

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi

SIMULACE NAMÁHÁNÍ TYPOVÉ BETONOVÉ  
STRUKTURY

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Tomáš Chalupský, DiS.

Vedoucí práce: Ing. Martin Marek, Ph.D.

Jihlava 2026

# Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce:	<b>Bc. Tomáš Chalupský, DiS.</b>
Studijní program:	Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi
Garant studijního programu:	doc. Ing. Radek Kolman, Ph.D.
Název práce:	<b>Simulace namáhání typové betonové struktury</b>
Vedoucí práce:	Ing. Martin Marek, Ph.D.
Konzultant práce:	Ing. Mgr. Lucie Zárybnická, Ph.D.
Cíl práce:	Cílem práce je experimentální práce zaměřená na zjišťování mechanických vlastností typových vzorků betonu na trhacím stroji s následným porovnáním výsledků dosažených pomocí FEM metod a PC modelu daných vzorků. Při řešení práce se předpokládá využití některého ze softwarových balíčků Abaqus nebo Comsol, případně jiného specializovaného software dle potřeby. V závěru budou dosažené výsledky z obou metod zhodnoceny.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá experimentálním a numerickým posouzením mechanického chování betonových vzorků při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu (tříbodová ohybová zkouška). Zkušební tělesa byla vyrobena ze dvou typů směsí (cementový potěr a vlastní míchaná betonová směs), a to ve variantách bez výztuže a s výztuží o průměru 2 mm a 4 mm. Zkoušky byly provedeny po 7 a 28 dnech hydratace. Experimentální výsledky byly následně porovnány s numerickou simulací provedenou metodou konečných prvků v programu Abaqus/CAE. Byla zjištěna dobrá shoda mezi experimentálními a numerickými výsledky z hlediska vlivu průměru výztuže, doby hydratace a typu směsi. V obou případech se se zvyšujícím se průměrem výztuže zvyšovala únosnost a deformovatelnost vzorků, zatímco vzorky po 28 dnech hydratace vykazovaly vyšší tuhost a nižší deformace než vzorky po 7 dnech.

## Klíčová slova

Beton; zkouška pevnosti v tahu za ohybu; mechanické vlastnosti; ocelová výztuž; metoda konečných prvků; Abaqus;

## Abstract

This thesis deals with the experimental and numerical assessment of the mechanical behavior of concrete specimens during the flexural tensile strength test (three-point bending test). The test specimens were manufactured from two types of mixtures (cement screed and a custom-mixed concrete mixture), in variants without reinforcement and with reinforcement of 2 mm and 4 mm diameter. The tests were performed after 7 and 28 days of hydration. The experimental results were subsequently compared with a numerical simulation performed using the finite element method in the Abaqus/CAE program. Good agreement was found between the experimental and numerical results in terms of the influence of reinforcement diameter, hydration time, and mix type. In both cases, the load-bearing capacity and deformability of the specimens increased with increasing reinforcement diameter, while specimens after 28 days of hydration exhibited higher stiffness and lower deformation than those after 7 days.

## Keywords

Concrete; three-point bending; mechanical properties; steel reinforcement; tensile test; finite element method; Abaqus; numerical simulation;

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom/a toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Telči dne 18. února 2026

.....

Podpis studenta

## Poděkování

*Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Martinu Markovi, Ph.D. za vstřícnou pomoc při tvorbě práce, paní Ing. Mgr. Lucii Zárybnické, Ph.D. za konzultace, možnost využít testovací zařízení v laboratoři Vysoké školy Polytechnické a v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v Telči.*

# Obsah

<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>7</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam zkratk.....</b>	<b>10</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Teoretická část .....</b>	<b>12</b>
1.1 Beton .....	12
1.2 Složení betonu .....	12
1.3 Hydratace cementu .....	13
1.4 Mikrostruktura betonu .....	14
1.5 Mechanické vlastnosti betonu.....	15
1.6 Beton s výztuží.....	16
1.7 Druhy betonu.....	17
1.8 Metoda konečných prvků (MKP / FEM).....	18
<b>2 Experimentální část .....</b>	<b>20</b>
2.1 Úvod do experimentální části.....	20
2.2 Použité materiály.....	20
2.3 Příprava zkušebních vzorků .....	21
2.4 Použité metody testování.....	23
2.5 Vyhodnocení tahové zkoušky ocelové výztuže.....	26
2.6 Numerická simulace v softwaru Abaqus/CAE.....	26
<b>3 Výsledky a diskuze.....</b>	<b>29</b>
3.1 Mechanické zkoušky betonových vzorků .....	29
3.2 Tahová zkouška ocelové výztuže .....	33
3.3 Porozita.....	34
3.4 XRPD .....	36
3.5 Mikrostruktura materiálu .....	36
3.6 Analýza trhlin po ohybové zkoušce .....	38
3.7 Numerická simulace .....	39
<b>Závěr .....</b>	<b>64</b>
<b>Využití nástrojů umělé inteligence.....</b>	<b>66</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>67</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>69</b>
<b>Přílohy.....</b>	<b>70</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Příprava betonových zkušebních těles ve formách .....	22
Obrázek 2: Mikroskopické pozorování betonového vzorku v laboratorních podmínkách .....	23
Obrázek 3: Zkušební zařízení pro třibodovou ohybovou zkoušku .....	25
Obrázek 4: Detail betonového vzorku, zatěžovacího trnu a podpěr .....	25
Obrázek 5: Průměrné grafy vyhodnocených dat ze zkoušky pevnosti v ohybu betonových vzorků z cementového potěru a vlastní míchané betonové směsi při 7denní hydrataci .....	30
Obrázek 6: Průměrné grafy vyhodnocených dat ze zkoušky pevnosti v ohybu betonových vzorků z cementového potěru a vlastní míchané betonové směsi při 28denní hydrataci .....	31
Obrázek 7: Průměrné tahové křivky ocelových drátů o $\varnothing$ 2 mm a $\varnothing$ 4 mm získané z tahové zkoušky při pokojové teplotě .....	33
Obrázek 8: Kumulativní rozdělení objemu pórů v závislosti na průměru pórů stanovené metodou rtuťové porozimetrie pro betonové vzorky z cementového potěru a vlastní míchané betonové směsi .....	35
Obrázek 9: Mikrostruktura betonového vzorku z cementového potěru bez výztuže po 28 dnech hydratace (optická mikroskopie, zvětšení 50x) .....	37
Obrázek 10: Mikrostruktura betonového vzorku z vlastní míchané betonové směsi bez výztuže po 28 dnech hydratace (optická mikroskopie, zvětšení 50x) .....	37
Obrázek 11: Mikrostruktura betonového vzorku z cementového potěru s ocelovou výztuží $\varnothing$ 2 mm po 28 dnech hydratace (optická mikroskopie, zvětšení 50x) .....	38
Obrázek 12: Mikrostruktura betonového vzorku z vlastní míchané betonové směsi s ocelovou výztuží $\varnothing$ 2 mm po 28 dnech hydratace (optická mikroskopie, zvětšení 50x) .....	38
Obrázek 13: Binární obraz trhlin betonového vzorku z cementového potěru bez výztuže po 28 dnech hydratace, získaný zpracováním snímku v software ImageJ .....	38
Obrázek 14: Binární obraz trhlin betonového vzorku z cementového potěru s ocelovou výztuží $\varnothing$ 2 mm po 28 dnech hydratace, získaný zpracováním snímku v softwaru ImageJ .....	39
Obrázek 15: Binární obraz trhlin betonového vzorku z vlastní míchané betonové směsi bez výztuže po 28 dnech hydratace, získaný zpracováním snímku v softwaru ImageJ .....	39
Obrázek 16: Binární obraz trhlin betonového vzorku z vlastní míchané betonové směsi s ocelovou výztuží $\varnothing$ 4 mm po 28 dnech hydratace, získaný zpracováním snímku v softwaru ImageJ .....	39
Obrázek 17: Geometrický model bez výztuže .....	40
Obrázek 18: Diskretizace modelu bez výztuže .....	40
Obrázek 19: Geometrický model s ocelovou výztuží $\varnothing$ 2 mm .....	41
Obrázek 20: Diskretizace modelu ocelovou výztuží $\varnothing$ 2 mm .....	41
Obrázek 21: Geometrický model s ocelovou výztuží $\varnothing$ 4 mm .....	41
Obrázek 22: Diskretizace modelu s ocelovou výztuží $\varnothing$ 4 mm .....	41
Obrázek 23: Rozložení redukovaného napětí $S$ , Mises ve vyztuženém betonovém tělese – pohled na model včetně výpočtové sítě .....	42
Obrázek 24: Detail koncentrace napětí v oblasti kontaktu zatěžovacího válce a betonového tělesa a ocelové výztuže .....	42
Obrázek 25: Průřez vyztuženým betonovým tělesem – rozložení redukovaného napětí $S$ , Mises v betonu a ocelové výztuži .....	43

Obrázek 26: Detail napjatosti ocelové výztuže v průřezu betonového tělesa při ohybovém zatížení .....	43
Obrázek 27: Rozložení celkové deformace U, Magnitude ve vyztuženém betonovém tělese s výztuží při třibodovém ohybovém zatížení .....	44
Obrázek 28: Deformovaný tvar betonového tělesa s výztuží při ohybovém zatížení (rovinný pohled) .....	44
Obrázek 29: Rozložení redukovaného napětí S, Mises ve vyztuženém betonovém tělese s ocelovou výztuží při třibodovém ohybovém zatížení .....	45
Obrázek 30: Rozložení celkové deformace U, Magnitude ve vyztuženém betonovém tělese s ocelovou výztuží při třibodovém ohybu .....	45
Obrázek 31: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – cementový potěr, 28 dní hydratace, bez výztuže .....	46
Obrázek 32: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – cementový potěr, 28 dní hydratace, ocelová výztuž $\varnothing$ 2 mm.....	47
Obrázek 33: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – cementový potěr, 28 dní hydratace, ocelová výztuž $\varnothing$ 4 mm.....	48
Obrázek 34: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 28 dní hydratace, bez výztuže .....	49
Obrázek 35: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 28 dní hydratace, ocelová výztuž $\varnothing$ 2 mm.....	50
Obrázek 36: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 28 dní hydratace, ocelová výztuž $\varnothing$ 4 mm.....	51
Obrázek 37: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – cementový potěr, 7 dní hydratace, bez výztuže .....	52
Obrázek 38: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – cementový potěr, 7 dní hydratace, ocelová výztuž $\varnothing$ 2 mm.....	53
Obrázek 39: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – cementový potěr, 7 dní hydratace, ocelová výztuž $\varnothing$ 4 mm.....	54
Obrázek 40: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 7 dní hydratace, bez výztuže .....	55
Obrázek 41: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 7 dní hydratace, ocelová výztuž $\varnothing$ 2 mm.....	56
Obrázek 42: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 7 dní hydratace, ocelová výztuž $\varnothing$ 4 mm.....	57

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled zkušebních vzorků .....	21
Tabulka 2: Přehled vstupních parametrů použitých v MKP simulaci .....	28
Tabulka 3: Charakteristické hodnoty pevnosti v ohybu a směrodatné odchyly průhybu betonových vzorků .....	32
Tabulka 4: Přehledová tabulka výsledků tahové zkoušky drátů .....	34
Tabulka 5: Vyhodnocení fázového složení betonových vzorků metodou XRPD .....	36
Tabulka 6: Vybrané hodnoty napětí a deformací z MKP simulací .....	59

## Seznam zkratek

ČSN	Česká státní norma
CAE	Computer-Aided Engineering (Inženýrství podporované počítačem)
MKP	Metoda konečných prvků
MIP	Mercury Intrusion Porosimetry (Rtuťová intruzní porozimetrie)
FEM	Finite Element Method (metoda konečných prvků)
XRPD	X-Ray Powder Diffraction (Rentgenová prášková difrakce)
R <sub>m</sub>	mez pevnosti v tahu
S, Mises	redukované napětí podle von Misesova kritéria
U, Magnitude	celková velikost posunutí (deformace)
E	modul pružnosti (Youngův modul)
$\epsilon$	poměrné přetvoření
$\epsilon_f$	poměrné přetvoření při přetržení
w/c	vodní součinitel (water/cement ration)
$\emptyset$	průměr (např. výztuže)

# Úvod

Beton patří mezi nejpoužívanější stavební materiály a jeho mechanické vlastnosti mají zásadní význam pro návrh a posuzování stavebních konstrukcí (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

Chování betonu při zatížení je ovlivněno zejména složením směsi, dobou hydratace, přítomností výztuže a mikrostrukturou materiálu. Mikrostruktura zahrnuje především pórovitost, velikost a rozložení pórů, strukturu cementového tmelu a vazby mezi cementovou maticí a kamenivem (Neville, 2011).

Experimentální ověřování mechanických vlastností betonu je důležité zejména pro stanovení pevnosti v tlaku a ohybu, modulu pružnosti, deformační odezvy a charakteru porušení, které nelze přesně určit pouze teoretickými nebo numerickými modely (ČSN EN 12390-5 (ČSN EN 12390-5, 2019); ČSN EN 1015-11 (ČSN EN 1015-11, 2020)).

V současnosti se stále více uplatňují numerické simulační metody založené na metodě konečných prvků (MKP), které umožňují modelovat mechanické chování materiálů a konstrukčních prvků. Pro jejich spolehlivé využití je nezbytné vycházet z experimentálně stanovených materiálových charakteristik a využívat experimentální výsledky pro kalibraci a ověření numerického modelu.

Cílem této diplomové práce je experimentální stanovení mechanických vlastností typových betonových vzorků pomocí zkoušek prováděných na univerzálním zkušebním stroji a následné porovnání dosažených výsledků s výsledky numerických simulací. Experimentální část práce je zaměřena na zkoušky pevnosti v ohybu a tahové zkoušky ocelové výztuže, doplněné o analýzu porušení vzorků.

Numerická část práce je založena na vytvoření výpočetního modelu zkoušených vzorků s využitím metody konečných prvků v prostředí softwaru Abaqus/CAE. V závěru práce jsou experimentální a numerické výsledky porovnány a komplexně zhodnoceny.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Beton

Beton patří mezi nejvýznamnější konstrukční materiály současného stavebnictví a nachází široké uplatnění při realizaci inženýrských i pozemních staveb. Jeho využití je dáno především kombinací relativně vysoké pevnosti v tlaku, dobré trvanlivosti, možnosti tvarování do požadovaných forem a dostupnosti základních surovin. Díky těmto vlastnostem je beton využíván jak pro nosné konstrukce, tak pro nenosné stavební prvky (Neville, 2011).

Z materiálového hlediska je beton kompozitní systém tvořený cementovou maticí, kamenivem a pórovou strukturou. Cementová matrice vzniká hydratací cementu a postupně obklopuje jednotlivá zrna kameniva, čímž dochází k vytvoření kompaktní struktury schopné přenášet zatížení. Vlastnosti betonu jsou ovlivněny nejen složením směsi, ale také způsobem zpracování, podmínkami zrání a dobou hydratace (Mehta & Monteiro, 2014).

Významnou výhodou betonu je možnost úpravy jeho vlastností změnou poměru jednotlivých složek. V závislosti na složení směsi se mění zejména pevnost v tlaku a v ohybu, pórovitost, modul pružnosti a odolnost vůči vnějším vlivům. Právě tato variabilita umožňuje přizpůsobit beton konkrétním požadavkům konstrukce.

Z mechanického hlediska je beton materiálem s vysokou pevností v tlaku, avšak omezenou pevností v tahu. Při tahovém nebo ohybovém zatížení dochází ke vzniku trhlin, které se postupně šíří a mohou vést k porušení prvku. Tento jev souvisí s přítomností pórů, mikrotrhlin a přechodových zón v mikrostruktuře materiálu (Mindess et al., 2003).

V konstrukční praxi je proto beton často kombinován s ocelovou výztuží, která přebírá tahová napětí a zvyšuje únosnost a spolehlivost konstrukce. Vzniklý kompozitní materiál, označovaný jako železobeton, umožňuje efektivní využití vlastností obou složek a představuje základ moderního stavebnictví.

Studium vlastností betonu je důležité nejen z hlediska návrhu konstrukcí, ale také pro pochopení jeho chování při zatížení a pro tvorbu numerických modelů. Experimentální měření mechanických vlastností poskytuje důležité vstupní údaje pro simulace pomocí metody konečných prvků, které umožňují analyzovat rozložení napětí a deformací v konstrukčních prvcích.

## 1.2 Složení betonu

Beton je kompozitní materiál složený z několika základních složek, jejichž vzájemný poměr a vlastnosti zásadně ovlivňují jeho mechanické a fyzikální charakteristiky. Mezi hlavní složky patří cement, kamenivo, voda a případné chemické přísady nebo minerální příměsi, které společně vytvářejí výslednou strukturu materiálu (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

Cement představuje pojivovou složku, která po smíchání s vodou vytváří cementovou pastu schopnou tuhnout a tvrdnout. V průběhu hydratace dochází k chemickým reakcím, při nichž vznikají hydratační produkty, které postupně vyplňují prostor mezi zrny kameniva a vytvářejí

pevnou cementovou maticí. Typ použitého cementu a jeho vlastnosti mají významný vliv na rychlost hydratace, vývoj pevnosti a výslednou mikrostrukturu betonu (Neville, 2011).

