2017	448,0	707	80,72	153	597,1	599,3	690,0	693,2	198,4	199,4
10_2		445,8	709	80,10	156	607,1	7,0	701,7	7,5	199,6	1,0
10_3		451,1	712	80,71	154	593,6	1,2	687,9	1,1	200,3	0,5

Pozn. **533,8** aritmetický průměr hodnot sledovaných veličin

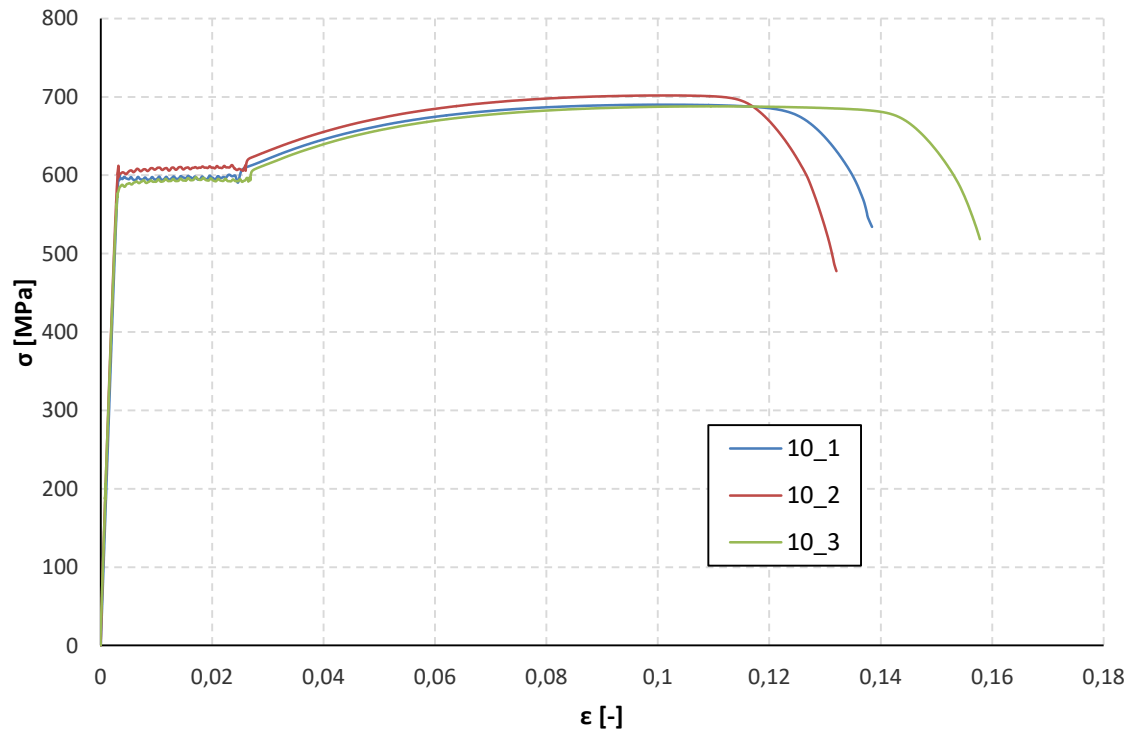
:

8,4 výběrová směrodatná odchylka

1,6 variační koeficient [%]

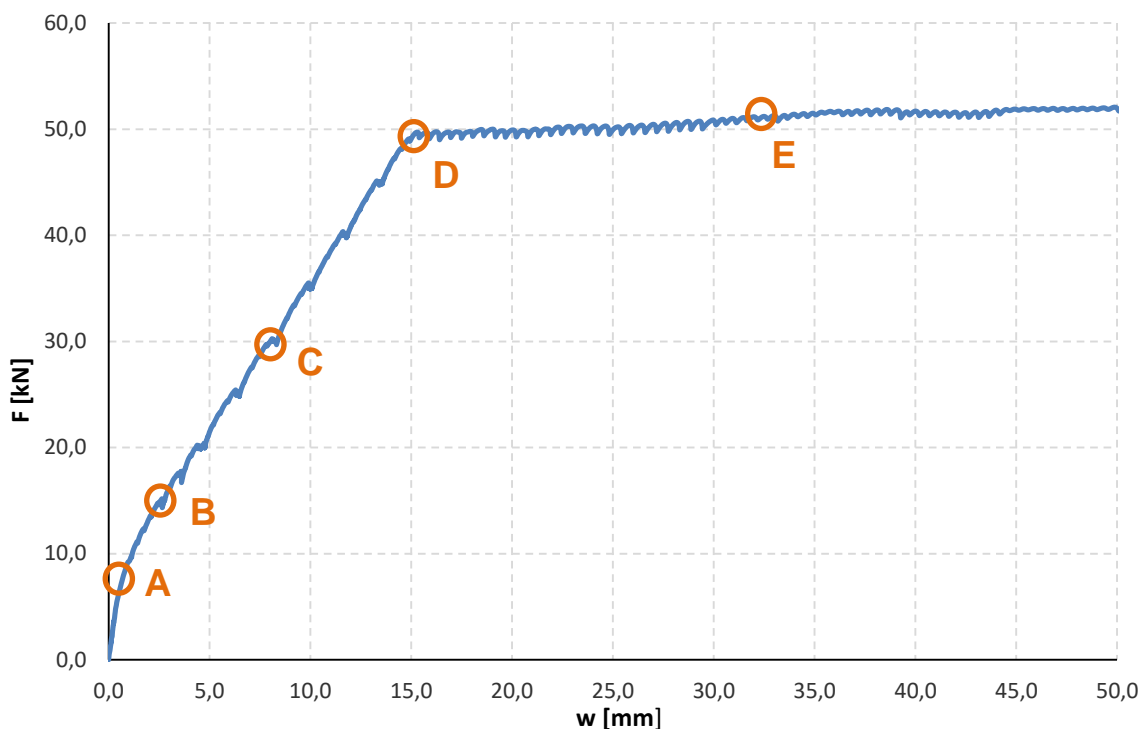


Graf P2-2: Pracovní diagram výztuže $\phi 6\text{mm}$ (za studena tvářena)



Graf P2-3: Pracovní diagram výztuže $\phi 10\text{mm}$ (za tepla válcovaná)

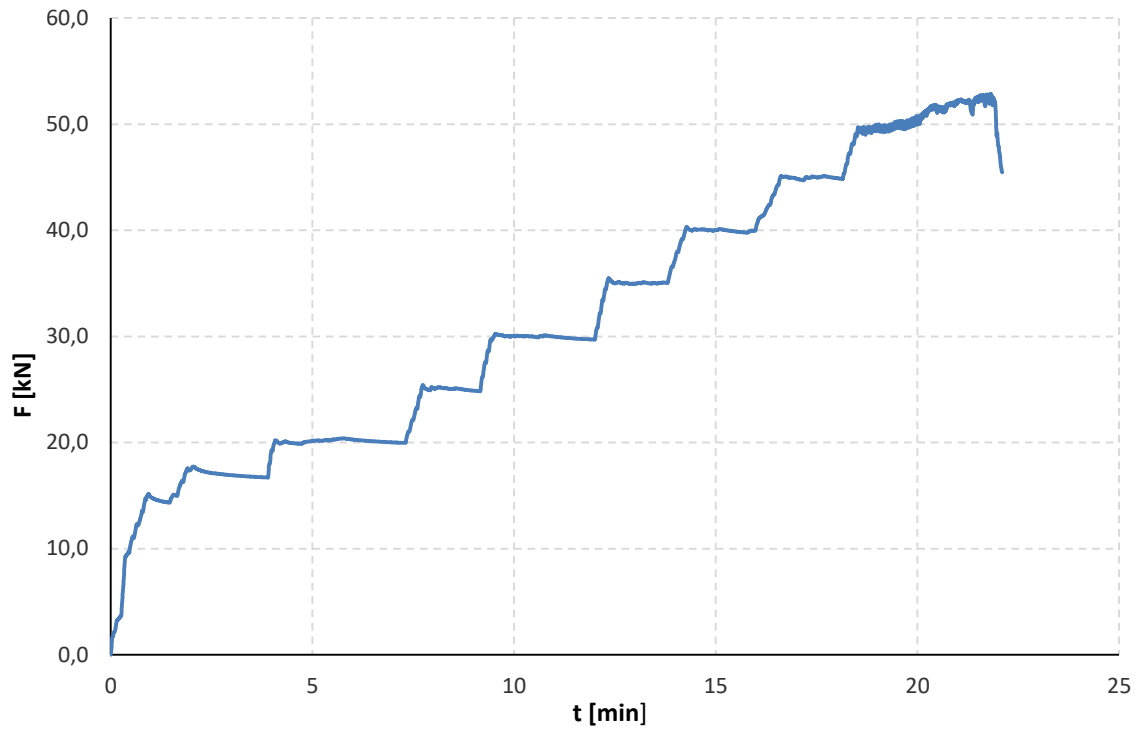
PŘÍLOHA P3
VYHODNOCENÍ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY



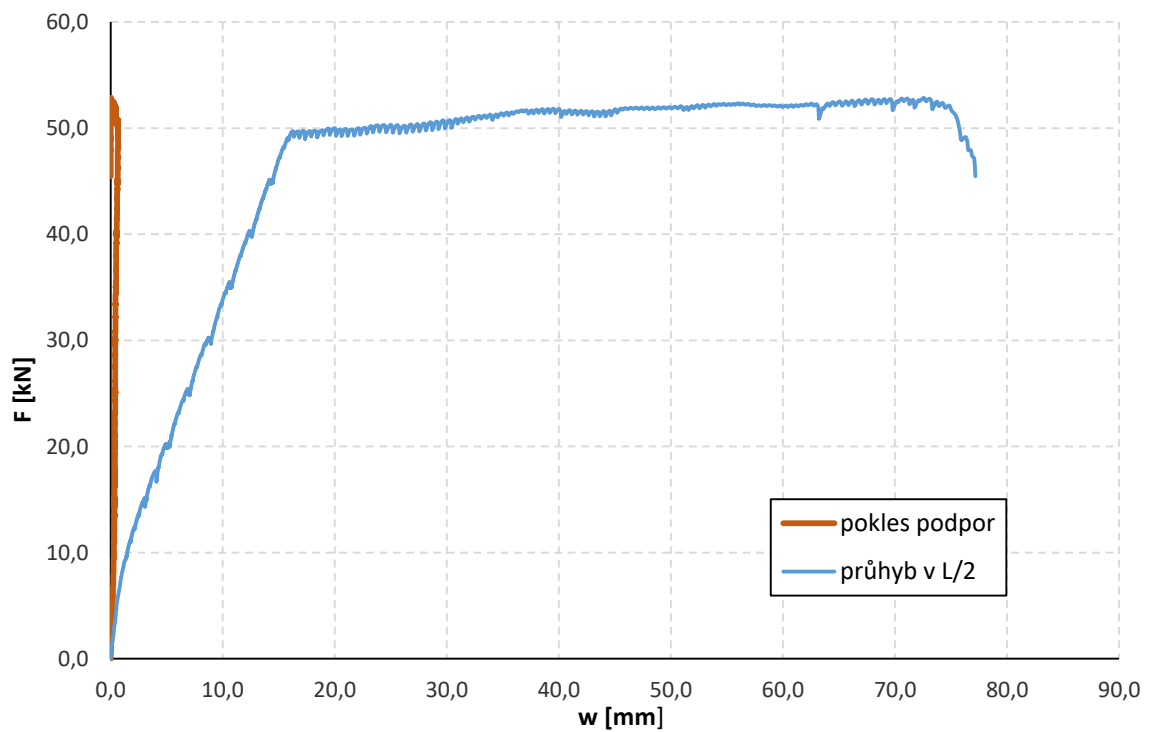
Graf P3-1: Křivka zatěžování s vyznačenými charakteristickými body

Graf lze vyznačit na jednotlivé charakteristické úseky, které popisují chování tělesa při zatěžování:

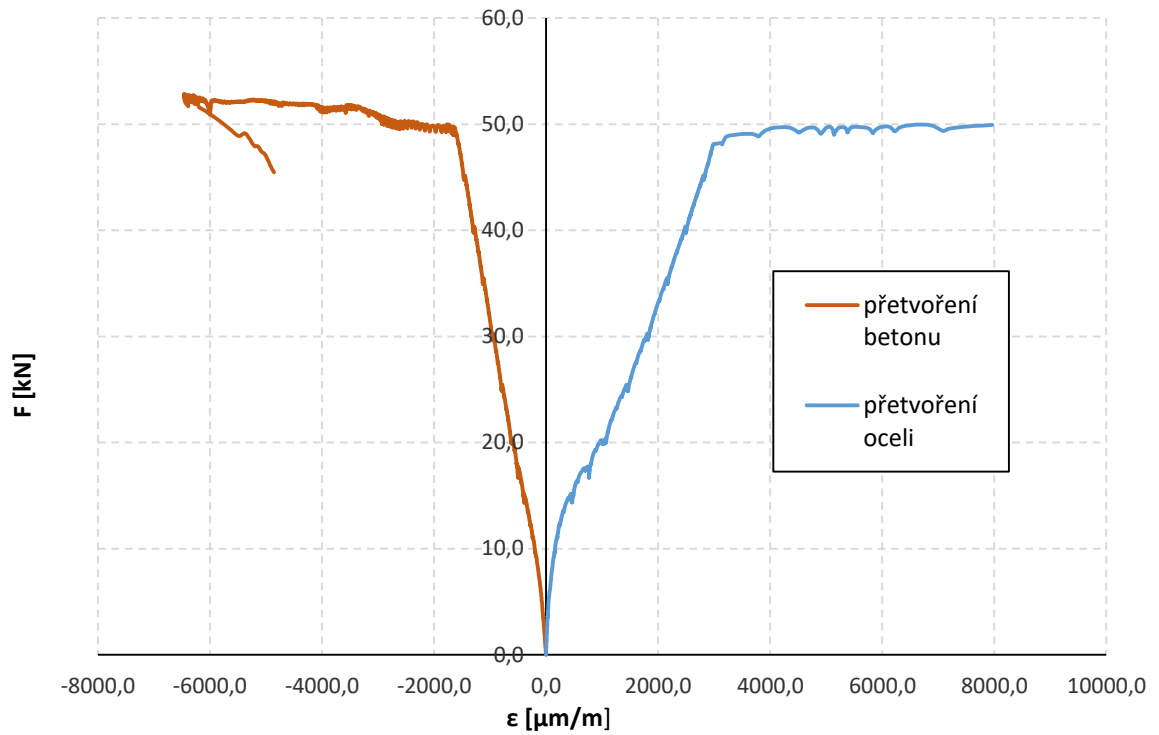
- od počátku zatěžování do bodu **A** se jedná o lineární část, v bodě **A** dochází k vyčerpání tahové únosnosti betonu, dochází ke vzniku trhlin (trhliny nejsou pozorovatelné lidským okem), zmenšuje se účinná výška průřezu a klesá celková tuhost prvku,
- v bodě **B** dochází ke zvětšení trhlin, trhliny jsou pozorovatelné lidským okem,
- bod **C** je charakterizován zvětšováním a rozšiřováním trhlin, veškeré takové napětí je přenášeno výztuží,
- bod **D** – dosažení meze kluzu v oceli, vzhledem k charakteru zkoušky se jedná o dosažení meze únosnosti,
- bod **E** – tvorba nadměrných deformací při minimálním nárůstu síly.