Kamenivo tvoří objemově největší část betonové směsi a významně ovlivňuje pevnost, deformovatelnost i objemovou stabilitu materiálu. Zrnitostní složení kameniva je jedním z klíčových faktorů, které určují hutnost výsledné struktury. Vhodná kombinace různých frakcí umožňuje lepší vyplnění prostoru mezi jednotlivými zrny, čímž dochází ke snížení množství pórů a ke zlepšení mechanických vlastností betonu (Mehta & Monteiro, 2014).

Jemné kamenivo, tvořené především pískem, vyplňuje mezery mezi většími zrny a přispívá k vytvoření kompaktní struktury. V případě jemnozrnných betonových směsí, kde není použito hrubé kamenivo, hraje vhodná kombinace jednotlivých frakcí písku zásadní roli při formování výsledné mikrostruktury a mechanických vlastností materiálu.

Další důležitou složkou je záměsová voda, která je nezbytná pro průběh hydratace cementu a současně ovlivňuje zpracovatelnost čerstvé směsi. Množství vody je jedním z nejvýznamnějších parametrů při návrhu složení betonu, protože přímo ovlivňuje pórovitost a tím i výslednou pevnost. Vyšší obsah vody zlepšuje zpracovatelnost směsi, avšak po jejím odpaření vzniká větší množství kapilárních pórů, které mohou snižovat mechanické vlastnosti materiálu (Neville, 2011).

Kromě základních složek mohou být do betonové směsi přidávány také chemické přísady a minerální příměsi, které upravují vlastnosti čerstvého i zatvrdlého betonu. Tyto látky mohou ovlivňovat například dobu tuhnutí, zpracovatelnost nebo vývoj pevnosti. V některých případech je však možné připravit betonovou směs pouze ze základních složek, zejména při laboratorním ověřování mechanických vlastností a studiu vlivu jednotlivých komponent na výsledné chování materiálu.

Výsledné vlastnosti betonu jsou vždy výsledkem vzájemného působení všech složek. Změna poměru cementu, kameniva a vody vede k odlišné mikrostruktuře, která se následně promítá do mechanických vlastností, pórovitosti a charakteru porušení. Studium vlivu jednotlivých složek je proto důležité zejména při experimentálním hodnocení betonových směsí a při tvorbě numerických modelů, které popisují jejich chování při zatížení.

### 1.3 Hydratace cementu

Hydratace cementu je základním fyzikálně-chemickým procesem, který rozhodujícím způsobem ovlivňuje vznik, vývoj a výsledné mechanické vlastnosti betonu. Po smíchání cementu s vodou dochází k postupným chemickým reakcím mezi jednotlivými minerálními složkami cementu a vodou, při nichž vznikají hydratační produkty. Tyto produkty postupně vyplňují prostor mezi zrny cementu a kameniva a vytvářejí pevnou cementovou maticí schopnou přenášet zatížení (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

Mezi hlavní složky portlandského cementu patří především silikátové fáze, zejména trikalciumpsilikát ( $C_3S$ ) a dikalciumsilikát ( $C_2S$ ), které mají zásadní vliv na vývoj pevnosti betonu. Reakce těchto složek s vodou vede ke vzniku hydratačních produktů, z nichž nejvýznamnější je kalcium-silikát-hydrát (C-S-H fáze). Tato fáze má jemnou gelovou strukturu a tvoří hlavní nosnou složku cementové matrice. Právě její množství a uspořádání zásadně ovlivňuje pevnost a tuhost betonu (Mehta & Monteiro, 2014).

Dalším významným produktem hydratace je hydroxid vápenatý, označovaný jako portlandit. Tento produkt vzniká jako vedlejší fáze při reakcích silikátových složek cementu s vodou. Portlandit má krystalickou strukturu a jeho přítomnost lze identifikovat například pomocí difrakčních metod. Kromě těchto hlavních složek vznikají v průběhu hydratace také další produkty, například ettringit, který ovlivňuje objemové změny a strukturu materiálu (Neville, 2011).

Hydratace cementu je proces, který probíhá postupně a může trvat velmi dlouhou dobu. Nejintenzivnější fáze reakcí probíhá v prvních hodinách a dnech po zamíchání směsi, kdy dochází k rychlému vývoji pevnosti. V následujících týdnech hydratace pokračuje pomaleji, avšak stále dochází k postupnému nárůstu množství hydratačních produktů a ke zpevňování cementové matrice. Tento proces se projevuje zvýšením pevnosti a snížením pórovitosti materiálu.

Významným parametrem, který ovlivňuje průběh hydratace, je množství záměsové vody. Vodní součinitel určuje poměr mezi množstvím vody a cementu ve směsi a má zásadní vliv na výslednou mikrostrukturu. Při vyšším množství vody dochází sice k lepší zpracovatelnosti směsi, avšak po jejím odpaření zůstává v materiálu větší množství kapilárních pórů. Tyto póry oslabují cementovou matici a mohou vést ke snížení pevnosti a trvanlivosti betonu (Neville, 2011).

V průběhu hydratace dochází k postupnému vyplňování prostoru mezi zrny cementu hydratačními produkty. Tím se zvyšuje hustota struktury a zlepšují se mechanické vlastnosti materiálu. Tento vývoj je patrný zejména při porovnání betonových vzorků v různých fázích zrání. Rozdíly v pevnosti mezi vzorky po několika dnech a po několika týdnech hydratace jsou způsobeny právě postupným vznikem a uspořádáním hydratačních produktů.

Z praktického hlediska je vývoj pevnosti betonu úzce spojen s dobou hydratace. V prvních dnech dochází k rychlému nárůstu pevnosti, který je způsoben především reakcemi trikalciumsilikátu. V pozdějších fázích se na nárůstu pevnosti podílí především pomalejší reakce dikalciumsilikátu. Z tohoto důvodu se mechanické vlastnosti betonu výrazně mění v čase, což je důležité zejména při hodnocení pevnosti vzorků po různých dobách zrání.

Pokračující hydratace má vliv nejen na pevnost, ale také na mikrostrukturu materiálu. S rostoucí dobou hydratace dochází ke snižování pórovitosti a k postupnému zpevňování přechodové zóny mezi kamenivem a cementovou maticí. Tyto změny mají přímý vliv na odolnost betonu vůči vzniku a šíření trhlin při mechanickém zatížení (Mehta & Monteiro, 2014).

Porozumění procesu hydratace je důležité nejen pro hodnocení mechanických vlastností betonu, ale také pro interpretaci experimentálních výsledků a pro tvorbu numerických modelů. Vývoj mikrostruktury v průběhu hydratace ovlivňuje parametry materiálových modelů používaných při simulaci chování betonu pomocí metody konečných prvků.

## 1.4 Mikrostruktura betonu

Mikrostruktura betonu představuje vnitřní uspořádání jeho složek a významně ovlivňuje mechanické vlastnosti i způsob porušení materiálu. Beton je nehomogenní kompozit tvořený cementovou maticí, kamenivem a pórovou strukturou (Mehta & Monteiro, 2014).

Cementová matrice vzniká hydratací cementu a obklopuje zrna kameniva, čímž vytváří spojitou strukturu přenášející zatížení. Její vlastnosti jsou ovlivněny zejména vodním součinitelem, stupněm hydratace a podmínkami zrání (Neville, 2011).

Významnou roli hraje také pórová struktura, která zahrnuje póry různé velikosti. Vyšší pórovitost vede ke snížení pevnosti a zhoršení mechanických vlastností materiálu (Mehta & Monteiro, 2014).

Důležitou oblastí je rozhraní mezi kamenivem a cementovou matricí, tzv. přechodová zóna (ITZ), která se vyznačuje vyšší pórovitostí a nižší pevností. Tato oblast často představuje iniciační místo vzniku trhlin při zatížení (Neville, 2011).

Mikrostruktura se vyvíjí v čase v závislosti na průběhu hydratace, což se projevuje zejména zvýšením hustoty matrice a nárůstem pevnosti. Tyto změny jsou patrné při porovnání vzorků s různou dobou hydratace.

## 1.5 Mechanické vlastnosti betonu

Mechanické vlastnosti betonu patří mezi klíčové parametry určující jeho využití v konstrukční praxi. Beton se vyznačuje výrazně odlišným chováním v tlaku a v tahu, což souvisí s jeho nehomogenní strukturou, přítomností pórů a mikrotrhlin. Tyto charakteristiky zásadně ovlivňují jeho odezvu při různých typech zatížení, zejména při ohybovém namáhání (Neville, 2011).

Nejvýznamnější charakteristikou betonu je pevnost v tlaku, která je běžně používána jako základní parametr pro klasifikaci a návrh betonových konstrukcí. Vysoká pevnost v tlaku je dána schopností cementové matrice a kameniva přenášet zatížení při stlačení. Hodnota této pevnosti závisí především na vodním součiniteli, stupni hydratace a kvalitě mikrostruktury materiálu (Mehta & Monteiro, 2014).

Pevnost betonu v tahu je oproti tomu výrazně nižší. V důsledku přítomnosti mikrotrhlin a pórů dochází při tahovém namáhání k postupnému rozšiřování těchto defektů, což vede k relativně rychlému vzniku makroskopických trhlin a následnému porušení materiálu. Beton je proto považován za materiál s převážně křehkým charakterem porušení (Mindess et al., 2003).

Z hlediska konstrukčního využití je zásadní pevnost v ohybu, která představuje kombinaci tahového a tlakového namáhání. Při ohybovém zatížení dochází k rozdělení průřezu na oblast tlakovou a tahovou. V tahové oblasti vznikají napětí, která iniciují mikrotrhliny zejména v místech lokálních nehomogenit a v přechodové zóně mezi cementovou matricí a kamenivem. Tyto mikrotrhliny se při dalším zatěžování spojují a vytvářejí dominantní trhlinu vedoucí k porušení vzorku (Neville, 2011).

Průběh ohybového zatěžování lze obecně rozdělit do několika fází. V počáteční fázi dochází k elastickému chování materiálu s přibližně lineárním vztahem mezi napětím a deformací. S rostoucím zatížením dochází k rozvoji mikrotrhlin, které po dosažení kritického napětí přecházejí do makroskopické trhliny v tahové oblasti. U nevytuzeného betonu má porušení obvykle náhlý a křehký charakter.

Mechanické chování betonu při ohybu je výrazně ovlivněno mikrostrukturou, zejména pórovitostí a kvalitou přechodové zóny. Hustší a homogennější struktura zpravidla vede k vyšší pevnosti a pomalejšímu šíření trhlin, zatímco vyšší pórovitost podporuje rychlejší iniciaci

porušení (Mehta & Monteiro, 2014). Významnou roli hraje také doba hydratace, neboť s postupujícím zráním dochází k zahušťování cementové matrice a nárůstu pevnosti.

Přítomnost výztuže zásadně mění mechanismus porušení. Zatímco nevyztužený beton po vzniku hlavní trhliny ztrácí únosnost, výztuž umožňuje přenos tahových napětí i po jejím vzniku. Dochází tak k postupnějšímu průběhu zatěžování, vyšší deformovatelnosti a změně charakteru porušení z křehkého na částečně duktilní (Mindess et al., 2003). U vyztuženého betonu se často vytváří větší množství jemnějších trhlin místo jedné dominantní, což přispívá k rovnoměrnějšímu rozložení napětí v tahové oblasti.

Studium mechanického chování betonu při ohybovém zatížení je důležité nejen z experimentálního hlediska, ale také pro tvorbu numerických modelů. Metoda konečných prvků umožňuje analyzovat rozložení napětí, sledovat vznik kritických oblastí a porovnávat numerické výsledky s experimentálně stanovenými hodnotami. Pochopení mechanismu vzniku a šíření trhlin je proto klíčové pro správnou interpretaci experimentálních dat i pro potvrzení výpočtových modelů.

## 1.6 Beton s výztuží

Beton je materiál s velmi dobrou schopností přenášet tlaková napětí, avšak jeho pevnost v tahu je relativně nízká. Při tahovém nebo ohybovém zatížení proto dochází ke vzniku trhlin již při poměrně malých deformacích. Z tohoto důvodu je beton v konstrukční praxi často doplňován o ocelovou výztuž, která přebírá tahová napětí a výrazně ovlivňuje celkové mechanické chování výsledného kompozitu (Neville, 2011).

Spolupráce betonu a oceli je umožněna především dobrou přilnavostí mezi oběma materiály. Tato přilnavost zajišťuje přenos napětí mezi cementovou maticí a výztuží, čímž dochází k jejich společnému působení při zatížení. Beton současně chrání ocel před mechanickým poškozením a v běžných podmínkách i před korozí, zatímco ocel přebírá tahová napětí, která by jinak vedla k rychlému vzniku trhlin a porušení materiálu (Mindess et al., 2003).

Z materiálového hlediska má přítomnost výztuže zásadní vliv na mechanismus porušení betonu. U nevyztuženého betonu dochází při ohybovém zatížení po vzniku hlavní trhliny k rychlému poklesu únosnosti a k náhlému porušení. Výztuž však umožňuje přenášet tahová napětí i po vzniku první trhliny, čímž dochází k postupnému rozvoji porušení a ke změně charakteru chování z křehkého na více deformovatelné (Neville, 2011).

Přítomnost výztuže ovlivňuje také rozložení a charakter trhlin. Zatímco u nevyztuženého betonu vzniká zpravidla jedna dominantní trhlina, u vyztuženého betonu dochází často k vytvoření většího počtu jemnějších trhlin. Tyto trhliny jsou rovnoměrněji rozloženy v oblasti tahového namáhání a jejich vznik je ovlivněn schopností výztuže přenášet část zatížení (Mehta & Monteiro, 2014).

Mechanické chování vyztuženého betonu je ovlivněno nejen přítomností výztuže, ale také jejími vlastnostmi, množstvím, umístěním a průměrem. Výztuž s větším průřezem je schopna přenášet vyšší tahová napětí a výrazněji ovlivňuje průběh zatěžování. V důsledku toho může docházet k většímu rozvoji deformací před porušením a k postupnějšímu nárůstu trhlin v tahové oblasti.

V průběhu zatěžování dochází nejprve k elastickému chování celého systému beton–ocel. S rostoucím zatížením se v tahové oblasti betonu začínají objevovat mikrotrhliny, které se postupně rozšiřují. Po vzniku první makroskopické trhliny přebírá větší část tahového zatížení výztuž, zatímco beton v okolí trhliny přestává být schopen přenášet tahová napětí. Tento mechanismus umožňuje další zatěžování prvku bez okamžitého porušení.

Důležitým faktorem je také přenos napětí v oblasti rozhraní mezi betonem a ocelí. Kvalita tohoto spojení ovlivňuje schopnost výztuže účinně přebírat zatížení. Nedostatečná přilnavost může vést ke skluzu výztuže a ke snížení únosnosti prvku. Naopak dobré spojení umožňuje rovnoměrnější rozložení napětí a postupnější vývoj trhlin.

Z hlediska mechanického chování je přítomnost výztuže spojena také se zvýšením deformovatelnosti materiálu. Vyztužený beton je schopen přenášet zatížení i po vzniku trhlin, což vede k postupnějšímu průběhu zatěžování a k větší schopnosti redistribuce napětí. Tento jev je zvláště významný při ohybovém zatížení, kdy výztuž přebírá tahová napětí v dolní části průřezu.

Studium vlivu výztuže na chování betonu je důležité nejen z hlediska návrhu konstrukcí, ale také pro interpretaci experimentálních výsledků. Přítomnost výztuže může výrazně změnit průběh zatěžovacích křivek, způsob porušení i charakter trhlin. Tyto skutečnosti je nutné zohlednit také při tvorbě numerických modelů, kde je třeba popsat interakci mezi betonem a ocelí a jejich společné působení při zatížení.

## 1.7 Druhy betonu

Beton jako stavební materiál může mít velmi rozdílné vlastnosti v závislosti na složení směsi, technologii výroby a způsobu použití. V průběhu vývoje stavebnictví vznikla celá řada typů betonů, které jsou optimalizovány pro konkrétní aplikace. Jednotlivé druhy se liší zejména objemovou hmotností, pevností, strukturou a způsobem zpracování (Neville, 2011).

Jedním ze základních kritérií dělení betonu je jeho objemová hmotnost. Na tomto základě lze beton rozdělit na lehký, obyčejný a těžký. Lehký beton se vyrábí s použitím lehkého kameniva a vyznačuje se nižší hmotností a lepšími tepelněizolačními vlastnostmi. Obyčejný beton je nejčastěji používaným typem a obsahuje běžné přírodní kamenivo. Těžký beton se vyrábí s použitím kameniva s vysokou hustotou a používá se například pro speciální konstrukce, kde je požadována vyšší hmotnost nebo zvýšená ochrana proti záření (Mehta & Monteiro, 2014).

Dalším důležitým hlediskem je pevnost betonu. Kromě běžných konstrukčních betonů se v současnosti používají také vysokohodnotné betony s vyšší pevností a lepšími mechanickými vlastnostmi. Tyto materiály se vyznačují hutnější mikrostrukturou, nižší pórovitostí a vyšší odolností vůči vnějším vlivům. Speciální skupinu tvoří ultra vysokohodnotné betony, které dosahují velmi vysokých hodnot pevnosti a jsou používány především pro náročné konstrukční aplikace (Mindess et al., 2003).

Podle technologie zpracování lze rozlišit například samozhutnitelný beton, který je schopen vlastní vahou vyplnit formu bez nutnosti vibrace. Tento typ betonu se vyznačuje vysokou tekutostí a dobrou schopností zaplnit i složitější tvary. Další skupinu tvoří stříkaný beton, který je aplikován pomocí speciální technologie na povrch konstrukce, například při sanacích nebo při výstavbě tunelů.

Specifickou skupinou jsou vláknobetony, do kterých jsou přidávána krátká vlákna z oceli, plastu nebo jiných materiálů. Tato vlákna zlepšují schopnost betonu přenášet tahová napětí, omezují šíření trhlin a zvyšují jeho houževnatost. Vláknobetony jsou využívány například pro průmyslové podlahy nebo prefabrikované prvky.

Z hlediska struktury kameniva lze rozlišit také jemnozrnné betony, které neobsahují hrubé kamenivo a jsou tvořeny především cementovou maticí a jemným pískem. Tento typ betonu se používá zejména pro laboratorní účely, prefabrikované prvky nebo speciální aplikace, kde je požadována homogennější struktura. Jemnozrnné směsi umožňují lepší kontrolu nad složením a vlastnostmi materiálu a jsou vhodné pro studium mechanického chování při zatížení.

Vlastnosti jednotlivých druhů betonu jsou spojeny s jejich mikrostrukturou a složením. Změna typu kameniva, množství cementu nebo vodního součinitele vede k odlišné pórovitosti a tím i k rozdílům v mechanických vlastnostech. Volba vhodného typu betonu proto vždy závisí na požadovaných vlastnostech a způsobu použití.

V současné době se vyvíjejí také nové typy betonů určené pro moderní technologie, například pro 3D tisk. Tyto směsi musí splňovat specifické požadavky na zpracovatelnost, rychlost tuhnutí a mechanické vlastnosti. Vývoj nových druhů betonu je spojen s výzkumem materiálových vlastností a s využitím numerických metod pro simulaci jejich chování při zatížení.

## 1.8 Metoda konečných prvků (MKP / FEM)

Metoda konečných prvků (MKP), anglicky Finite Element Method (FEM), představuje numerickou metodu určenou k řešení úloh mechaniky kontinua, přenosu tepla a dalších fyzikálních dějů. V oblasti stavebnictví a strojírenství patří mezi nejpoužívanější nástroje pro analýzu napětí, deformací a stability konstrukčních prvků (Zienkiewicz et al., 2005).

Základním principem metody je rozdělení řešené oblasti na konečný počet menších částí – konečných prvků, což se označuje jako diskretizace. Každý prvek je definován uzlovými body, ve kterých jsou sledovány základní veličiny, například posunutí nebo deformace. Spojením jednotlivých prvků vzniká výpočtová síť aproximující skutečný tvar analyzovaného objektu. Rozložení fyzikálních veličin v prvku je popsáno aproximačními funkcemi, na jejichž základě je sestavena soustava rovnic popisujících chování celé konstrukce. Po aplikaci okrajových podmínek a zatížení je tato soustava řešena numericky (Zienkiewicz et al., 2005).

Pro simulaci betonových těles se nejčastěji používají objemové prvky, které umožňují popsat prostorové rozložení napětí a deformací v celém objemu materiálu. Přesnost numerické analýzy závisí především na kvalitě výpočtové sítě. Jemnější síť umožňuje lépe zachytit lokální koncentrace napětí, například v oblasti zatížení nebo v místech vzniku trhlin, avšak za cenu vyšší výpočetní náročnosti. Je proto nutné volit kompromis mezi přesností a efektivitou výpočtu.

Důležitým krokem při tvorbě modelu je správná definice okrajových podmínek a zatížení, které musí odpovídat reálnému uspořádání konstrukce. Nesprávné zadání může vést k významnému zkreslení výsledků. Stejně zásadní je volba materiálového modelu. Beton je nehomogenní a nelineární materiál s odlišným chováním v tlaku a v tahu, kdy při zatížení dochází ke vzniku mikrotrhlin a postupnému snižování tuhosti. Pro realistickou simulaci je proto vhodné použít materiálové modely schopné zohlednit nelineární chování a vznik porušení.

Při simulaci vyztuženého betonu je nutné modelovat jak betonovou matici, tak výztuž a jejich vzájemnou interakci. Přenos napětí mezi těmito materiály zásadně ovlivňuje rozložení napjatosti i mechanismus porušení.

Metoda konečných prvků umožňuje analyzovat rozložení napětí a deformací i v případech, kdy analytické řešení není možné. Numerické simulace jsou tak využívány nejen při návrhu konstrukčních prvků, ale také při jejich optimalizaci a při studiu mechanismu porušení. V kombinaci s experimentálními měřeními představuje MKP účinný nástroj pro kalibraci výpočtového modelu a pro porovnání numerických výsledků s reálným chováním konstrukce.

V rámci této práce byla metoda konečných prvků využita pro simulaci tříbodového ohybu betonových vzorků. Numerický model vycházel z geometrie zkušebních těles o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm a zohledňoval varianty bez výztuže i s ocelovou výztuží o průměru 2 mm a 4 mm.

Ukázky vytvořených numerických modelů, včetně geometrie, diskretizace a okrajových podmínek, jsou uvedeny v kapitole 3.7.1 (obr. 17–30). Tyto modely sloužily pro analýzu rozložení napětí a deformací při ohybovém zatížení a umožnily následné porovnání s experimentálními výsledky.

## 2 Experimentální část

### 2.1 Úvod do experimentální části

Součástí experimentální části je nejen samotné testování vzorků, ale také příprava směsí, mikroskopická a rentgenová analýza a porovnání chování materiálu.

Všechny zkoušky byly provedeny na vzorcích vyrobených ve dvou variantách – cementový potěr a vlastní míchaná betonová směs. U obou typů variant byly testovány vzorky s různým průměrem ocelové výztuže, bez výztuže po 7 a 28 dnech hydratace.

### 2.2 Použité materiály

#### **Cementový potěr**

Cementový potěr použitý pro výrobu zkušebních těles byl průmyslově vyráběný materiál weberbat potěr 30 MPa. Jedná se o jednosložkovou cementovou směs určenou pro vytváření připojených potěrů s deklarovanou pevností v tlaku 30 MPa. Základní technické parametry materiálu byly převzaty z technického listu výrobce (Saint-Gobain Weber, 2023). Přehled vybraných technických vlastností použitých v této práci je uveden v přílohách 1 a 2.

#### **Křemičité písky**

Kamenivo použité pro přípravu vlastní míchané betonové směsi bylo tvořeno křemičitými písky tří zrnitostních frakcí (0,1–0,5 mm, 0,6–1,2 mm a 1,4–2,0 mm), které byly zvoleny s cílem dosáhnout vhodného zrnitostního složení směsi. Technické vlastnosti použitého kameniva byly převzaty z technického listu výrobce (Sandssystem s.r.o., 2015). Přehled základních parametrů použitých písků je uveden v přílohách 3 a 4.

#### **Cement**

Pro výrobu vlastní míchané betonové směsi byl použit balený cement CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R, pod obchodním označením evoBuild Low Carbon Cement 30, vyráběný společností Heidelberg Materials. Cement splňuje požadavky normy ČSN EN 197-1 (ČSN EN 197-1, 2012).

Z technické dokumentace výrobce byly převzaty zejména údaje o pevnosti v tlaku, počátku a konce tuhnutí, jemnosti mletí a objemové stálosti cementu (Heidelberg Materials, 2023). Přehled vybraných technických parametrů použitých v této práci je uveden v přílohách 5, 6, 7 a 8.

Použitý cement CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R byl zvolen s ohledem na požadovanou zpracovatelnost betonové směsi, dostatečnou pevnost pro provedení ohybových zkoušek a omezení rychlosti nárůstu hydratačního tepla. Tento typ cementu je zároveň běžně využíván při výrobě betonových a maltových směsí, kde je požadována vyvážená kombinace pevnosti, zpracovatelnosti a stability hydratačního procesu.

#### **Ocelová výztuž**

Jako výztuž byl použit svařovací drát pro autogenní svařování oceli ESAB G104 o průměrech 2 mm a 4 mm, určený pro svařování ocelových konstrukcí plamenem. Jedná se o poměděný drát vhodný pro použití ve všech svařovacích polohách, běžně využívaný při stavebních a

zámečnických pracích a pro zařízení pracující při teplotách do 425 °C. Základní technické parametry použitého drátu byly převzaty z katalogových údajů výrobce. Přehled vybraných vlastností použitých drátů je uveden v příloze 9.

## 2.3 Příprava zkušebních vzorků

### 2.3.1 Příprava a specifikace testovacích betonových vzorků

Zkušební vzorky byly zhotoveny v souladu s požadavky normy ČSN EN 1015-11 (ČSN EN 1015-11, 2020) ve formách o rozměrech 40 × 40 × 160 mm (Matest S.p.a., model E102). Výkresová dokumentace zkušebního tělesa, včetně rozměrů a rozmístění ocelové výztuže je uvedena v příloze 10.

Vzorky byly po zhotovení hutněny ve formách a po 24 hodinách vyndány z forem. Následně byly vzorky uloženy do vodní lázně, kde probíhalo řízené zrání po dobu 7 a 28 dní.

Celkem bylo vyrobeno 36 zkušebních vzorků, rozdělených podle typu směsi, doby hydratace a průměru ocelové výztuže. Přehled jednotlivých variant je uveden v tabulce 1.

**Tabulka 1: Přehled zkušebních vzorků**

Směs	Hydratace [dny]	Výztuž Ø [mm]	Počet vzorků
Potěr	7	0	3
Potěr	7	2	3
Potěr	7	4	3
Míchaná	28	0	3
Míchaná	28	2	3
Míchaná	28	4	3
Potěr	7	0	3
Potěr	7	2	3
Potěr	7	4	3
Míchaná	28	0	3
Míchaná	28	2	3
Míchaná	28	4	3

*Zdroj: vlastní zpracování*

Vyztužené vzorky obsahovaly čtyři podélně uložené ocelové dráty v rozích průřezu po celé délce vzorku (viz obrázek 1). Toto uspořádání bylo zvoleno s cílem zajistit rovnoměrné namáhání při ohybové zkoušce.



**Obrázek 1: Příprava betonových zkušebních těles ve formách**

*Zdroj: vlastní fotografie*

Cílem tohoto uspořádání bylo zamezit nežádoucímu kroucení vzorku a dosáhnout rovnoměrnějšího namáhání při ohybu.

### 2.3.2 Charakteristika směsí vzorků

Pro účely srovnání byly připraveny dvě odlišné směsi betonu, jejich složení a charakter se lišil jak původem, tak zrnitostí použitého kameniva.

Směs A – cementová směs Weberbat potěr 30 MPa, určená pro potěrové aplikace. Jedná se hotovou suchou směs s optimalizovanou zrnitostí plniva a přísadami zlepšující zpracovatelnost a průběh hydratačního procesu.

Směs B – betonová směs vlastní receptury, ručně míchaná jemnozrná směs připravená v poměru 1:3:1 (cement:písek:voda), navržená v souladu dle normy ČSN EN 206+A2 (ČSN EN 206+A2, 2021). Poměr voda – cement byl zvolen s ohledem na požadovaný vodní součinitel (w/c).

Písková složka byla tvořena kombinací tří frakcí, kdy každá frakce byla tvořena stejným dílem.

- Frakce 1: 0,1 - 0,5 mm,
- Frakce 2: 0,6 - 1,2 mm,
- Frakce 3: 1,4 - 2,0 mm.

Hrubé kamenivo nebylo záměrně do směsi zahrnuto, aby byl zachován charakter směsi v porovnání se strukturou cementového potěru.

Každému zkušebnímu vzorku bylo přiřazeno jednoznačné označení, které vyjadřuje základní charakteristiky vzorku. Označení se skládá z několika částí, které postupně udávají pořadí vzorku, dobu hydratace, pořadí ve skupině, přítomnost a průměr ocelové výztuže a typ použité směsi.

Struktura označení vzorku je následující:

- Pořadové číslo vzorku: 01-03,
- Doba hydratace: 7 nebo 28 dní,
- Pořadové číslo skupiny: 01-03,
- Průměr ocelové výztuže: 0, 2, 4 mm,
- Typ směsi: P – cementový potěr, M – vlastní míchaná betonová směs.

Například označení 01-28-01-0-P představuje první vyrobený vzorek s dobrou hydratace 28 dní, první ve své skupině, bez výztuže, vyrobený z cementové potěrové směsi.

## 2.4 Použité metody testování

### 2.4.1 Mikroskopie

Mikrostruktura jednotlivých vzorků byla sledována pomocí digitálního optického mikroskopu Keyence VHX 6000 (Keyence, Belgie) při zvětšení 50× (viz obrázek 2). Betonové vzorky o rozměrech 40 × 40 × 160 mm byly pro potřeby mikroskopické analýzy přeříznuty napříč, následně upraveny postupným broušením brusnými papíry různé zrnitosti a následným leštěním povrchu tak, aby byla získána rovinná a dostatečně hladká plocha vhodná pro pozorování mikrostruktury.

K přípravě byla použita manuální jednokotoučová bruska a leštička QPOL 250 M1.



**Obrázek 2: Mikroskopické pozorování betonového vzorku v laboratorních podmínkách**

*Zdroj: vlastní fotografie*

### 2.4.2 Rentgenová prášková difrakce (XRPD)

XRPD byla použita pro analýzu vybraných referenčních vzorků pomocí Bragg-Brentanova  $\theta$ - $\theta$  difraktometru (Bruker D8 Advance, USA, záření Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ )) při 40 kV a 40 mA v úhlovém rozsahu 5–80°. Počítání  $2\theta$  bylo nastaveno na 0,4 s pro každý krok 0,0102°. Kvantitativní fázová

analýza (QPA) byla provedena pomocí TOPAS 4.2 (Bruker AXS) s použitím Rietveldova upřesnění. Kvantifikace amorfni fáze byla provedena pomocí interního standardu s přidavkem 10 hm % oxidu zinečnatého.

#### 2.4.3 Stanovení porozity

Porozita betonových vzorků byla stanovena metodou rtuťové intruzní porozimetrie (MIP) pomocí přístroje Autopore IV 9500 (Micromeritics, USA) na vybraných referenčních vzorcích.

#### 2.4.4 Tahová zkouška ocelových drátů

Tahová zkouška ocelových drátů použitých jako výztuž byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6892-1 (ČSN EN ISO 6892-1, 2020) na zkušebním přístroji Instron 5984. Pro zkoušku bylo použito celkem 10 vzorků, z toho 5 drátů o průměru 2 mm a 5 drátů o průměru 4 mm.

V souladu s požadavky normy byla zvolena počáteční měřená délka  $L_0$  200 mm  $\pm$  2 mm, vzdálenost mezi čelistmi zkušebního přístroje odpovídala podmínce  $L_0 \pm 3b_0$ , minimálně však  $L_0 + 20$  mm.

Celková délka zkušebního drátu byla 200 mm, 20 mm na každé straně bylo použito pro upnutí do čelistí zkušebního přístroje. Čistá měřená délka mezi čelistmi byla 160 mm.

#### 2.4.5 Metodika zkoušky pevnosti betonových vzorků v ohybu pomocí tříbodového zatěžovacího uspořádání

Zkouška pevnosti byla provedena dle normy ČSN EN 1015-11 (ČSN EN 1015-11, 2020). Zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byly realizovány na zkušebním zařízení Criterion 45.305 výrobce MTS Systems ve zkušebním uspořádání odpovídajícím tříbodovému ohybu (viz obrázek 3).