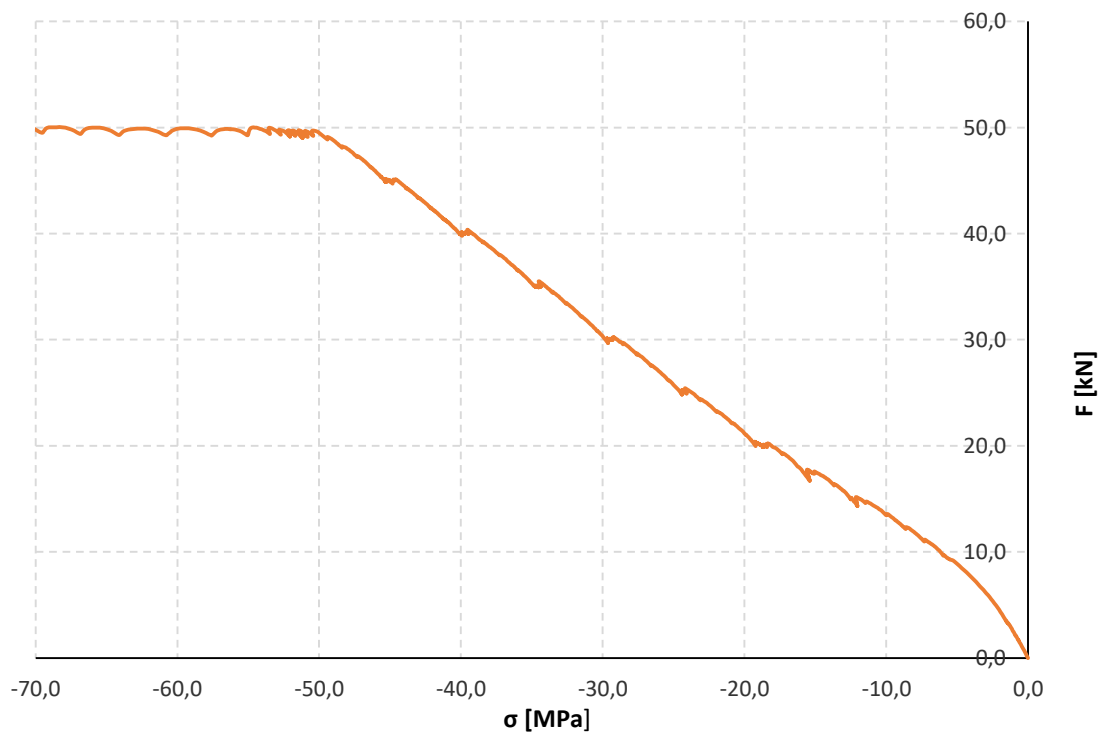
Graf P3-2: Časový průběh zatěžování



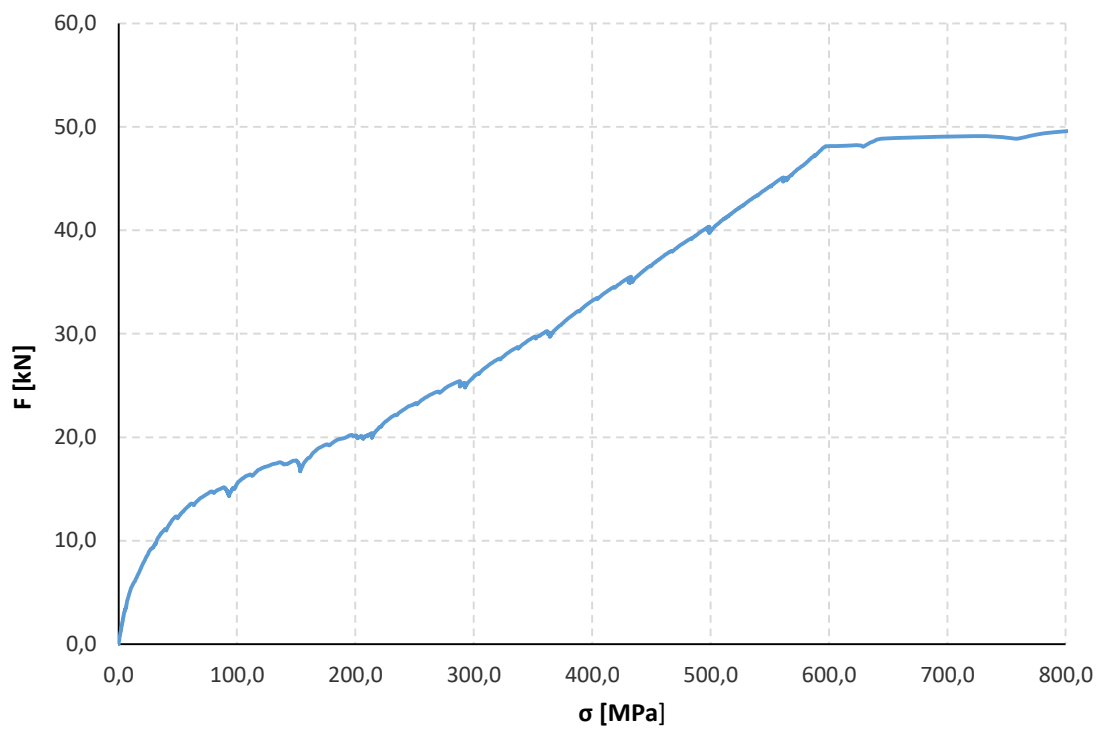
Graf P3-3: Průhyb a pokles podpor v závislosti na zatížení



Graf P3-4: Přetvoření betonu a oceli



Graf P3-5: Napětí v tlačené části betonu v závislosti na zatížení



Graf P3-6: Napětí v tažené výztuži v závislosti na zatížení

PŘÍLOHA P4
NUMERICKÁ ANALÝZA

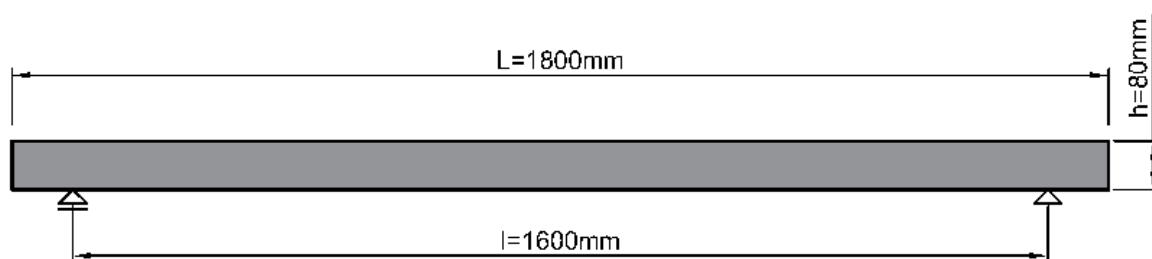
1. Statický výpočet dle EC	3
1.1 Předběžný návrh	3
1.2 Statické posouzení prvku s normovými parametry.....	4
1.3 Výpočet průhybu prvku s normovými parametry.....	8
1.4 Statický výpočet prvku s normovými parametry ze zkoušek	9
1.5 Výpočet průhybu prvku s normovými parametry ze zkoušek	11
1.6 Statické posouzení prvku se skutečnými parametry	12
1.7 Výpočet průhybu prvku se skutečnými parametry.....	14
1.8 Porovnání výsledků	15
2. Analýza Atena 3D	16
2.1 Výsledný graf zatěžování	16
2.2 Grafický výstup.....	16

1. Statický výpočet dle EC

1.1 Předběžný návrh

Pro počáteční návrh zkušebního prvku (železobetonové desky) a pro doprovodná zkušební tělesa je uvažována návrhová třída betonu C30/37 a návrhová třída oceli B500B.

1.1.1 Geometrie

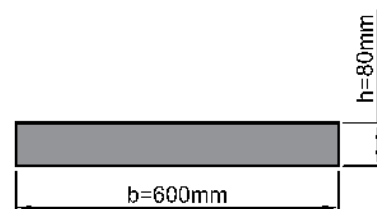


Délka prvku $L = 1800 \text{ mm}$

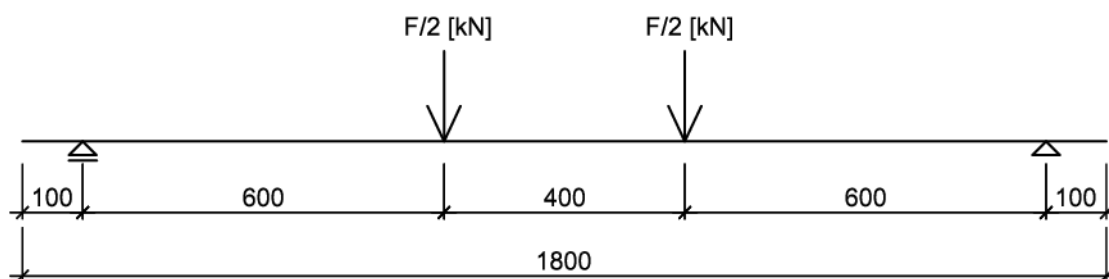
Vzdálenost podpor $l = 1600 \text{ mm}$

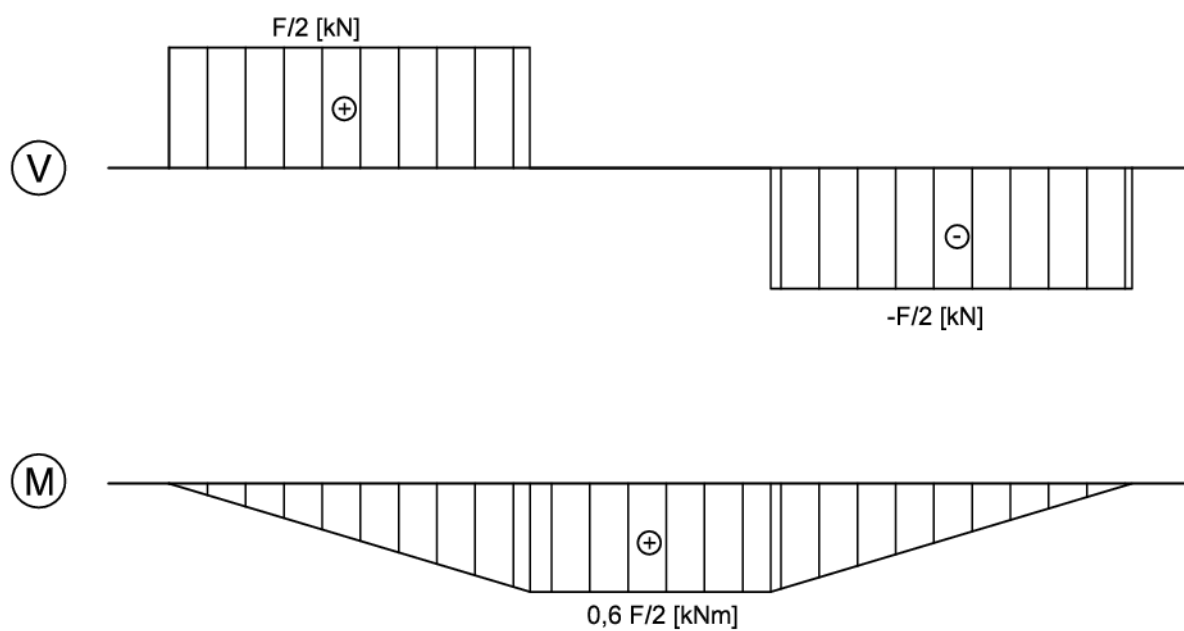
Výška prvku $h = 80 \text{ mm}$

Šířka prvku $b = 600 \text{ mm}$



1.1.2 Statické schéma





1.2 Statické posouzení prvku s normovými parametry

1.2.1 Materiálové charakteristiky

Beton C30/37:

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 30/1,5 = 20 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 32 \text{ GPa}$$

Ocel B500B:

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

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

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

1.2.2 Návrh výztuže

Pro výpočet je uvažován průměr $\phi_{sl} = 10$ mm pro hlavní nosnou výztuž a pro rozdělovací výztuž průměr výztuže $\phi_{sr} = 6$ mm. Pro laboratorní podmínky je uvažována třída prostředí X0 a třída konstrukce je S4. S ohledem na deskovou konstrukci je snížena třída na S3. Není uvažována přídatná hodnota z hlediska spolehlivosti ani redukce krycí vrstvy výztuže.

Výpočet krycí vrstvy výztuže

$$c_{min,b} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{min} = \max [c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm}] = \max [10 \text{ mm}; 10 \text{ mm}; 10 \text{ mm}] = 10 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 5 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 10 + 5 = 15 \text{ mm}$$

$$c = 15 \text{ mm} \geq c_{nom} = 15 \text{ mm}$$

Krycí vrstva je navržena na $c = 15$ mm. Distanční podložky budou přiléhat k hlavní nosné výztuži.

Průřezové charakteristiky

$$\text{Poloha těžiště výztuže:} \quad d1 = c + \phi_{sl}/2 = 0,015 + 0,010/2 = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{Účinná výška:} \quad d = h - d1 = 0,08 - 0,02 = 0,06 \text{ m}$$

Hlavní nosná výztuž bude navržena na referenční sílu lisu $F = 30$ kN.

$$\text{Nutná plocha výztuže pro:} \quad M_{Ed} = 0,6 F/2 = 0,6 \cdot 30/2 = 9 \text{ kNm}$$

$$A_{s,req} = b d \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 M_{Ed}}{b d^2 f_{cd}}} \right) = 0,6 * 0,06 \frac{20}{434,78} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 * 9}{1 * 0,06^2 * 20 * 10^3}} \right) =$$

$$A_{s,req} = 3,91 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{Navrženo:} \quad 6\phi 10 \text{ po } 0,09 \text{ m; } A_s = 4,71 * 10^{-4} \text{ m}^2.$$

1.2.3 Posouzení průřezu na ohybový moment

Poloha neutrální osy x :

$$\lambda = 0,8$$

$$x = \frac{A_s * f_{yd}}{b * \lambda * f_{cd}} = \frac{4,71 * 10^{-4} * 434,78}{0,6 * 0,8 * 20} = 0,0213 \text{ m}$$

Kontrola přetvoření výztuže:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} * (d - x) = \frac{3,5 \text{ ‰}}{0,0213} * (0,06 - 0,0213) = 6,34 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 6,34 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,78}{200 * 10^3} = 2,17 \text{ ‰} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Rameno vnitřních sil:

$$z_c = d - 0,5 * \lambda * x = 0,06 - 0,5 * 0,8 * 0,0213 = 0,0515 \text{ m}$$

Kontrola únosnosti průřezu

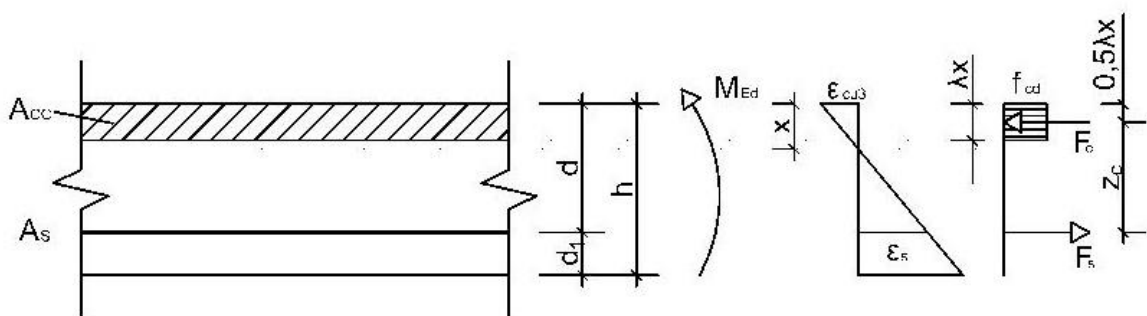
Moment na mezi únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s * f_{yd} * z_c = 4,71 * 10^{-3} * 434,78 * 0,0515 = 10,54 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 10,54 \text{ kNm} > M_{Ed} = 9 \text{ kNm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Zpětným dosazením je získána síla na mezi únosnosti:

$$F_{Rd} = \frac{2 * M_{Rd}}{0,6} = \frac{2 * 10,54}{0,6} = 35,15 \text{ kN}$$



Kontrola míry vyztužení:

$$A_{s,min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d = 0,26 * \frac{2,9}{500} * 0,6 * 0,06 = 5,43 * 10^{-5} m^2$$

$$> 0,0013 * b * d = 0,0013 * 0,6 * 0,06 = 4,68 * 10^{-5} m^2$$

$$A_s = 4,71 * 10^{-4} m^2 > A_{s,min} = 4,68 * 10^{-5} m^2 \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$A_{s,max} = 0,04 * A_c = 0,04 * 0,6 * 0,08 = 1,92 * 10^{-2} m^2$$

$$A_s = 4,71 * 10^{-4} m^2 < A_{s,max} = 1,92 * 10^{-2} m^2 \quad \text{VYHOVUJE}$$

Kontrola vzdálenosti výztuže: mezera mezi vložkami

$$s_u = 0,09 - 0,01 = 0,08 m$$

$$s_{u,min} = \max\{1,2\phi; d_g + 5 mm; 20 mm\} = \{12 mm; 21 mm; 20mm\} = 0,021 m$$

$$s_u = 0,08 m > s_{u,min} = 0,021 m \quad \text{VYHOVUJE}$$

Osová vzdálenost výztuže:

$$s = 0,09 m < s_{max,slabs} = 2h \leq 0,3 m = 2 * 0,08 = 0,16 m \quad \text{VYHOVUJE}$$

Návrh rozdělovací výztuže:

$$A_{sr} \geq 0,2 * A_s = 0,2 * 4,71 * 10^{-4} = 0,94 * 10^{-4} m^2$$

$$\text{Navrženo:} \quad 8\phi 6 \text{ po } 0,24 m; A_s = 2,26 * 10^{-4} m^2.$$

$$s_r = 0,24 m \leq s_{max,slabs} = 3h \leq 0,4 m = 3 * 0,08 = 0,24 m \quad \text{VYHOVUJE}$$

1.2.4 Posouzení průřezu na smyk

Pro zjednodušení bude posouzeno na maximální posouvající sílu $V_{ed} = 17,6$ kN, vyvolanou maximální silou lisu $F_{rd} = 35,2$ kN.