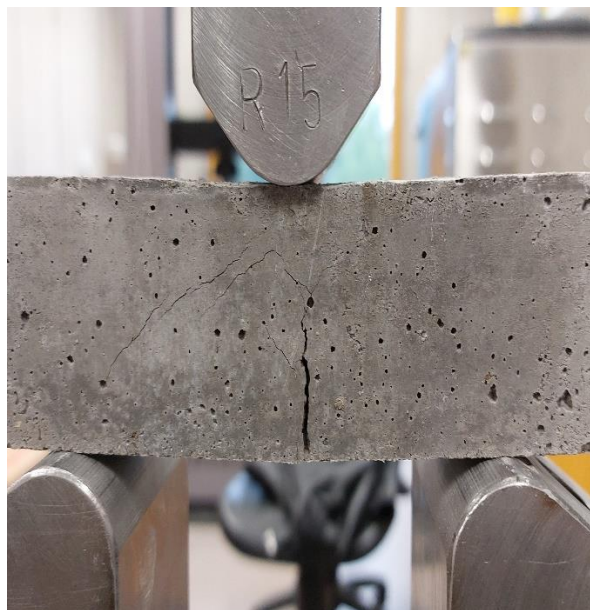
Zkušební těleso bylo uloženo na dvou podpěrách se vzájemnou vzdáleností  $100 \pm 0,5$  mm, která odpovídá požadavkům normy ČSN EN 1015-11 (ČSN EN 1015-11, 2020) pro hranolová zkušební

tělesa o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Detail uspořádání zkoušky, včetně zatěžovacího trnu a podpěr, je znázorněn na obrázku 4.



**Obrázek 3: Zkušební zařízení pro tříbodovou ohybovou zkoušku**

*Zdroj: vlastní fotografie*



**Obrázek 4: Detail betonového vzorku, zatěžovacího trnu a podpěr**

*Zdroj: vlastní fotografie*

#### 2.4.6 Vyhodnocení trhlin pomocí softwaru ImageJ

Pro vyhodnocení trhlin vzniklých po ohybové zkoušce byl použit software ImageJ. Pořízené fotografie porušených vzorků byly importovány do programu a následně upraveny pomocí změny kontrastu a prahování (threshold), čímž došlo ke zvýraznění trhlin oproti okolnímu materiálu.

Upravené snímky sloužily pro vizuální porovnání charakteru porušení jednotlivých vzorků. Na základě tohoto porovnání bylo možné posoudit vliv typu směsi, doby hydratace a přítomnosti ocelové výztuže na vznik a charakter trhlin.

#### **Vyhodnocení zkoušky pevnosti v ohybu**

Naměřené hodnoty zatěžující síly a průhybu byly po provedení tříbodové ohybové zkoušky přepočteny na napětí a deformaci. Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena podle vztahu:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

kde

$\sigma$  = pevnost v ohybu [MPa],

F = maximální zatěžující síla [N],

L = rozpětí podpor [mm] (L = 100 mm podle normy ČSN EN 1015-11 (ČSN EN 1015-11, 2020)),

b = šířka průřezu zkušebního tělesa [mm],

h = výška průřezu zkušebního tělesa [mm].

Modul pružnosti byl stanoven z lineární části závislosti zatížení na průhybu podle vztahu:

$$E = \frac{L^3}{4bh^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad (2)$$

kde  $\Delta F$  představuje změnu zatěžující síly a  $\Delta y$  odpovídající změnu průhybu vzorku v lineární části zatěžovací křivky.

Výpočty byly provedeny na základě průměrných hodnot jednotlivých měření. Takto získané hodnoty byly dále využity pro konstrukci grafických závislostí a následné porovnání s výsledky numerické simulace.

## 2.5 Vyhodnocení tahové zkoušky ocelové výztuže

### Stanovení modulu pružnosti

Modul pružnosti ocelových drátů byl stanoven z počáteční lineární části tahových křivek metodou lineární regrese. Pro výpočet byly použity pouze hodnoty odpovídající elastické oblasti materiálu, aby nedošlo k ovlivnění výsledku počátečním dosednutím vzorku v čelistech ani přechodem do plastické deformace.

Pro ocelový drát o průměru 2 mm byl vyhodnocen interval poměrného přetvoření

$$\varepsilon = 0,0002 \text{ až } 0,000999.$$

Pro ocelový drát o průměru 4 mm byl vyhodnocen interval poměrného přetvoření

$$\varepsilon = 0,000225 \text{ až } 0,001.$$

Z těchto úseků byla pomocí lineární regrese určena směrnice závislosti napětí na přetvoření, která odpovídá modulu pružnosti materiálu.

Stanovené hodnoty:

- průměr ocelového drátu 2 mm:  $E_z = 148\,155,7 \text{ MPa}$  ( $\approx 148 \text{ GPa}$ )
- průměr ocelového drátu 4 mm:  $E_z = 167\,012,6 \text{ MPa}$  ( $\approx 167 \text{ GPa}$ )

Přetvoření bylo určováno z posuvu traverzy zkušebního stroje, kdy nebyl použit extenziometr. Stanovené hodnoty proto představují tzv. zdánlivý modul pružnosti, do kterého se promítá nejen deformace samotného drátu, ale i poddajnost zkušebního zařízení a upínací soustavy.

Skutečný modul pružnosti konstrukční oceli se pohybuje přibližně kolem hodnoty 210 GPa. Zjištěné hodnoty jsou však vhodné pro vzájemné porovnání obou průměrů ocelové výztuže a pro interpretaci jejich chování při ohybových zkouškách betonových vzorků.

## 2.6 Numerická simulace v softwaru Abaqus/CAE

Numerická simulace byla v této práci provedena metodou konečných prvků v prostředí softwaru Abaqus/CAE (Dassault Systèmes, 2014). Cílem bylo vytvořit výpočetní model betonového vzorku zatíženého tříbodovým ohybem a porovnat jeho chování s experimentálními výsledky.

Model vycházel z geometrie zkušebních těles o rozměrech  $40 \times 40 \times 160$  mm se zatěžovacím uspořádáním odpovídajícím tříbodovému ohybu dle normy ČSN EN 1015-11 (ČSN EN 1015-11, 2020). Geometrie modelu a jeho diskretizace jsou uvedeny v kap. 3.7.1 (viz obr. 17–30).

Beton byl modelován jako objemové těleso a ocelová výztuž jako samostatné prvky uložené v rozích průřezu. Materiálové vlastnosti betonu vycházely z experimentálně stanoveného modulu pružnosti, kdy byl beton uvažován jako lineárně elastický materiál. Vlastnosti ocelové výztuže byly určeny z tahových zkoušek dle normy ČSN EN ISO 6892-1 (ČSN EN ISO 6892-1, 2020).

Přenos zatížení mezi betonem a výztuží byl zajištěn kontaktní vazbou. Model byl zatížen silou odpovídající experimentálními podmínkám a okrajové podmínky odpovídaly uložení vzorku na dvou podpěrách.

Výsledkem simulace byly mapy napětí typu  $S, Mises$  a pole deformací, které byly využity pro porovnání s experimentálními výsledky. Použitý model nezohledňuje vznik trhlin, a proto popisuje především elastickou fázi zatěžování.

### 2.6.1 Vstupní parametry simulace

Do numerického modelu byly zadávány materiálové parametry stanovené na základě experimentálních měření provedených při tříbodových ohybových zkouškách.

Základním vstupním parametrem byl použit efektivní modul pružnosti stanovený z experimentálně naměřených závislostí zatížení a průhybu. Tento modul představuje tuhost vzorku v ohybu a zahrnuje nejen vlastnosti samotného materiálu, ale i vliv mikrotrhlin, struktury směsi a částečně i vliv geometrie zkušebního tělesa. Pro účely lineární MKP simulace byl tento přístup zvolen jako vhodné zjednodušení, které umožňuje realistické porovnání jednotlivých variant.

Pro každou skupinu vzorků byly do modelu zadány průměrné hodnoty maximálního zatížení a odpovídajícího průhybu stanovené z experimentálních měření. Modul pružnosti betonu byl určen na základě nevyztužených vzorků a tato hodnota byla použita pro všechny varianty dané skupiny, včetně vzorků s ocelovou výztuží.

Hustota betonu použitá v numerickém modelu byla zadávána v hodnotě  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Tato hodnota odpovídá běžnému rozmezí objemové hmotnosti lehčích betonových směsí a cementových potěrů, které se pohybují v intervalu přibližně  $1800\text{--}2400 \text{ kg/m}^3$  (Neville, 2011).

Tabulka 2 uvádí přehled průměrných hodnot použitých jako vstupní parametry numerického modelu pro jednotlivé kombinace směsi, stáří vzorku a průměru ocelové výztuže.

**Tabulka 2: Přehled vstupních parametrů použitých v MKP simulaci**

Sada	Hydratace [dny]	Směr	Výztuž $\varnothing$ [mm]	Průměrné zatížení [N]	Průměrný Průhyb [%]	Průměrný Youngův modul pružnosti [MPa]
01	28	potěr	0	2249,8	0,4	541,9
02	28	potěr	2	2694,5	0,8	541,9
03	28	potěr	4	7721,5	1,3	541,9
04	28	míchaný	0	2888,3	0,4	665,7
05	28	míchaný	2	3253,9	0,5	665,7
06	28	míchaný	4	7316,1	1,1	665,7
07	7	potěr	0	1236,9	0,5	253,3
08	7	potěr	2	2030,9	0,6	253,3
09	7	potěr	4	3826,9	1,0	253,3
10	7	míchaný	0	1882,5	0,5	400,6
11	7	míchaný	2	1644,1	0,4	400,6
12	7	míchaný	4	6631,9	1,1	400,6

*Zdroj: vlastní zpracování na základě experimentálních dat*

Tabulka 2 uvádí, že hodnoty modulu pružnosti betonu se liší v závislosti na stáří betonu a typu použité směsi. Vzorky po 28 dnech hydratace vykazují vyšší tuhost než vzorky po 7 dnech, což odpovídá postupnému vývoji mechanických vlastností během zrání cementového kompozitu.

Tyto hodnoty byly následně použity jako materiálové parametry lineárně pružného modelu v programu Abaqus/CAE pro simulaci tříbodového ohybu.

## 3 Výsledky a diskuze

### 3.1 Mechanické zkoušky betonových vzorků

Cílem provedených zkoušek bylo posouzení vlivu složení betonové směsi, doby hydratace a přítomnosti ocelové výztuže na výslednou mechanickou pevnost zkušebních těles.

Základní mechanickou zkouškou použitou v této práci byla zkouška pevnosti v ohybu, která umožňuje posoudit chování betonových vzorků při ohybovém namáhání, kdy dochází k současnému působení tahových a tlakových napětí v průřezu. Doplnkově byla provedena tahová zkouška ocelových drátů použitých jako výztuž, jejímž cílem bylo stanovit mechanické vlastnosti drátů a umožnit následné porovnání s chováním vyztužených betonových vzorků.

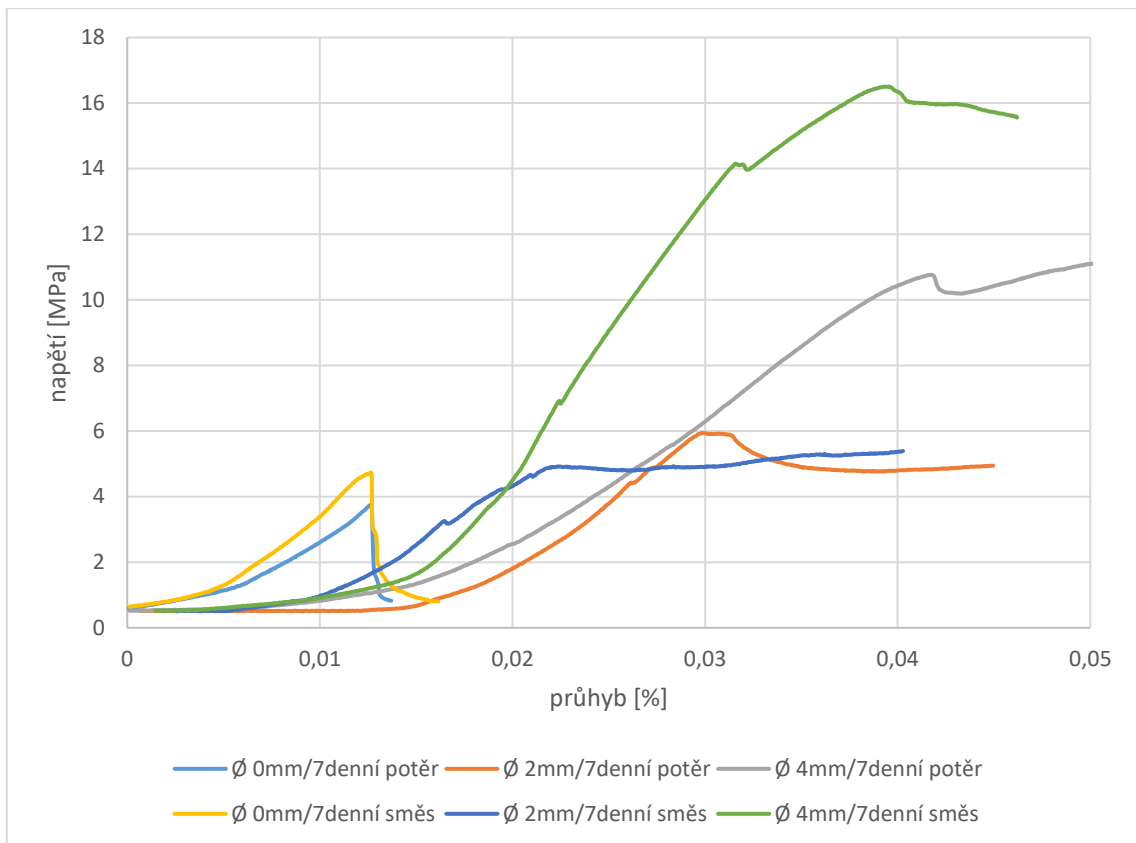
#### 3.1.1 Grafy vyhodnocených dat ze zkoušek pevnosti v ohybu betonových vzorků

V této podkapitole jsou prezentovány výsledky zkoušek pevnosti v ohybu betonových vzorků ve formě průměrných grafů vyhodnocených dat. Zobrazené závislosti vycházejí z přepočtu naměřených hodnot a slouží k porovnání mechanického chování jednotlivých vzorků v závislosti na složení betonové směsi, době hydratace a přítomnosti ocelové výztuže. Grafy umožňují přehledné srovnání jednotlivých variant zkoušených vzorků.

Obrázek 5 znázorňuje závislost napětí na průhybu při tříbodové ohybové zkoušce betonových vzorků po 7 dnech hydratace. Graf obsahuje průměrné křivky pro cementový potěr i vlastní míchanou betonovou směs, a to pro varianty bez výztuže a s ocelovou výztuží o průměru 2 mm a 4 mm.

U nevyztužených vzorků je patrný typický křehký charakter porušení s náhlým poklesem napětí po dosažení maxima, což odpovídá chování betonu při ohybovém zatížení (Neville, 2011). Naopak u vyztužených vzorků dochází k plynulejšímu průběhu zatěžovacích křivek a k přenosu zatížení i po vzniku trhliny. Tento efekt je výraznější se zvyšujícím se průměrem výztuže, kdy roste maximální dosažené napětí i odpovídající průhyb.

Vlastní míchaná betonová směs vykazuje u vyztužených variant vyšší deformovatelnost, což může souviset s odlišnou strukturou materiálu a charakterem interakce mezi cementovou maticí a ocelovou výztuží.



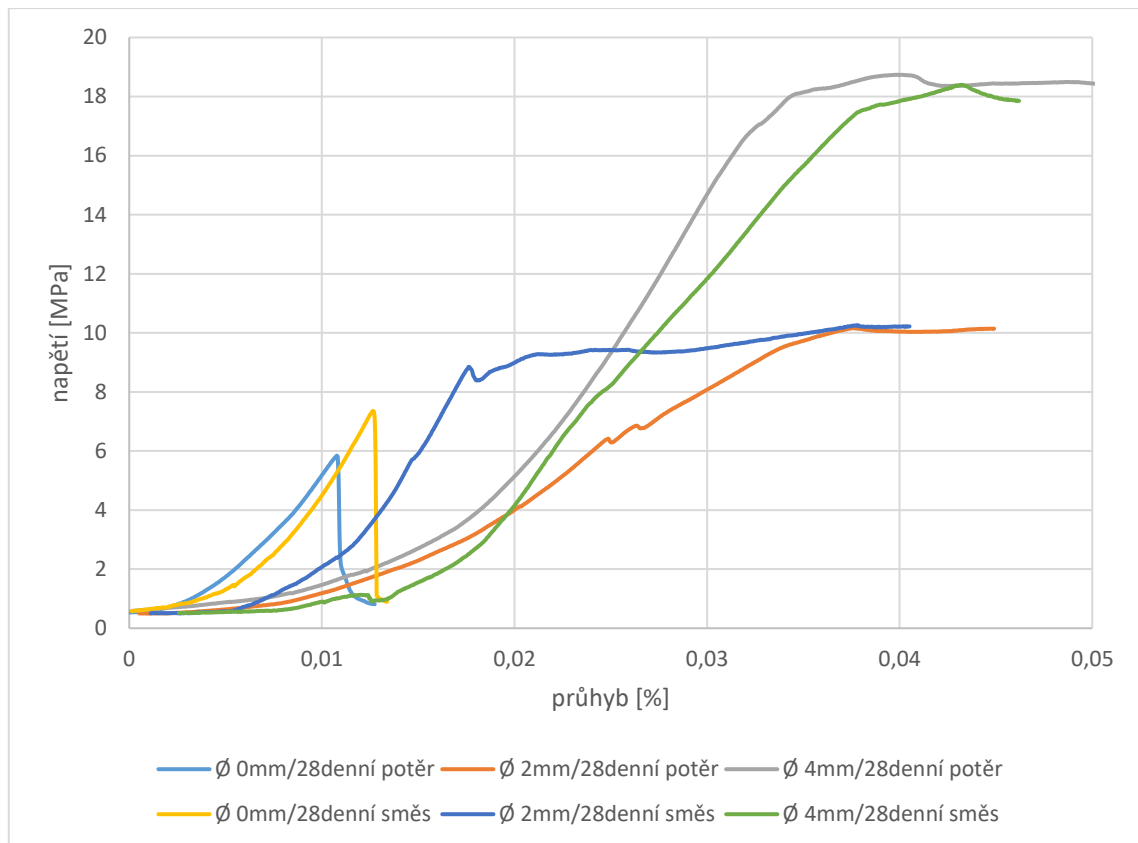
**Obrázek 5: Průměrné grafy vyhodnocených dat ze zkoušky pevnosti v ohybu betonových vzorků z cementového potěru a vlastní míchané betonové směsi při 7denní hydrataci**

*Zdroj: vlastní zpracování grafu (MS Excel)*

Na obrázku 6 je znázorněna závislost napětí na průhybu při tříbodové ohybové zkoušce betonových vzorků po 28 dnech hydratace. Graf obsahuje průměrné křivky pro cementový potěr i vlastní míchanou betonovou směs ve stejných variantách jako u předchozího grafu.