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{60}} = 2,83 > 2 \Rightarrow k = 2,0$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w * d} = \frac{4,71 * 10^{-4}}{0,6 * 0,06} = 0,013$$

$$v_{min} = 0,035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2} = 0,035 * 2,0^{3/2} * 30^{1/2} = 0,542 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3}] = [0,12 * 2,0 * (100 * 0,013 * 30)^{1/3}] = 54,14 \text{ kN}$$

$$s \text{ omezením} \geq v_{min} b_w d = 0,542 * 0,6 * 0,06 = 19,52 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$V_{Rd,c} = 54,14 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 17,6 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

1.3 Výpočet průhybu prvku s normovými parametry

1.3.1 Plně působící ideální průřez

$$A_c = b * h = 0,6 * 0,08 = 0,048 \text{ m}^2$$

$$A_{st} = 4,71 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200}{32} = 6,25$$

$$A_i = A_c + \alpha_e (A_s) = 0,048 + 6,25 (4,71 * 10^{-4}) = 0,051 \text{ m}^2$$

$$a_{gi} = \frac{A_c a_{gc} + \alpha_e (A_s d)}{A_i} = \frac{0,048 * 0,04 + 6,25 (4,71 * 10^{-4} * 0,06)}{0,051} = 0,0412 \text{ m}$$

$$I_i = \left(\frac{1}{12} b h^3 \right) + A_c (a_{gi} - a_{gc})^2 + \alpha_e [A_s (d - a_{gi})^2] = \left(\frac{1}{12} 0,6 * 0,08^3 \right) + \\ + 0,048 (0,0412 - 0,04)^2 + 6,25 [4,71 * 10^{-4} * (0,06 - 0,0412)^2] = 2,671 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$M_{cr} = f_{ctm} \frac{I_i}{h - a_{gi}} = 2,9 \frac{2,671 * 10^{-5}}{0,08 - 0,0412} = 1,99 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = \frac{2 * M_{cr}}{0,6} = \frac{2 * 1,99}{0,6} = 6,65 \text{ kN}$$

$$w_i = \frac{F_{cr} (3al^3 - 4a^3)}{48 E_c I_i} = \frac{6,65 (3 * 0,6 * 1,8^3 - 4 * 0,6^3)}{48 * 32 * 2,671 * 10^{-5}} = 0,61 \text{ mm}$$

1.3.2 Průřez porušený trhlinami

Průhyb při maximálním zatížení na mezi únosnosti $F_{Rd} = 35,2$ kN.

$$A_{ir} = (b a_{gi}) + \alpha_e (A_s) = (0,6 * 0,0412) + 6,25 (4,71 * 10^{-4}) = 0,028 \text{ m}^2$$

$$a_{gir} = \frac{b a_{gi} \frac{a_{gi}}{2} + \alpha_e (A_s d)}{A_{ir}} = \frac{0,6 * 0,0412 * \frac{0,0412}{2} + 6,25 (4,71 * 10^{-4} * 0,06)}{0,028} = 0,0248 \text{ m}$$

$$I_{ir} = \left(\frac{1}{12} b a_{gir}^3 \right) + b a_{gi} (a_{gir} - a_{gi}/2)^2 + \alpha_e [A_s (d - a_{gir})^2] = \left(\frac{1}{12} 0,6 * 0,0248^3 \right) +$$

$$+ 0,6 * 0,0248 (0,0248 - \frac{0,0412}{2})^2 + 6,25 [4,71 * 10^{-4} * (0,06 - 0,0412)^2] = 7,575 * 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$w_{ir} = \frac{F_{Rd} (3al^3 - 4a^3)}{48E_c I_i} = \frac{35,2 (3 * 0,6 * 1,8^3 - 4 * 0,6^3)}{48 * 32 * 7,575 * 10^{-6}} = 11,31 \text{ mm}$$

1.4 Statický výpočet prvku s normovými parametry ze zkoušek

1.4.1 Materiálové charakteristiky

Beton C40/50:

$$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = 40 / 1,5 = 26,7 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 3,5 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 35 \text{ GPa}$$

Ocel B500B:

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

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

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

1.4.2 Návrh výztuže

Výztuž je navržena dle 1.2.2 *Návrh výztuže*.

1.4.3 Posouzení průřezu na ohybový moment

Poloha neutrální osy x :

$$\lambda = 0,8$$

$$x = \frac{A_s * f_{yd}}{b * \lambda * f_{cd}} = \frac{4,71 * 10^{-4} * 434,78}{0,6 * 0,8 * 26,7} = 0,016 \text{ m}$$

Kontrola přetvoření výztuže:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} * (d - x) = \frac{3,5 \text{ ‰}}{0,016} * (0,06 - 0,016) = 9,62 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 9,62 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434,78}{200 * 10^3} = 2,17 \text{ ‰} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Rameno vnitřních sil:

$$z_c = d - 0,5 * \lambda * x = 0,06 - 0,5 * 0,8 * 0,016 = 0,054 \text{ m}$$

Kontrola únosnosti průřezu

Moment na mezi únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s * f_{yd} * z_c = 4,71 * 10^{-3} * 434,78 * 0,054 = 10,98 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 10,98 \text{ kNm} > M_{Ed} = 9 \text{ kNm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Zpětným dosazením je získána síla na mezi únosnosti:

$$F_{Rd} = \frac{2 * M_{Rd}}{0,6} = \frac{2 * 10,98}{0,6} = 36,6 \text{ kN}$$

Kontrola konstrukčních zásad a návrh rozdělovací výztuže je uveden v kapitole

1.2.3 Posouzení průřezu na ohybový moment.

1.4.4 Posouzení průřezu na smyk

Pro zjednodušení bude posouzeno na maximální posouvající sílu $V_{ed} = 18,4 \text{ kN}$, vyvolanou maximální silou lisu $F_{rd} = 36,6 \text{ kN}$.

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{60}} = 2,83 > 2 \Rightarrow k = 2,0$$

$$\rho_l = \frac{A_{st}}{b_w * d} = \frac{4,71 * 10^{-4}}{0,6 * 0,06} = 0,013$$

$$v_{min} = 0,035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2} = 0,035 * 2,0^{3/2} * 40^{1/2} = 0,626 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3}] = [0,12 * 2,0 * (100 * 0,013 * 40)^{1/3}] = 62,52 \text{ kN}$$

$$s \text{ omezením} \geq v_{min} b_w d = 0,626 * 0,6 * 0,06 = 22,54 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$V_{Rd,c} = 62,52 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 18,4 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

1.5 Výpočet průhybu prvku s normovými parametry ze zkoušek

1.5.1 Plně působící ideální průřez

$$A_c = b * h = 0,6 * 0,08 = 0,048 \text{ m}^2$$

$$A_{st} = 4,71 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200}{35} = 5,71$$

$$A_i = A_c + \alpha_e (A_s) = 0,048 + 5,71 (4,71 * 10^{-4}) = 0,051 \text{ m}^2$$

$$a_{gi} = \frac{A_c a_{gc} + \alpha_e (A_s d)}{A_i} = \frac{0,048 * 0,04 + 5,71 (4,71 * 10^{-4} * 0,06)}{0,051} = 0,0410 \text{ m}$$

$$I_i = \left(\frac{1}{12} b h^3 \right) + A_c (a_{gi} - a_{gc})^2 + \alpha_e [A_s (d - a_{gi})^2] = \left(\frac{1}{12} 0,6 * 0,08^3 \right) + 0,048 (0,0410 - 0,04)^2 + 5,71 [4,71 * 10^{-4} * (0,06 - 0,0410)^2] = 2,662 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$M_{cr} = f_{ctm} \frac{I_i}{h - a_{gi}} = 3,5 \frac{2,662 * 10^{-5}}{0,08 - 0,0410} = 2,39 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = \frac{2 * M_{cr}}{0,6} = \frac{2 * 2,39}{0,6} = 7,98 \text{ kN}$$

$$w_i = \frac{F_{cr}(3al^3 - 4a^3)}{48E_c I_i} = \frac{7,98(3 * 0,6 * 1,8^3 - 4 * 0,6^3)}{48 * 32 * 2,662 * 10^{-5}} = 0,67 \text{ mm}$$

1.5.2 Průřez porušený trhlinami

Průhyb při maximálním zatížení na mezi únosnosti $F_{Rd} = 36,6 \text{ kN}$.

$$A_{ir} = (b a_{gi}) + \alpha_e(A_s) = (0,6 * 0,0410) + 6,25(4,71 * 10^{-4}) = 0,027 \text{ m}^2$$

$$a_{gir} = \frac{b a_{gi} \frac{a_{gi}}{2} + \alpha_e(A_s d)}{A_{ir}} = \frac{0,6 * 0,0410 * \frac{0,0410}{2} + 6,25(4,71 * 10^{-4} * 0,06)}{0,027} = 0,0244 \text{ m}$$

$$I_{ir} = \left(\frac{1}{12} b a_{gir}^3 \right) + b a_{gi} (a_{gir} - a_{gi}/2)^2 + \alpha_e [A_s (d - a_{gir})^2] = \left(\frac{1}{12} 0,6 * 0,0244^3 \right) + 0,6 * 0,0244 \left(0,0244 - \frac{0,0410}{2} \right)^2 + 6,25 [4,71 * 10^{-4} * (0,06 - 0,0410)^2] = 7,243 * 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$w_{ir} = \frac{F_{Rd}(3al^3 - 4a^3)}{48E_c I_i} = \frac{36,6(3 * 0,6 * 1,8^3 - 4 * 0,6^3)}{48 * 32 * 7,243 * 10^{-6}} = 11,26 \text{ mm}$$

1.6 Statické posouzení prvku se skutečnými parametry

1.6.1 Materiálové charakteristiky

Beton C-/-:

$$f_{ck} = 53,02 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 53,02/1,0 = 53,02 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 3,33 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 30,69 \text{ GPa}$$

Ocel B-B:

$$f_{yk} = 599,25 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 599,25/1,0 = 599,25 \text{ MPa}$$

$$E_s = 199,43 \text{ GPa}$$

1.6.2 Návrh výztuže

Výztuž je navržena dle 1.2.2 *Návrh výztuže*.

1.6.3 Posouzení průřezu na ohybový moment

Poloha neutrální osy x:

$$\lambda = 0,8$$

$$x = \frac{A_s * f_{yd}}{b * \lambda * f_{cd}} = \frac{4,71 * 10^{-4} * 599,25}{0,6 * 0,8 * 53,02} = 0,011 \text{ m}$$

Kontrola přetvoření výztuže:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} * (d - x) = \frac{3,5 \text{ ‰}}{0,011} * (0,06 - 0,011) = 15,43 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 15,43 \text{ ‰} > \varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{599,25}{199,4 * 10^3} = 3,00 \text{ ‰} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Rameno vnitřních sil:

$$z_c = d - 0,5 * \lambda * x = 0,06 - 0,5 * 0,8 * 0,011 = 0,056 \text{ m}$$

Kontrola únosnosti průřezu

Moment na mezi únosnosti:

$$M_{Rd} = A_s * f_{yd} * z_c = 4,71 * 10^{-3} * 599,25 * 0,056 = 15,69 \text{ kNm}$$

$$M_{Rd} = 15,69 \text{ kNm} > M_{Ed} = 9 \text{ kNm} \quad \text{VYHOVUJE}$$

Zpětným dosazením je získána síla na mezi únosnosti:

$$F_{Rd} = \frac{2 * M_{Rd}}{0,6} = \frac{2 * 15,69}{0,6} = 52,3 \text{ kN}$$

Kontrola konstrukčních zásad a návrh rozdělovací výztuže je uveden v kapitole

1.2.3 *Posouzení průřezu na ohybový moment*.

1.6.4 Posouzení průřezu na smyk

Pro zjednodušení bude posouzeno na maximální posouvající sílu $V_{ed} = 26,2 \text{ kN}$, vyvolanou maximální silou lisu $F_{Rd} = 52,3 \text{ kN}$.

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{60}} = 2,83 > 2 \Rightarrow k = 2,0$$

$$\rho_l = \frac{A_{st}}{b_w * d} = \frac{4,71 * 10^{-4}}{0,6 * 0,06} = 0,013$$

$$v_{min} = 0,035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2} = 0,035 * 2,0^{3/2} * 53,02^{1/2} = 0,721 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3}] = [0,12 * 2,0 * (100 * 0,013 * 53,02)^{1/3}] = 71,98 \text{ kN}$$

$$s \text{ omezením} \geq v_{min} b_w d = 0,721 * 0,6 * 0,06 = 25,95 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

$$V_{Rd,c} = 71,98 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 26,2 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

1.7 Výpočet průhybu prvku se skutečnými parametry

1.7.1 Plně působící ideální průřez

$$A_c = b * h = 0,6 * 0,08 = 0,048 \text{ m}^2$$

$$A_{st} = 4,71 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{199,4}{30,69} = 6,50$$

$$A_i = A_c + \alpha_e (A_s) = 0,048 + 6,50 (4,71 * 10^{-4}) = 0,051 \text{ m}^2$$

$$a_{gi} = \frac{A_c a_{gc} + \alpha_e (A_s d)}{A_i} = \frac{0,048 * 0,04 + 6,50 (4,71 * 10^{-4} * 0,06)}{0,051} = 0,0411 \text{ m}$$

$$I_i = \left(\frac{1}{12} b h^3 \right) + A_c (a_{gi} - a_{gc})^2 + \alpha_e [A_s (d - a_{gi})^2] = \left(\frac{1}{12} 0,6 * 0,08^3 \right) + \\ + 0,048 (0,0411 - 0,04)^2 + 6,50 [4,71 * 10^{-4} * (0,06 - 0,0411)^2] = 2,675 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$M_{cr} = f_{ctm} \frac{I_i}{h - a_{gi}} = 3,33 \frac{2,675 * 10^{-5}}{0,08 - 0,0411} = 2,30 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = \frac{2 * M_{cr}}{0,6} = \frac{2 * 2,30}{0,6} = 7,65 \text{ kN}$$

$$w_i = \frac{F_{cr}(3al^3 - 4a^3)}{48E_c I_i} = \frac{7,65 (3 * 0,6 * 1,8^3 - 4 * 0,6^3)}{48 * 33,3 * 2,675 * 10^{-5}} = 0,73 \text{ mm}$$

1.7.2 Průřez porušený trhlinami

Průhyb při maximálním zatížení na mezi únosnosti $F_{Rd} = 52,3 \text{ kN}$.

$$A_{ir} = (b a_{gi}) + \alpha_e (A_s) = (0,6 * 0,0410) + 6,50 (4,71 * 10^{-4}) = 0,028 \text{ m}^2$$

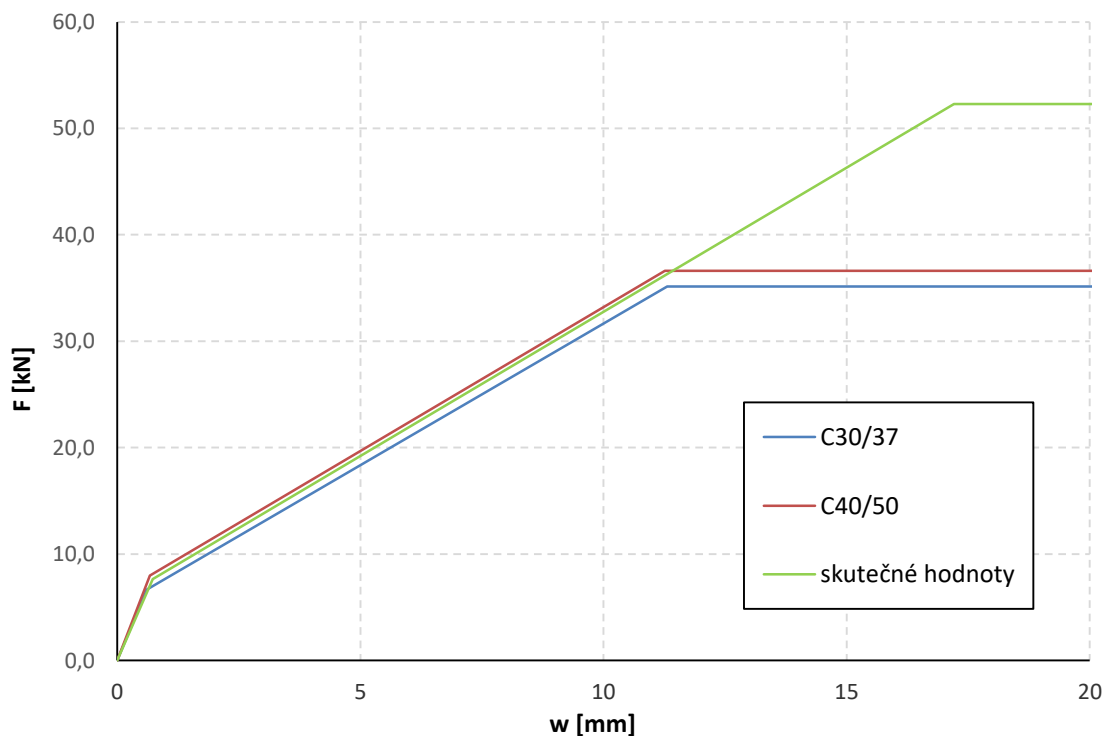
$$a_{gir} = \frac{b a_{gi} \frac{a_{gi}}{2} + \alpha_e (A_s d)}{A_{ir}} = \frac{0,6 * 0,0410 * \frac{0,0410}{2} + 6,50 (4,71 * 10^{-4} * 0,06)}{0,028} = 0,0249 \text{ m}$$

$$I_{ir} = \left(\frac{1}{12} b a_{gir}^3 \right) + b a_{gi} (a_{gir} - a_{gi}/2)^2 + \alpha_e [A_s (d - a_{gir})^2] = \left(\frac{1}{12} 0,6 * 0,0411^3 \right) +$$

$$+ 0,6 * 0,0411 (0,0249 - \frac{0,0411}{2})^2 + 6,50 [4,71 * 10^{-4} * (0,06 - 0,0410)^2] = 7,726 * 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$w_{ir} = \frac{F_{Rd}(3al^3 - 4a^3)}{48E_c I_i} = \frac{52,3 (3 * 0,6 * 1,8^3 - 4 * 0,6^3)}{48 * 33,3 * 7,726 * 10^{-6}} = 17,20 \text{ mm}$$