Ve srovnání se vzorky po 7 dnech hydratace dosahují tyto vzorky vyšších maximálních napětí a nižších průhybů, což souvisí s vyšší tuhostí a pevností vyzrálější cementové matrice. U nevyztužených vzorků zůstává zachován křehký charakter porušení, zatímco u vyztužených vzorků je schopnost přenášet zatížení i po vzniku trhliny.

Se zvyšujícím se průměrem výztuže roste maximální dosažené napětí i odpovídající deformace, kdy nejvyšších hodnot dosahují vzorky s výztuží o průměru 4 mm.



**Obrázek 6: Průměrné grafy vyhodnocených dat ze zkoušky pevnosti v ohybu betonových vzorků z cementového potěru a vlastní míchané betonové směsi při 28denní hydrataci**

*Zdroj: vlastní zpracování grafu (MS Excel)*

Přítomnost ocelové výztuže významně ovlivňuje charakter porušení betonových vzorků. Zatímco nevyztužené vzorky vykazují typické křehké porušení, vyztužené vzorky jsou schopny přenášet zatížení i po vzniku trhliny. Tento jev souvisí s tím, že výztuž přebírá tahová napětí v oblasti porušení a umožňuje další deformaci prvku bez okamžité ztráty únosnosti (Mehta & Monteiro, 2014).

Doba hydratace se projevuje nárůstem maximálního napětí a současně zvýšením tuhosti materiálu. U vzorků po 28 dnech hydratace dochází k výraznějšímu zpevnění cementové matrice v důsledku pokračující hydratace a zahušťování mikrostruktury (Neville, 2011).

Rozdíly mezi cementovým potěrem a vlastní míchanou betonovou směsí se projevují především v oblasti deformovatelnosti. Vlastní míchaná směs vykazuje vyšší deformace po vzniku trhliny, zatímco cementový potěr má vyrovnanější průběh zatěžovacích křivek. Tyto rozdíly lze přičíst odlišnému složení směsí, zrnitosti plniva a způsobu přípravy.

### 3.1.2 Srovnání výsledků zkoušek pevnosti v ohybu

Tato kapitola uvádí porovnání výsledků zkoušek pevnosti v ohybu betonových vzorků vyrobených z cementového potěru a z vlastní míchané betonové směsi. Srovnání je zaměřeno na vliv složení směsi, doby hydratace a přítomnosti ocelové výztuže na mechanické chování zkušebních těles při ohybovém zatížení.

Pro přehledné vyhodnocení byly z jednotlivých měření stanoveny průměrné hodnoty pevnosti v ohybu a modulu pružnosti. Současně byla vypočtena směrodatná odchylka pevnosti a modulu pružnosti, která vyjadřuje rozptyl dosažených hodnot v rámci jednotlivých sad vzorků (viz tabulka 3).

Z dosažených výsledků je zřejmý významný vliv doby hydratace na mechanické vlastnosti betonu. U všech sledovaných variant dochází po 28 dnech k nárůstu pevnosti v ohybu oproti vzorkům po 7 dnech hydratace. Tento trend odpovídá průběhu hydratačních reakcí cementu, při nichž dochází k postupnému vzniku hydratačních produktů a zahušťování mikrostruktury cementového tmelu, což vede ke zvýšení pevnosti i tuhosti materiálu (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

**Tabulka 3: Charakteristické hodnoty pevnosti v ohybu a směrodatné odchylky průhybu betonových vzorků**

Sada	Hydratace [dny]	Směs	Výztuž $\varnothing$ [mm]	Pevnost [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]
01	7	Potěr	0	2,9 ± 0,5	253,3 ± 18,9
02	7	Potěr	2	4,8 ± 1,3	331,2 ± 36,7
03	7	Potěr	4	8,9 ± 2,1	378,5 ± 81,3
04	28	Potěr	0	5,3 ± 0,9	541,9 ± 140,9
05	28	Potěr	2	6,3 ± 0,5	331,4 ± 71,1
06	28	Potěr	4	18,1 ± 1,7	572,8 ± 91,9
07	7	Míchaná	0	4,4 ± 1,2	400,6 ± 132,1
08	7	Míchaná	2	3,9 ± 0,2	380,6 ± 28,2
09	7	Míchaná	4	15,5 ± 0,9	634,7 ± 184,5
10	28	Míchaná	0	6,8 ± 0,9	665,7 ± 179,8
11	28	Míchaná	2	7,6 ± 0,6	707,9 ± 86,8
12	28	Míchaná	4	17,1 ± 2,7	772,9 ± 366,4

*Zdroj: vlastní zpracování z experimentálních dat (MS Excel)*

Výsledky dále potvrzují vliv přítomnosti ocelové výztuže, který se projevuje zejména nárůstem pevnosti v ohybu u vyztužených vzorků. Nejvyšších hodnot dosahují vzorky s výztuží o průměru 4 mm, což odpovídá schopnosti výztuže přebírat tahová napětí vznikající při ohybovém zatížení a tím zvyšovat celkovou únosnost prvku.

Při porovnání jednotlivých směsí lze pozorovat, že vlastní míchaná betonová směs dosahuje u vyztužených variant srovnatelných až vyšších hodnot pevnosti než cementový potěr. Tento rozdíl může souviset s odlišnou strukturou směsi, zrnitostí plniva a charakterem přenosu napětí na rozhraní beton–ocel.

Směrodatná odchylka pevnosti ukazuje, že variabilita výsledků je u některých sad vyšší, zejména u vyztužených vzorků. Tento jev může být způsoben lokálními rozdíly v uložení výztuže, heterogenitou betonové směsi nebo rozdílným průběhem porušení jednotlivých zkušebních těles.

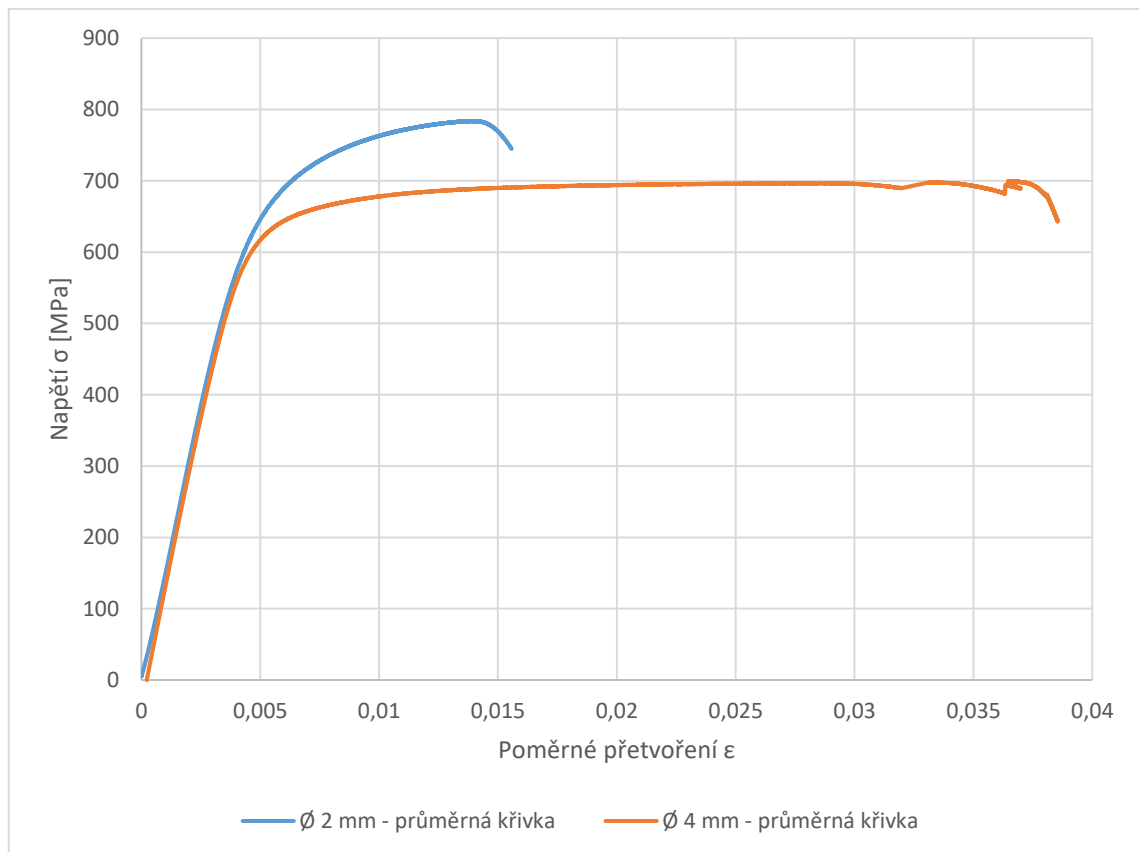
Z hlediska modulu pružnosti je patrné, že vyšší hodnoty byly dosaženy především u vzorků po 28 dnech hydratace, což odpovídá vyšší tuhosti materiálu v důsledku pokročilejšího stupně hydratace cementu.

### 3.2 Tahová zkouška ocelové výztuže

V následujícím grafu jsou prezentovány výsledky tahové zkoušky ocelových drátů o průměru 2 mm a 4 mm ve formě průměrných tahových křivek. Surová naměřená data byla nejprve přepočtena na odpovídající hodnoty napětí a poměrného přetvoření a následně byla z těchto dat stanovena průměrná křivka jako aritmetický průměr z pěti opakovaných měření pro každý průměr ocelového drátu.

Modul pružnosti byl stanoven postupem uvedeným v kapitole 2.4.

Obrázek 7 zobrazuje výsledky tahové zkoušky ocelových drátů o průměru 2 mm a 4 mm ve formě průměrných tahových křivek napětí a poměrného přetvoření.



**Obrázek 7: Průměrné tahové křivky ocelových drátů o  $\varnothing$  2 mm a  $\varnothing$  4 mm získané z tahové zkoušky při pokojové teplotě**

*Zdroj: vlastní zpracování grafu (MS Excel)*

Porovnáním obou křivek je patrné, že ocelové dráty různých průměrů vykazují odlišný průběh plastické deformace, zatímco dosažené maximální hodnoty napětí se pohybují ve srovnatelném rozsahu. Tyto rozdíly se následně mohou projevit při spolupráci výztuže s betonovou maticí při ohybovém namáhání.

Z tahových zkoušek ocelových drátů byly stanoveny základní mechanické charakteristiky materiálu, které jsou shrnuty v tabulce 4. Oba průměry vykazují typické chování konstrukční oceli při tahovém namáhání, charakterizované lineární elastickou oblastí, přechodem do plastické deformace a dosažením maximální pevnosti před porušením.

**Tabulka 4: Přehledová tabulka výsledků tahové zkoušky drátů**

Výztuž $\varnothing$ [mm]	Max napětí $R_m$ [MPa]	Poměrné přetvoření při $R_m$ $\epsilon$ [-]	Poměrné přetvoření při přetržení $\epsilon_f$ [-]	Zdánlivý modul pružnosti $E_z$ [GPa]
2	784	0,014 $\pm$ 0,004	0,016 $\pm$ 0,004	148,2 $\pm$ 49,8
4	699	0,037 $\pm$ 0,011	0,039 $\pm$ 0,011	167 $\pm$ 42,1

*Zdroj: vlastní zpracování na základě experimentálních dat (MS Excel)*

Porovnáním maximálních hodnot napětí je patrné, že ocelový drát o průměru 2 mm dosahuje vyšší pevnosti v tahu ( $R_m \approx 784$  MPa) než drát o průměru 4 mm ( $R_m \approx 699$  MPa). Tento rozdíl může souviset s technologickým zpracováním materiálu, kdy tenčí dráty bývají více tvářeny za studena, což vede ke zvýšení jejich pevnosti.

Naopak ocelový drát o průměru 4 mm vykazuje vyšší poměrné přetvoření jak při dosažení maximálního napětí, tak při přetržení. Silnější drát je tedy schopen absorbovat větší plastickou deformaci před porušením, což může mít významný vliv na jeho chování při spolupráci s betonem, zejména při přenosu zatížení po vzniku trhlin.

Stanovené hodnoty zdánlivého modulu pružnosti se pohybují v rozmezí přibližně 148–167 GPa, což je méně než tabulková hodnota modulu pružnosti konstrukční oceli ( $\approx 210$  GPa). Tento rozdíl je dán způsobem měření přetvoření, které bylo určováno z posuvu traverzy zkušebního stroje bez použití extenziometru. Do výsledné hodnoty se tak promítá nejen deformace samotného drátu, ale také poddajnost upínací soustavy a zkušebního zařízení. Podobné odchylky jsou při tomto způsobu měření běžně uváděny i v literatuře (Callister & Rethwisch, 2018). Přesto jsou získané hodnoty vhodné pro vzájemné porovnání obou typů výztuže.

Zjištěné tahové vlastnosti ocelových drátů se následně promítají i do chování betonových vzorků při ohybovém zatížení. Výztuž s vyšší pevností a deformovatelností je schopna po vzniku trhliny přenášet větší část zatížení a přispívá k plynulejšímu průběhu zatěžovacích křivek. Tento efekt byl patrný zejména u vzorků vyztužených dráty o průměru 4 mm, které vykazovaly vyšší únosnost a větší deformace po porušení betonové matrice.

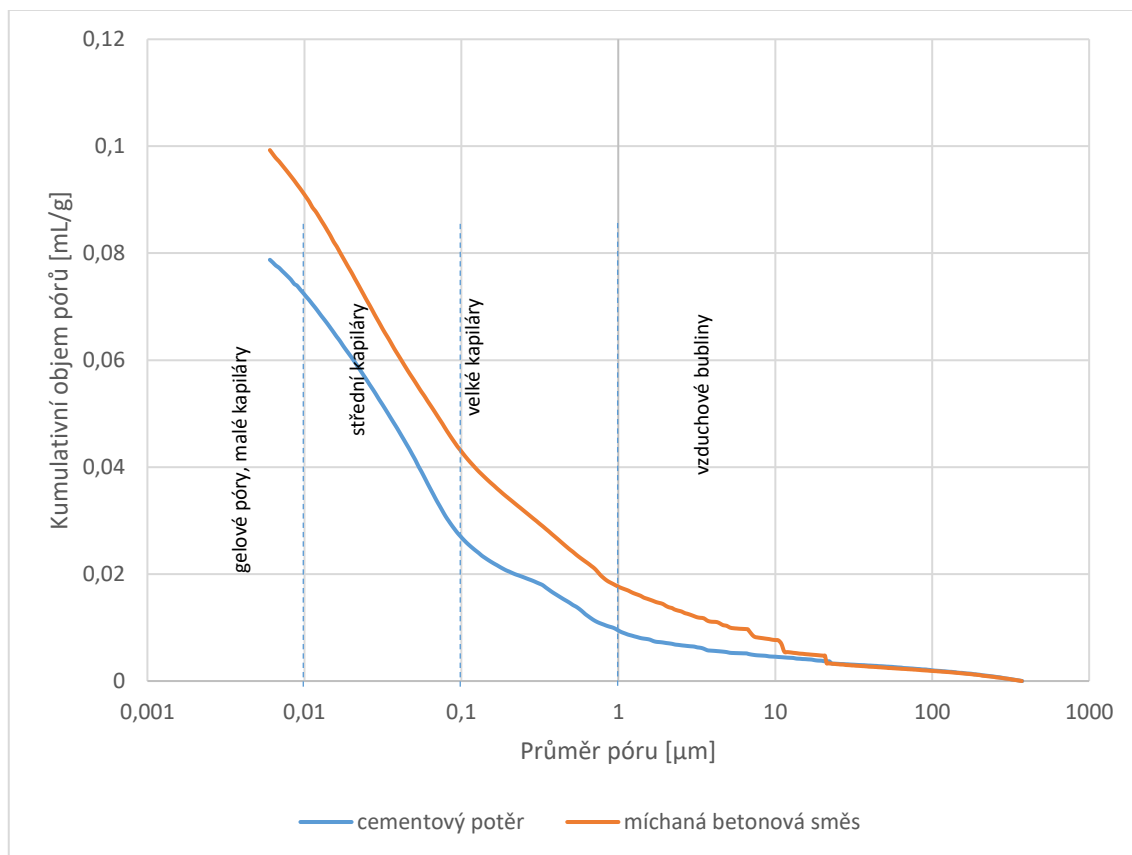
### 3.3 Porozita

Porozita betonu úzce souvisí s množstvím a rozložením pórů vznikajících během zpracování betonové směsi a v průběhu hydratace cementu. Pórová struktura materiálu významně ovlivňuje mechanické vlastnosti betonu, zejména pevnost, modul pružnosti a trvanlivost (Mehta & Monteiro, 2014; Neville, 2011).

Velikost a množství pórů jsou ovlivněny především složením směsi, vodním součinitelem, způsobem hutnění a podmínkami zrání betonu (Neville, 2011).

Pro zajištění srovnatelných podmínek byly analyzovány vzorky bez ocelové výztuže po 28 dnech hydratace. Cílem bylo posoudit rozdíly v pórové struktuře mezi oběma typy směsí při shodných podmínkách zrání.

Na obrázku 8 je znázorněno kumulativní rozdělení objemu pórů v závislosti na jejich průměru pro oba typy zkoumaných betonových směsí. Z grafu je viditelné, že pórová struktura obou materiálů se liší zejména v oblasti kapilárních a větších pórů, které mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti a trvanlivost betonu (Mehta & Monteiro, 2014; Neville, 2011).



**Obrázek 8: Kumulativní rozdělení objemu pórů v závislosti na průměru pórů stanovené metodou rtuťové porozimetrie pro betonové vzorky z cementového potěru a vlastní míchané betonové směsi**

*Zdroj: vlastní zpracování na základě experimentálních dat (MS Excel)*

Vzorky vyrobené z vlastní míchané betonové směsi vykazují vyšší kumulativní objem pórů v celém sledovaném rozsahu velikostí pórů ve srovnání se vzorky cementového potěru. Tento rozdíl je nejvýraznější v oblasti kapilárních pórů (řádově 0,01–1 μm), které mají dominantní vliv na pevnost a tuhost cementových kompozitů.

Vyšší podíl kapilárních pórů u vlastní míchané směsi naznačuje méně kompaktní mikrostrukturu cementové matrice, což se projevuje nižší pevností a vyšší deformovatelností materiálu. Tento závěr je v souladu s výsledky mechanických zkoušek, kde vlastní míchaná směs vykazovala vyšší deformace při zatížení.

Naopak cementový potěr vykazuje nižší celkový objem pórů a příznivější distribuci velikostí pórů, což odpovídá jeho kompaktnější struktuře a vyšší homogenitě.

Zjištěné rozdíly lze přičíst odlišné struktuře cementové matrice a rozdílnému vodnímu součiniteli směsí, které významně ovlivňují vznik a distribuci pórů během hydratace cementu (Mehta & Monteiro, 2014).

### 3.4 XRPD

XRPD byla použita k identifikaci fázového složení betonových vzorků a k posouzení rozdílů ve výskytu hlavních hydratačních produktů cementu u obou typů směsí.

XRPD byla provedena na vzorcích cementového potěru a míchané betonové směsi bez ocelové výztuže po 28 dnech hydratace. Výběr této varianty umožnil porovnání fázového složení obou směsí při stejném stáří a identické konfiguraci výztuže.

**Tabulka 5: Vyhodnocení fázového složení betonových vzorků metodou XRPD**

Směs	c / wt%										
	Amorphous	Quartz	Portlandite	Calcite	Alite	Muscovite	Clinochlore	Ettringite	Gypsum	Belite	Rutile
Míchaná	42,3	27,5	4,6	9,9	1,7	4,6	0,4	7,3	0,6	0,5	0,7
Potěr	49,1	18,1	3,7	9,9	1,7	6,1	1,4	7,7	1,1	0,6	0,6

*Zdroj: vlastní zpracování dodaných experimentálních dat*

Uvedené hodnoty v tabulce 5 představují hmotnostní zastoupení jednotlivých krystalických a amorfních fází stanovené na základě vyhodnocení difrakčních záznamů metodou XRPD. Amorfní podíl zahrnuje především hydratační produkty cementu, které nelze jednoznačně identifikovat pomocí difrakčních maxim.

Z výsledků XRPD analýzy vyplývá, že obě zkoumané směsi vykazují rozdíly ve fázovém složení, zejména v podílu amorfní fáze a obsahu křemenné složky. Vyšší amorfní podíl u cementového potěru lze přičíst optimalizovanému složení směsi a jemnější struktuře cementové matrice, která podporuje tvorbu hydratačních produktů.

Vlastní míchaná betonová směs vykazuje vyšší obsah křemene, což souvisí s vyšším podílem hrubších zrn kameniva a odlišným zrnitostním složením směsi. Přítomnost portlanditu a ettringitu u obou směsí potvrzuje probíhající hydratační proces cementu.

Tyto rozdíly se projevují i v mechanickém chování vzorků, kdy vyšší podíl amorfní fáze u cementového potěru odpovídá nižší pórovitosti a vyšší pevnosti, zatímco vyšší obsah křemene u míchané směsi souvisí s odlišnou deformací a průběhem zatěžovacích křivek.

28denní hydratace byla zvolena z důvodu, že v této fázi je mikrostruktura materiálu dostatečně vyvinutá a hydratační procesy jsou z větší části ustálené, což umožňuje hodnocení fázového složení a pórové struktury.

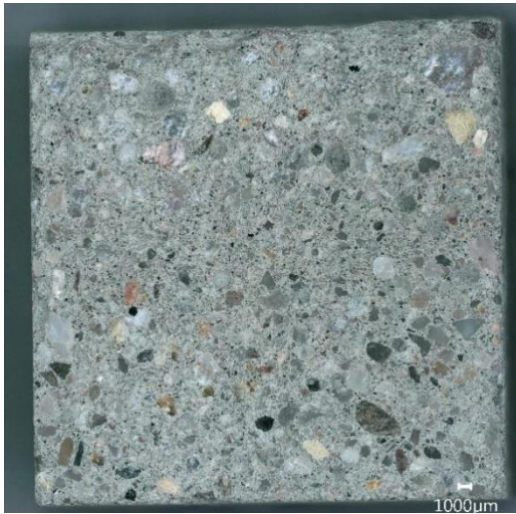
### 3.5 Mikrostruktura materiálu

Mikrostrukturní analýza byla provedena s cílem porovnat charakter mikrostruktury betonových vzorků vyrobených z cementového potěru a z vlastní míchané betonové směsi a posoudit souvislost zjištěných rozdílů s výsledky mechanických zkoušek, porozity a fázového složení.

Na obrázku 9 je homogenní struktura cementové matrice s rovnoměrně rozptýleným jemným kamenivem. Póry jsou převážně menších rozměrů a rovnoměrně rozmístěné v celém objemu vzorku. Pojivo a kamenivo působí kompaktně bez viditelných trhlin.

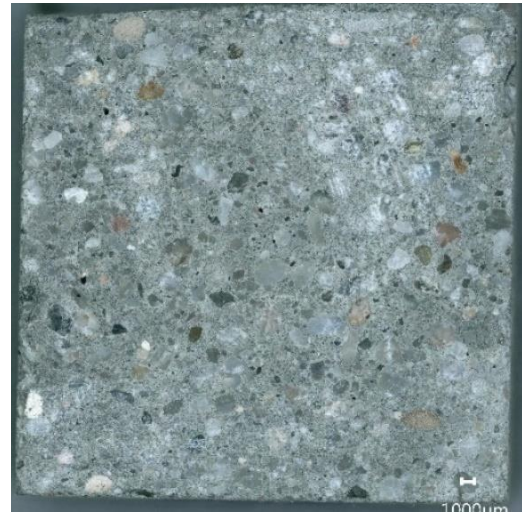
Na obrázku 10 je viditelná mikrostruktura vlastní míchané betonové směsi vykazující vyšší různorodost, zejména v oblasti mezi pojivem a kamenivem. Viditelné jsou patrně větší póry a

nepravidelná struktura, které mohou souviset s odlišným složením směsi a ručním způsobem přípravy.



**Obrázek 9: Mikrostruktura betonového vzorku z cementového potěru bez výztuže po 28 dnech hydratace (optická mikroskopie, zvětšení 50x)**

*Zdroj: obrázek vyexportovaný ze softwaru*



**Obrázek 10: Mikrostruktura betonového vzorku z vlastní míchané betonové směsi bez výztuže po 28 dnech hydratace (optická mikroskopie, zvětšení 50x)**

*Zdroj: obrázek vyexportovaný ze softwaru*

Obrázek 11 představuje mikrostrukturu vzorku vykazující kompaktní a stejnorodou cementovou matici s rovnoměrně rozptýleným jemným kamenivem. Přítomnost výztuže nemá v řezu výrazný vliv na charakter mikrostruktury, póry jsou převážně menších rozměrů a rovnoměrně rozmístěné.

Obrázek 12 zobrazuje vlastní míchanou betonovou směs, u které je viditelná vyšší různorodost mikrostruktury, zejména v oblasti mezi pojivem a kamenivem. Jsou zde viditelné větší póry a nepravidelnosti struktury, které mohou souviset s odlišným složením směsi a ručním způsobem přípravy.



**Obrázek 11: Mikrostruktura betonového vzorku z cementového potěru s ocelovou výztuží  $\varnothing$  2 mm po 28 dnech hydratace (optická mikroskopie, zvětšení 50x)**

*Zdroj: obrázek vyexportovaný ze softwaru*



**Obrázek 12: Mikrostruktura betonového vzorku z vlastní míchané betonové směsi s ocelovou výztuží  $\varnothing$  2 mm po 28 dnech hydratace (optická mikroskopie, zvětšení 50x)**

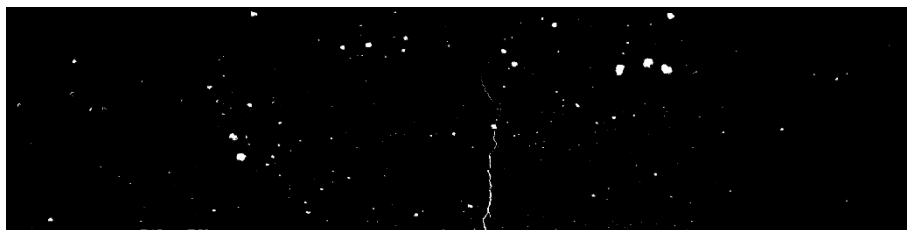
*Zdroj: obrázek vyexportovaný ze softwaru*

Porovnání mikrostruktury betonových vzorků s ocelovou výztuží o průměru 2 mm po 28 dnech hydratace ukazuje, že přítomnost výztuže nemá v pozorovaném řezu zásadní vliv na charakter cementové matrice ani na rozložení pórů. Rozdíly v mikrostruktuře jsou dány především druhem betonové směsi.

Vzorky z cementového potěru vykazují kompaktnější a stejnorodou strukturu, zatímco u vlastní míchané betonové směsi je patrná vyšší nestejnorodost a větší výskyt pórů. Tyto rozdíly odpovídají výsledkům porozity a mechanických zkoušek a potvrzují vliv složení směsi a technologie přípravy na mikrostrukturu betonového materiálu.

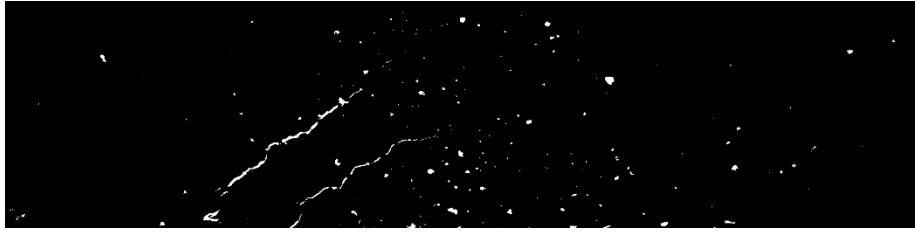
### 3.6 Analýza trhlin po ohybové zkoušce

Kapitola se zabývá analýzou trhlin vzniklých v betonových vzorcích po ohybové zkoušce. Snímky porušených vzorků byly vyhodnoceny pomocí softwaru ImageJ s cílem porovnat charakter porušení jednotlivých variant zkoušených těles. Obrázky 13-16 znázorňují průběh šíření trhlin vzniklých v oblasti vzorku během tříbodové zkoušky. Binární zobrazení bylo použito pro zvýraznění trhliny a potlačení vlivu okolní struktury materiálu.



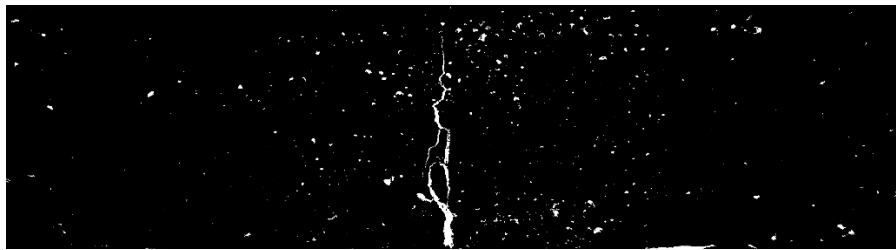
**Obrázek 13: Binární obraz trhlin betonového vzorku z cementového potěru bez výztuže po 28 dnech hydratace, získaný zpracováním snímku v software ImageJ**

*Zdroj: obrázek vyexportovaný ze softwaru ImageJ*



**Obrázek 14:** Binární obraz trhlín betonového vzorku z cementového potěru s ocelovou výztuží  $\varnothing$  2 mm po 28 dnech hydratace, získaný zpracováním snímku v softwaru ImageJ

*Zdroj: obrázek vyexportovaný ze softwaru ImageJ*



**Obrázek 15:** Binární obraz trhlín betonového vzorku z vlastní míchané betonové směsi bez výztuže po 28 dnech hydratace, získaný zpracováním snímku v softwaru ImageJ

*Zdroj: obrázek vyexportovaný ze softwaru ImageJ*



**Obrázek 16:** Binární obraz trhlín betonového vzorku z vlastní míchané betonové směsi s ocelovou výztuží  $\varnothing$  4 mm po 28 dnech hydratace, získaný zpracováním snímku v softwaru ImageJ

*Zdroj: obrázek vyexportovaný ze softwaru ImageJ*

Betonový vzorek z vlastní míchané betonové směsi s ocelovou výztuží o průměru 4 mm vykazuje výrazně odlišný charakter porušení ve srovnání s nevyztuženým vzorkem. Místo jedné dominantní trhliny je viditelný vznik rozsáhlého systému více trhlín, které jsou jemnější a rozvětvené.

Vyšší průměr výztuže umožňuje přenášet tahové napětí i po vzniku první trhliny, což vede k postupnému porušení a ke zvýšení deformovatelnosti vzorků. Tento způsob porušení odpovídá chování všech hodnocených variant, což je v souladu s výsledky mechanických zkoušek pevnosti v ohybu.

### 3.7 Numerická simulace

Numerická simulace tříbodového ohybu byla provedena v prostředí Abaqus/CAE. Betonové těleso bylo modelováno jako objemové těleso s definovanými materiálovými parametry odpovídajícími experimentálně stanoveným hodnotám modulu pružnosti. Ocelová výztuž byla

modelována jako samostatné těleso vložené do betonové matrice. Mezi betonem a výztuží byla definována kontaktní vazba umožňující přenos napětí na rozhraní materiálů.

### 3.7.1 Geometrie a diskretizace modelu

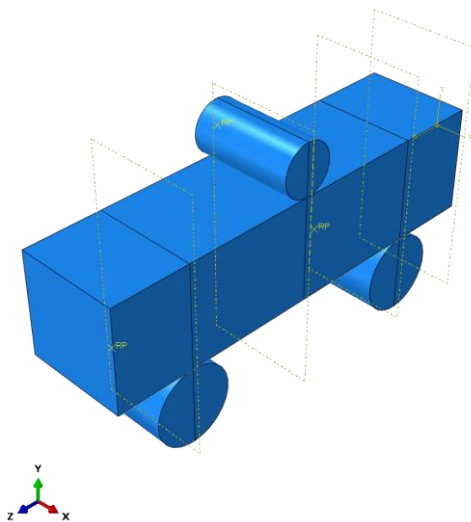
Geometrie numerického modelu byla vytvořena v souladu s rozměry experimentálně testovaných betonových těles pro tříbodovou ohybovou zkoušku dle normy ČSN EN 1015-11 (ČSN EN 1015-11,2020). Model byl realizován ve třech variantách: bez výztuže, s ocelovou výztuží o průměru 2 mm a 4 mm, což umožnilo posoudit vliv výztuže na chování systému.