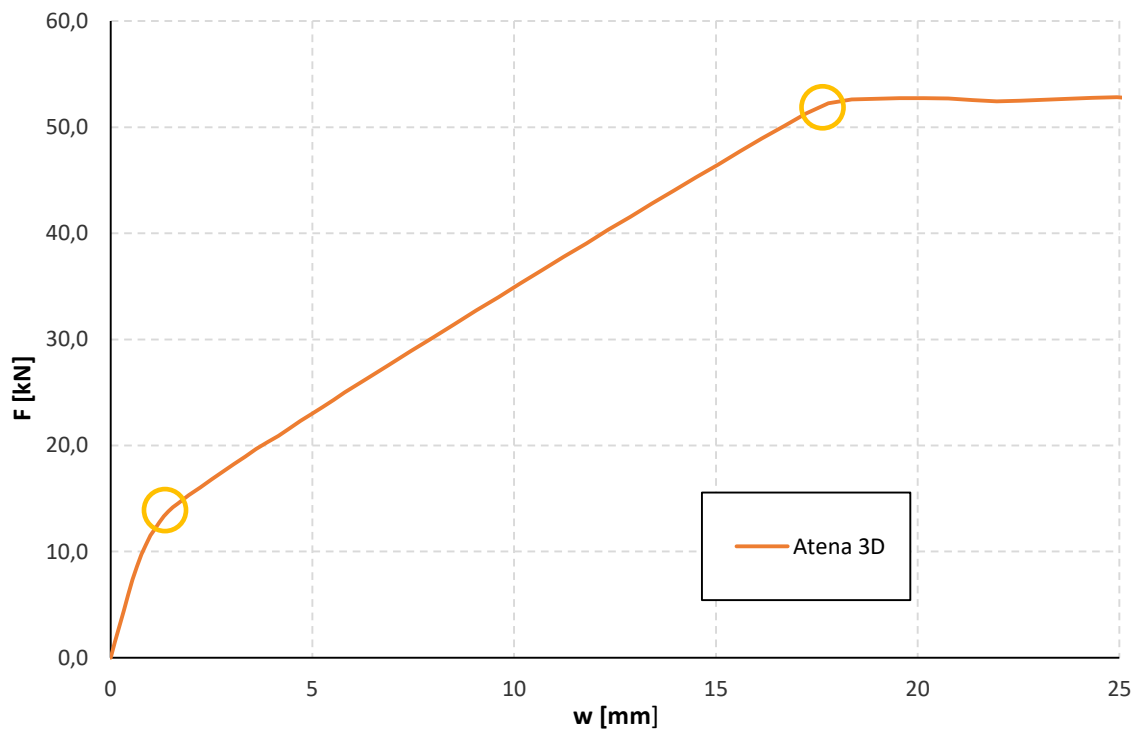
1.8 Porovnání výsledků



Graf P4-1: Porovnání výsledků statického výpočtu

2. Analýza Atena 3D

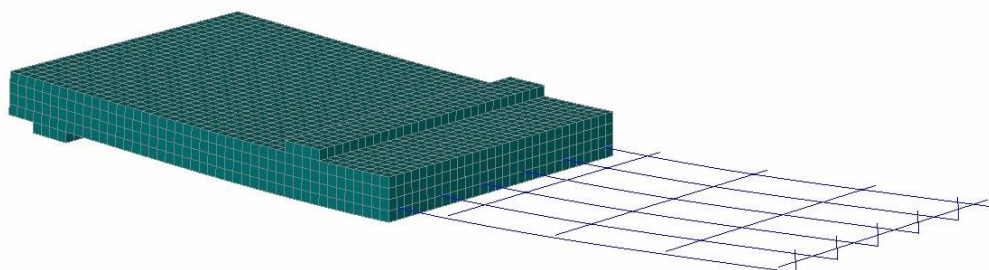
2.1 Výsledný graf zatěžování



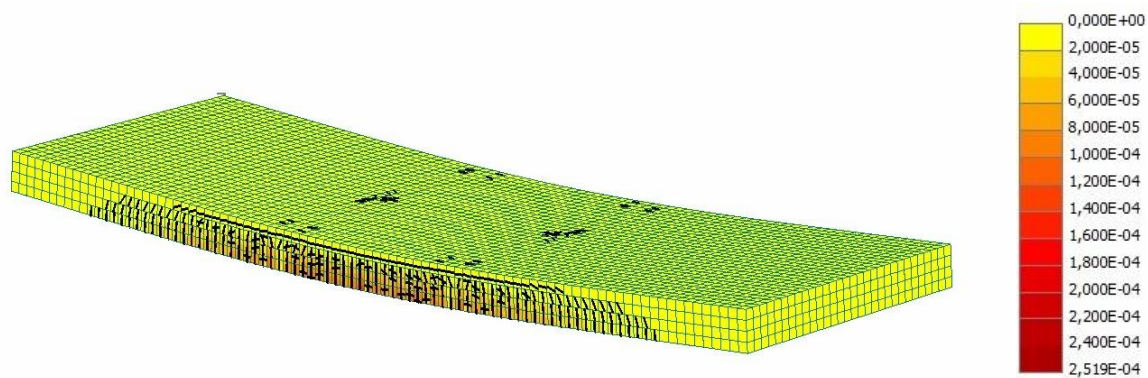
Graf P4-2: Výsledný graf zatěžování

2.2 Grafický výstup

Modely vykresleny z kroku č. 53 (mez únosnosti), průhyb je pro přehlednost dvakrát převýšen.

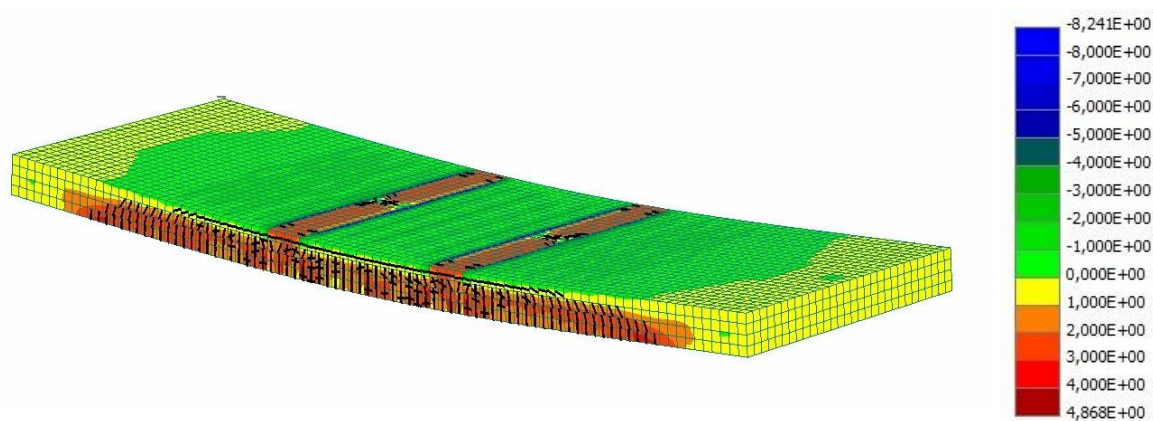


Obr. P4-1: Základní model v řezu

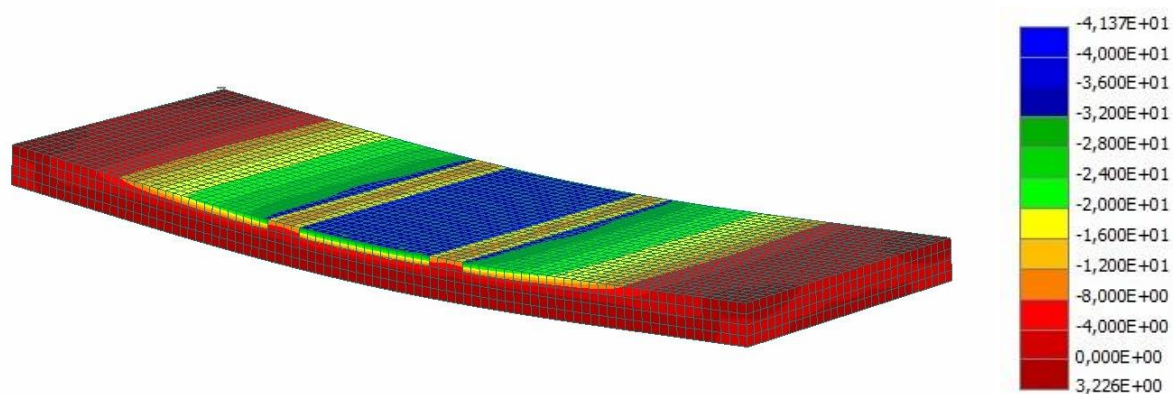


Obr. P4-2: Šířka trhlin na modelu konstrukce

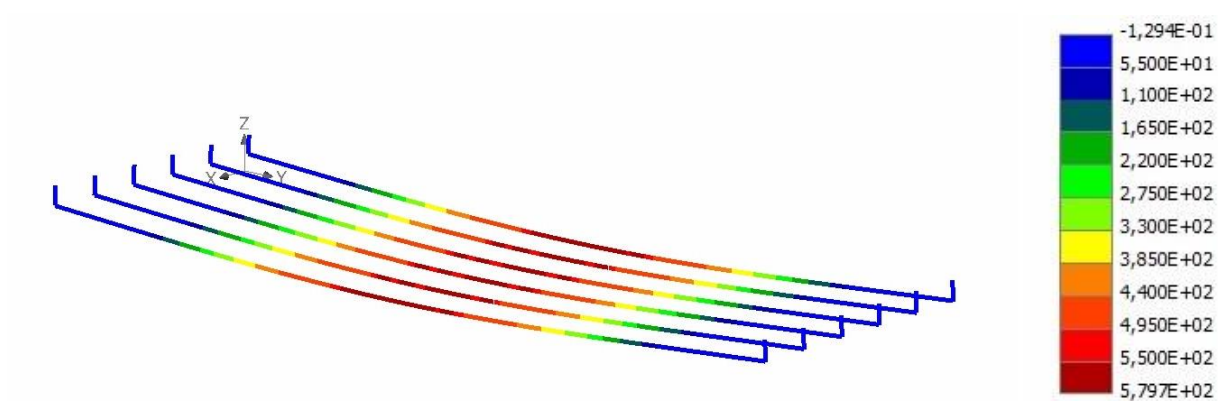
Poznámka: maximální šířka trhlin odpovídá hodnotě $2,519 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, což odpovídá maximální šířce trhlin 0,25 mm.



Obr. P4-3: Hlavní napětí v betonu



Obr. P4-4: Napětí v betonu na mezi únosnosti



Obr. P5-5: Napětí v hlavní nosné výztuži na mezi únosnosti

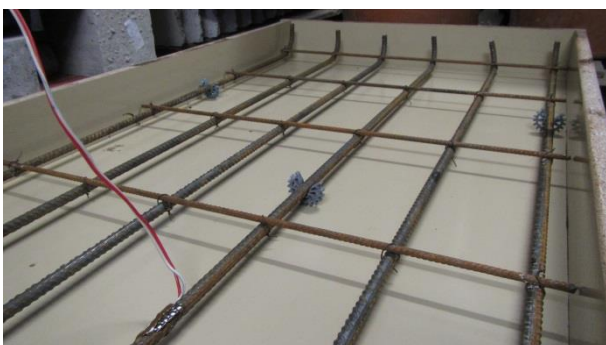
PŘÍLOHA P5
FOTODOKUMENTACE



Obr. P5-1: Lepený foliový odporový tenzometr na výztuž



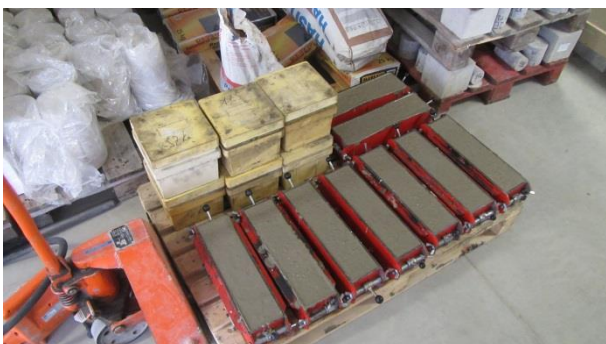
Obr. P5-2 Sestavené bednění s usazeným armokošem



Obr. P5-3: Detail distančních podložek a vyvedení vodičů odporového tenzometru



Obr. P5-4: Vybetonovaná a uhlazená zkušební deska



Obr. P5-5: Vybetonovaná zkušební tělesa



Obr. P5-6: Zkušba pevnosti betonu v tlaku – usazení tělesa v lisu



Obr. P5-7: Porušení zkušebního tělesa K1 tlakem



Obr. P5-8: Porušení zkušebního tělesa K3 tlakem



Obr. P5-9: Porušení hranolu H2 tlakem



Obr. P5-10: Stanovení modulu pružnosti betonu v tlaku



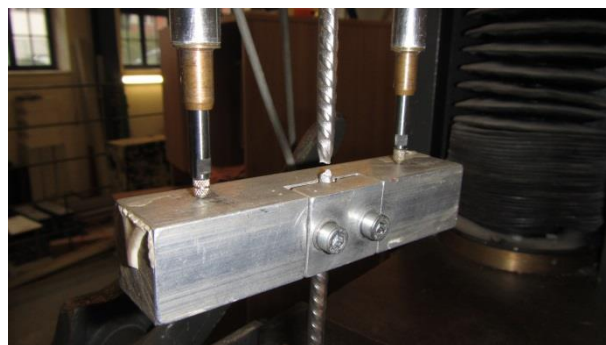
Obr. P5-11: Stanovení pevnosti v tahu ohybem (4-bodový ohyb)



Obr. P5-12: Hranol H4 porušený ohybem



Obr. P5-13: Připravená zkouška tahové pevnosti oceli (výztuž $\phi 10\text{mm}$)



Obr. P5-14: Detail porušení ocelového prutu tahem



Obr. P5-15: Stanovení lomové energie betonu (3-bodový ohyb)



Obr. P5-16: Porušení vzorku H5 při zkoušce prostým tahem



Obr. P5-17: Zkušební lis se vzorkem pro zkoušku prostým tahem



Obr. P5-18: Upravená plocha betonu pro lepení odporového tenzometru a vodič odporového tenzometru oceli



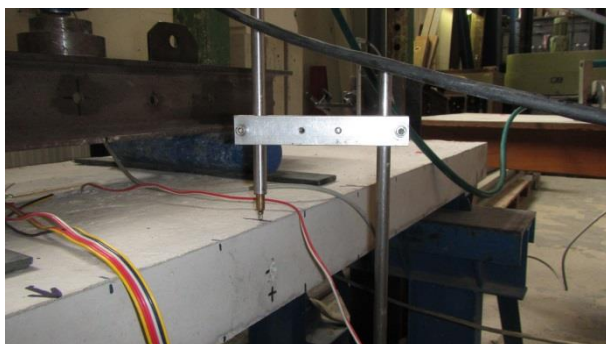
Obr. P5-19: Hydraulický lis a ocelové roznášecí prvky pro zajištění 4-bodového ohybu



Obr. P5-20: Detail pevné podpory



Obr. P5-21: Detail posuvné podpory



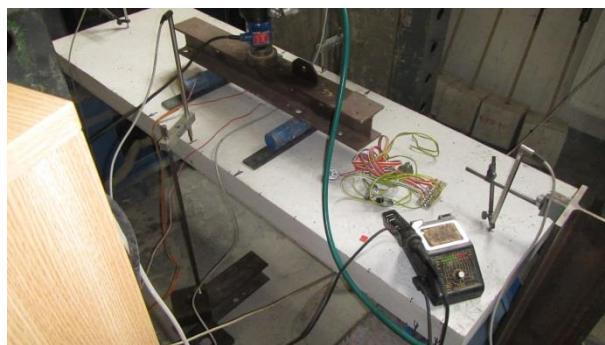
Obr. P5-22: Potenciometrický snímač dráhy pro měření průhybu uprostřed rozpětí



Obr. P5-23: Potenciometrický snímač dráhy pro měření poklesu podpory



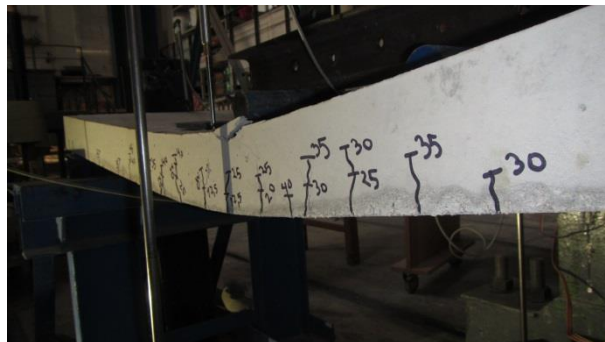
Obr. P5-24: Nalepený odporový tenzometr pro záznam napětí v tlačené části betonu



Obr. P5-25: Nachystaná zatěžovací zkouška



Obr. P5-26: Vznik trhlin při dosažení 17,5 kN



Obr. P5-27: Průhyb při dosažení meze únosnosti



Obr. P5-28: Trhliny na tažené části betonu při dosažení meze únosnosti



Obr. P5-29: Tlakové porušení betonu



Obr. P5-30: Tlakové porušení betonu II



Obr. P5-31: Vznik plastického kloubu v betonu: ukončení zatěžovací zkoušky



Obr. P5-32: Odebírání jádrových vývrtů



Obr. P5-33: Zkouška pevnosti v tlaku jádrových vývrtů