Beton a ocelová výztuž byly modelovány jako samostatná tělesa s lineárně elastickými materiálovými vlastnostmi. Přenos zatížení mezi betonem a výztuží byl zajištěn kontaktní vazbou na jejich rozhraní.

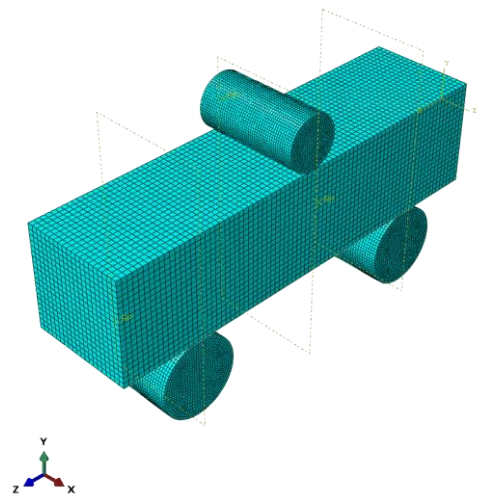
Diskretizace modelu byla provedena pomocí trojrozměrných objemových konečných prvků. Výpočtová síť byla lokálně zjemněna v oblasti zatížení, podpor a v okolí výztuže, aby bylo možné zachytit koncentrace napětí v kritických místech.

Okrajové podmínky odpovídaly experimentálnímu uspořádání tříbodové ohybové zkoušky dle ČSN EN 1015-11 (ČSN EN 1015-11,2020). Rozpětí mezi podporami činilo  $100 \pm 0,5$  mm a zatížení bylo aplikováno ve středu rozpětí prostřednictvím tuhého tělesa.

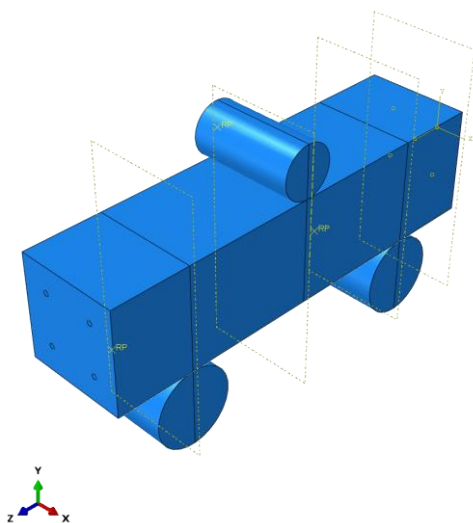
Model tak umožňuje analyzovat rozložení napětí a deformací v tělese při ohybovém zatížení a porovnat výsledky s experimentálními měřeními.



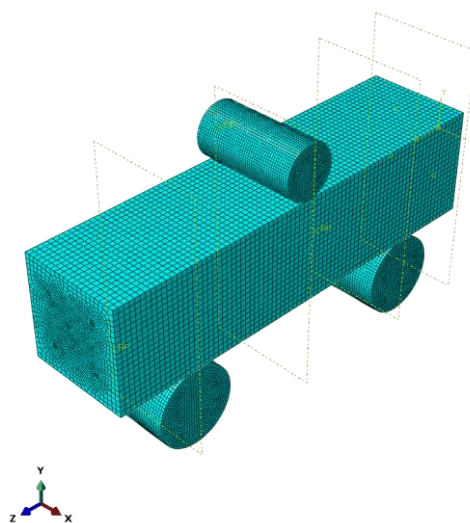
**Obrázek 17: Geometrický model bez výztuže**  
Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)



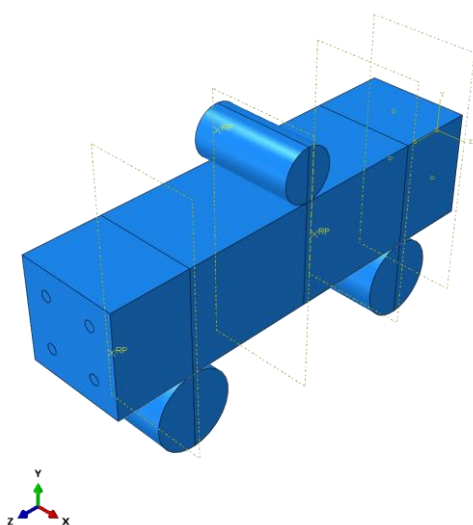
**Obrázek 18: Diskretizace modelu bez výztuže**  
Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)



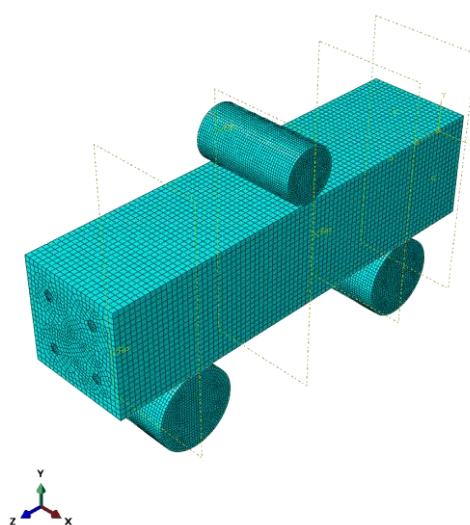
**Obrázek 19: Geometrický model s ocelovou výztuží  $\varnothing$  2 mm**  
*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*



**Obrázek 20: Diskretizace modelu ocelovou výztuží  $\varnothing$  2 mm**  
*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*



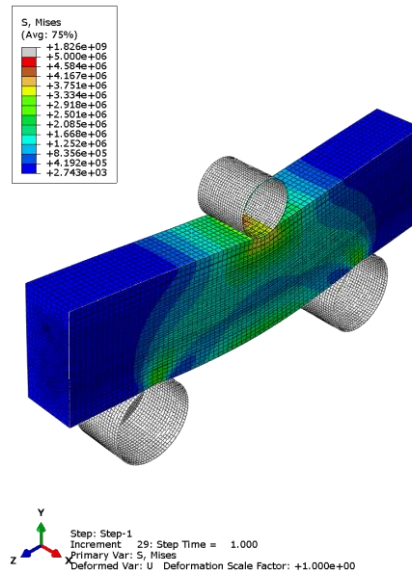
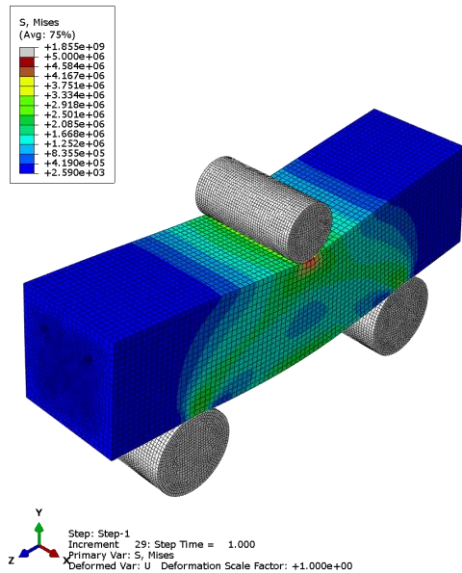
**Obrázek 21: Geometrický model s ocelovou výztuží  $\varnothing$  4 mm**  
*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*



**Obrázek 22: Diskretizace modelu s ocelovou výztuží  $\varnothing$  4 mm**  
*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

Na obrázku 23 je znázorněno rozložení redukovaného napětí  $S$ , Mises ve vyztuženém betonovém tělese při třibodovém ohybovém zatížení. Z výsledků je patrná výrazná koncentrace napětí v oblasti kontaktu zatěžovacího válce s horní plochou tělesa a rovněž v oblasti podpor. Tyto oblasti odpovídají místům přenosu tlakových sil a vykazují nejvyšší lokální hodnoty napětí.

Směrem od místa zatížení dochází k postupnému poklesu napjatosti. V dolní části průřezu se vytváří oblast tahového namáhání, která odpovídá teoretickému průběhu ohybového napětí. Rozložení napětí má charakter typický pro tříbodový ohyb, kdy je průřez rozdělen na tlakovou oblast v horní části a tahovou oblast v dolní části.



**Obrázek 23: Rozložení redukovaného napětí S, Mises ve vyztuženém betonovém tělese – pohled na model včetně výpočtové sítě**

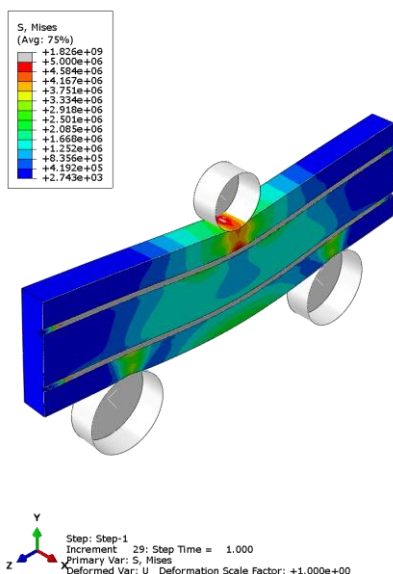
*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

**Obrázek 24: Detail koncentrace napětí v oblasti kontaktu zatěžovacího válce a betonového tělesa a ocelové výztuže**

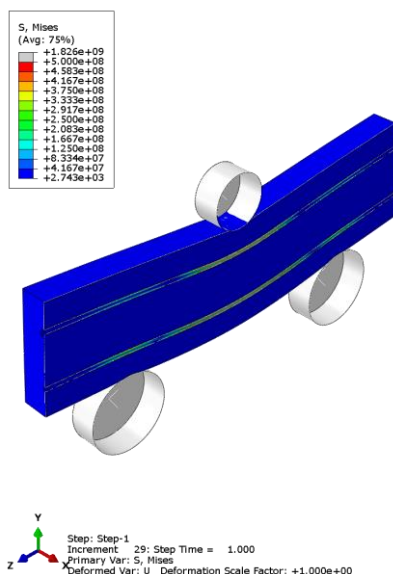
*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

Detailní pohled na průřez tělesem na obrázku 25 umožňuje sledovat interakci mezi betonovou maticí a výztuží. Výztuž je vystavena zvýšenému tahovému napětí, zejména v oblasti maximálního ohybového momentu ve střední části rozpětí. Napětí se přenáší z betonové matrice do výztuže prostřednictvím kontaktní vazby definované na jejich rozhraní.

Na obrázku 26 je viditelné, že výztuž vykazuje vyšší koncentraci napětí než okolní beton v tahové oblasti. Tento jev odpovídá fyzikální podstatě vyztuženého betonu, kdy po vzniku tahových napětí přebírá výztuž významnou část zatížení. Beton v tahové oblasti je naopak namáhán méně, což odpovídá jeho omezené tahové pevnosti.

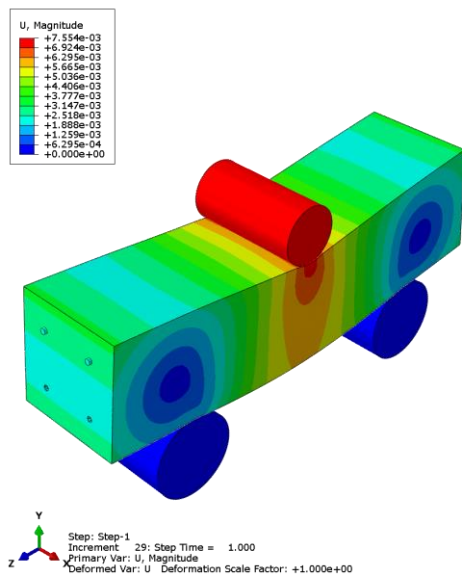


**Obrázek 25: Průřez vyztuženým betonovým tělesem – rozložení redukovaného napětí S, Mises v betonu a ocelové výztuži**  
*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

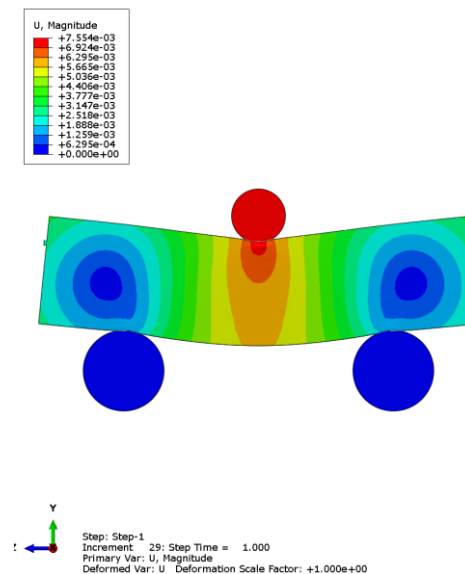


**Obrázek 26: Detail napjatosti ocelové výztuže v průřezu betonového tělesa při ohybovém zatížení**  
*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

Na obrázku 27 je znázorněno rozložení celkové deformace U, Magnitude ve vyztuženém betonovém tělese s ocelovou výztuží o průměru 2 mm. Maximální hodnota deformace se nachází ve střední části rozpětí pod zatěžovacím válcem, což odpovídá místu maximálního ohybového momentu. Deformační pole má symetrický charakter vzhledem ke středu rozpětí a odpovídá teoretickému průběhu průhybu při třibodovém ohybu.



**Obrázek 27: Rozložení celkové deformace U, Magnitude ve vyztuženém betonovém tělese s výztuží při třibodovém ohybovém zatížení**  
Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)



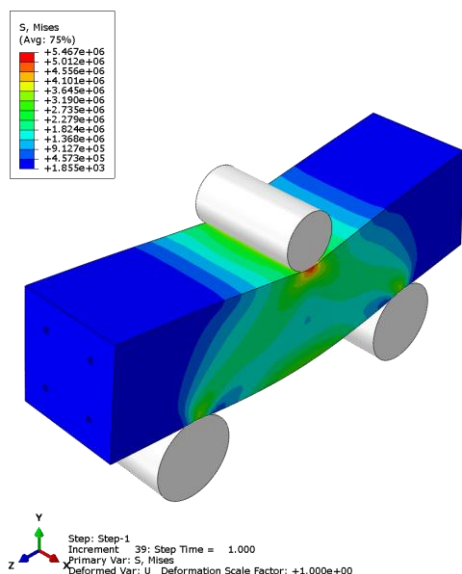
**Obrázek 28: Deformovaný tvar betonového tělesa s výztuží při ohybovém zatížení (rovinný pohled)**  
Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)

Deformovaný tvar tělesa s ocelovou výztuží o průměru 2 mm vykazuje typické ohybové chování nosníku, kdy dochází k průhybu směrem dolů. Přítomnost výztuže zvyšuje celkovou tuhost systému a omezuje velikost průhybu ve srovnání s nevyztuženým modelem.

Na obrázku 29 je viditelné rozložení redukovaného napětí S, Mises ve vyztuženém betonovém tělese s výztuží. Nejvyšší hodnoty napětí jsou soustředěny v oblasti působení zatěžovacího válce, kde dochází ke kombinaci tlakových a smykových napětí. Zvýšené napěťové koncentrace jsou dále patrné v blízkosti podpor, které odpovídají místům přenosu reakčních sil.

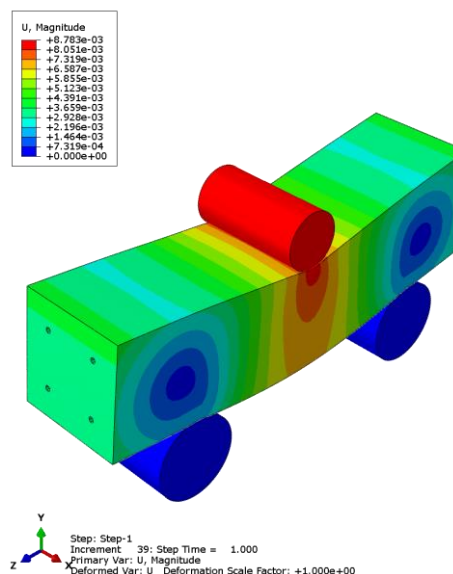
Rozložení napětí v betonové části tělesa vykazuje typický průběh odpovídající ohybovému namáhání. Tahová napětí se koncentrují v dolní části průřezu, zatímco horní oblast je namáhána převážně tlakem. Přítomnost výztuže ovlivňuje redistribuci napětí, kdy část tahových napětí je přenášena výztuží, což vede ke snížení napěťové úrovně v okolní betonové matici.

Na obrázku 30 je znázorněno rozložení celkové deformace U, Magnitude ve vyztuženém betonovém tělese s výztuží. Maximální deformace se nachází ve střední části rozpětí pod zatěžovacím válcem, které odpovídá místu maximálního ohybového momentu.



**Obrázek 29: Rozložení redukovaného napětí S, Mises ve vyztuženém betonovém tělese s ocelovou výztuží při tříbodovém ohybovém zatížení**

*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*



**Obrázek 30: Rozložení celkové deformace U, Magnitude ve vyztuženém betonovém tělese s ocelovou výztuží při tříbodovém ohybu**

*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

Deformační pole má symetrický charakter vzhledem ke středu rozpětí, což potvrzuje správné zadání okrajových podmínek a zatížení. Největší průhyb je viditelný v dolní tahové oblasti průřezu. Přítomnost výztuže přispívá ke zvýšení tuhosti systému a omezuje velikost globální deformace ve srovnání s nevyztuženým modelem.

Barevná škála znázorňuje velikost sledované veličiny, červené odstíny odpovídají maximálním hodnotám a modré odstíny minimálním hodnotám.

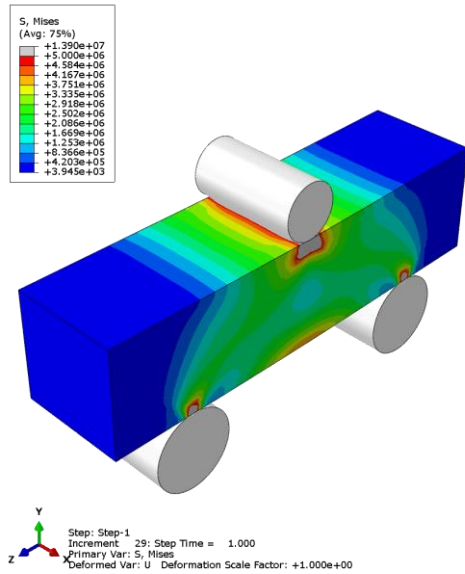
### 3.7.2 Rozložení napětí a deformací ve vzorcích získané numerickou simulací

V této podkapitole jsou prezentovány výsledky numerických simulací provedených v softwaru Abaqus/CAE. Simulace byly realizovány pro jednotlivé kombinace betonové směsi, doby hydratace a průměru ocelové výztuže. Vstupní zatížení modelu bylo určeno na základě průměrných hodnot získaných z experimentálních tříbodových ohybových zkoušek.

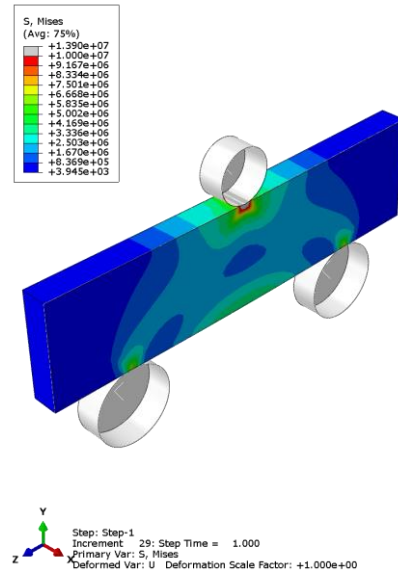
Výsledky simulací jsou prezentovány ve formě rozložení redukovaného napětí (S, Mises) a celkové deformace tělesa (U, Magnitude).

Z výsledků numerické simulace je patrné, že nejvyšší hodnoty redukovaného napětí  $S$ , Mises se koncentrují v oblasti působení zatěžovacího válce a v dolní tahové části zkušební tělesa. Pole deformací  $U$ , Magnitude vykazuje maximální průhyb ve střední části tělesa, což odpovídá charakteru zatížení při tříbodovém ohybu (viz obrázek 31).

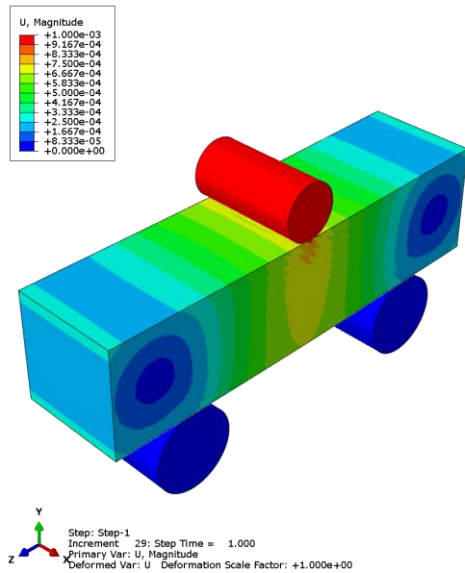
Rozložení napětí ( $S$ , Mises) a deformací ( $U$ , Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 28 dní hydratace, bez výztuže



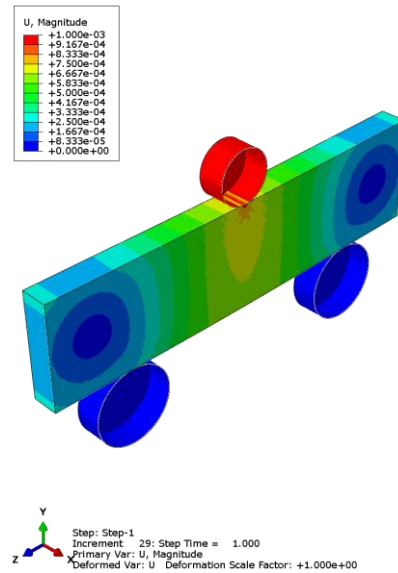
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



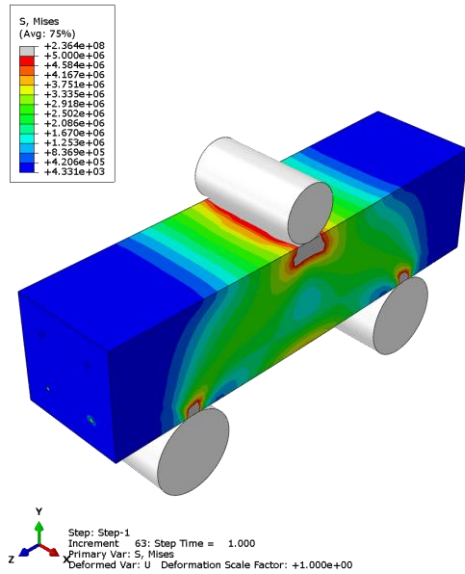
*U, Magnitude – detail deformace*

Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)

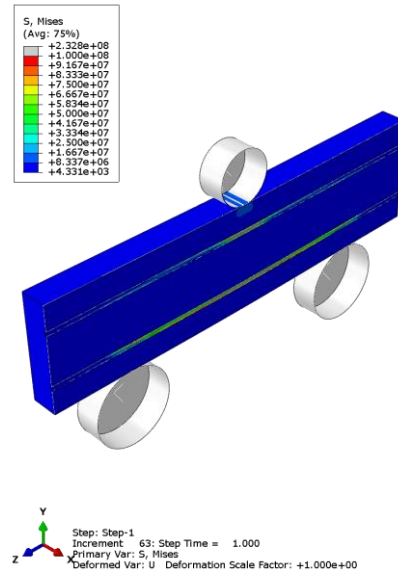
**Obrázek 31: Rozložení napětí ( $S$ , Mises) a deformací ( $U$ , Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 28 dní hydratace, bez výztuže**

V případě modelu s ocelovou výztuží o průměru 2 mm dochází ke změně rozložení napětí v tahové oblasti zkušební tělesa, kde část zatížení přebírá výztuž. Deformační pole ukazuje charakteristický průhyb ve střední části tělesa při zachování kontinuální spolupráce betonové matrice a vložené výztuže (viz obrázek 32).

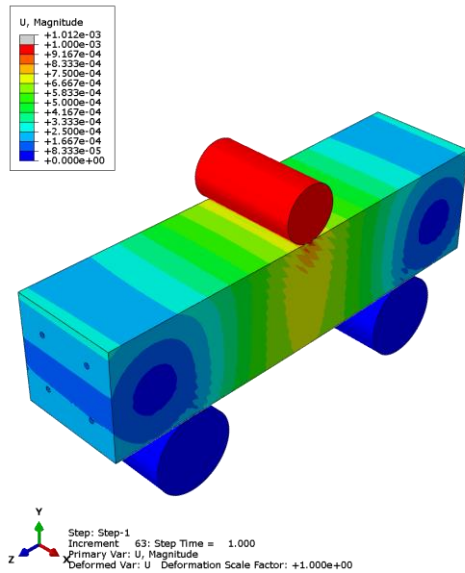
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 28 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  2 mm



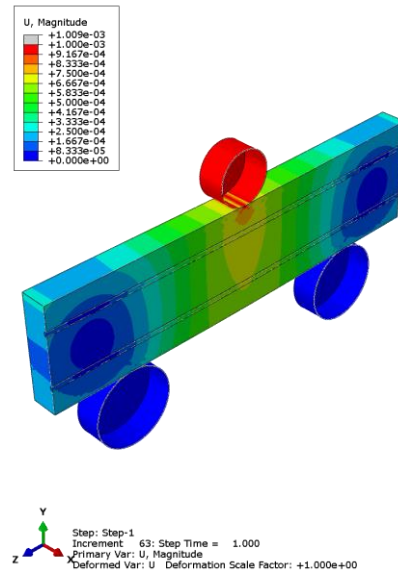
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



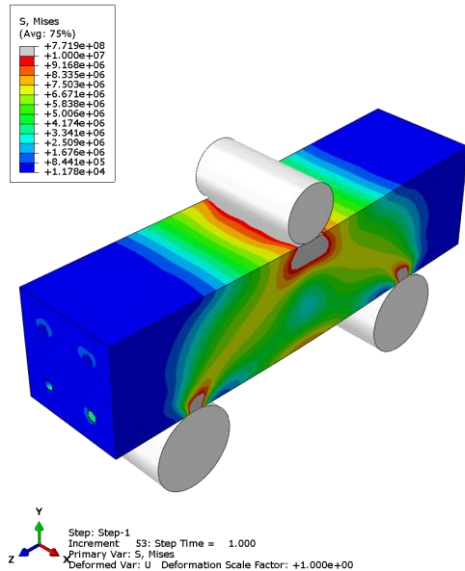
*U, Magnitude – detail deformace*

*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

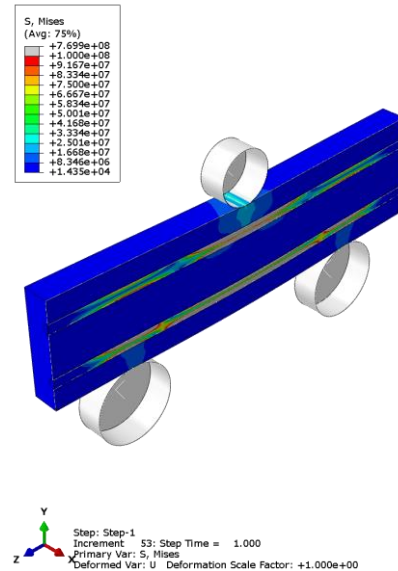
**Obrázek 32: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 28 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  2 mm**

Při použití ocelové výztuže o průměru 4 mm dochází k výraznějšímu přenosu tahových napětí v dolní části zkušebního tělesa, což je patrné z koncentrace napětí v oblasti výztuže. Deformační pole zároveň potvrzuje ohybový charakter zatížení s maximálním průhybem ve střední části rozpětí (viz obrázek 33).

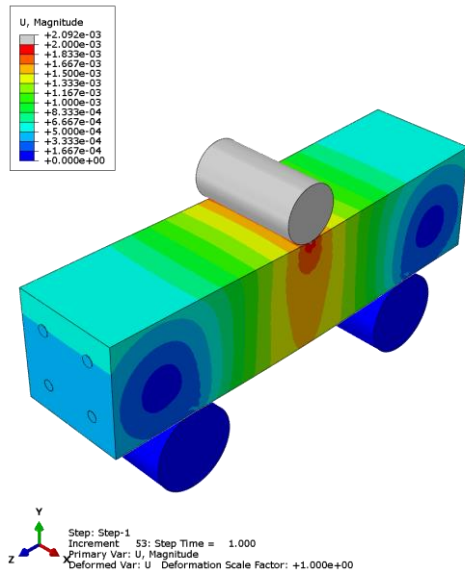
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 28 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  4 mm



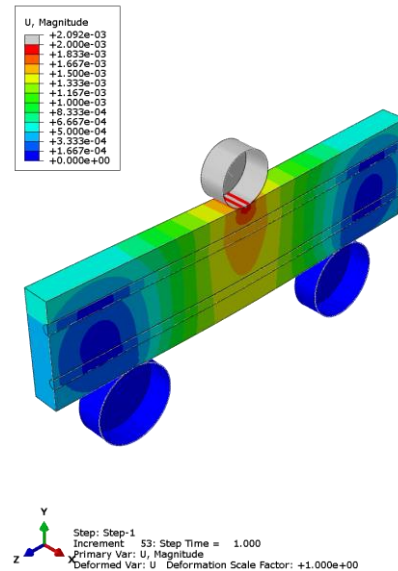
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



*U, Magnitude – detail deformace*

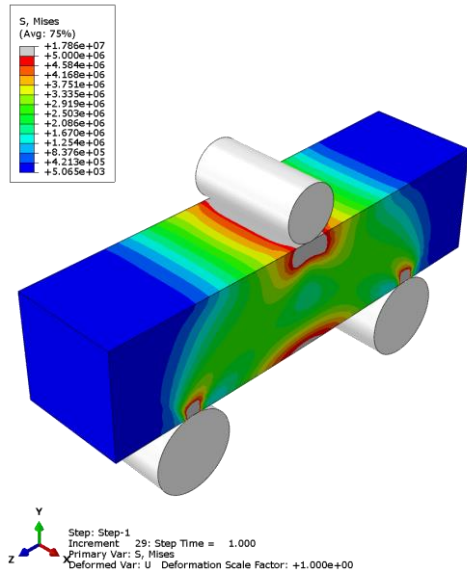
*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

**Obrázek 33: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 28 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  4 mm**

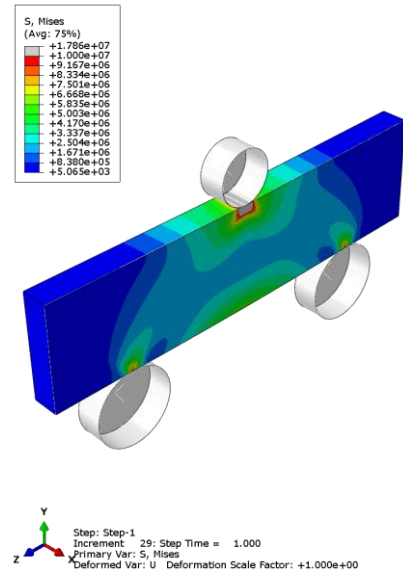
Z porovnání jednotlivých variant je patrné, že se zvětšujícím se průměrem ocelové výztuže dochází k postupné změně rozložení napětí v tahové oblasti zkušebního tělesa.

Simulace vlastnoručně míchané betonové směsi bez výztuže ukazuje koncentraci redukovaného napětí především v oblasti působení zatěžovacího válce a v dolní tahové části průřezu. Rozložení deformací odpovídá typickému průhybu nosníku při třibodovém ohybovém zatížení, kdy maximální deformace se nachází ve střední části rozpětí (viz obrázek 34).

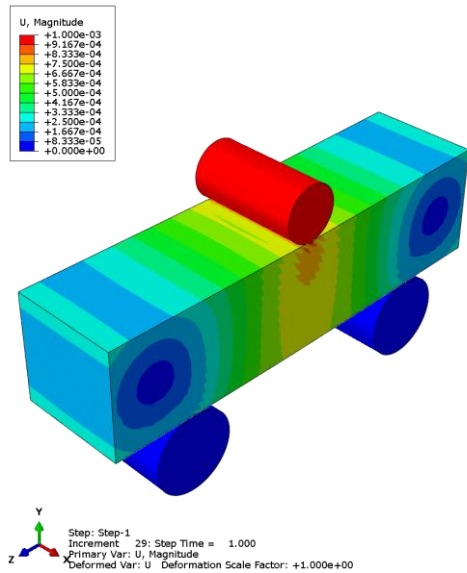
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 28 dní hydratace, bez výztuže



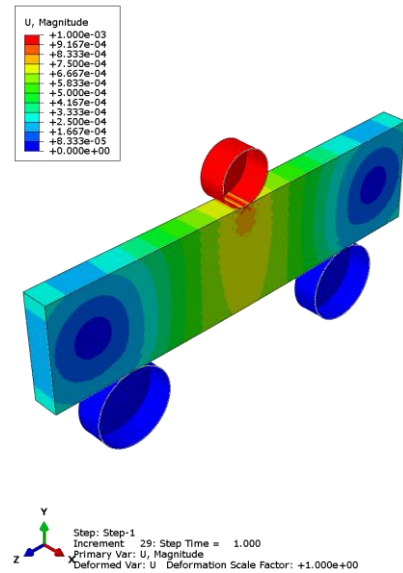
S, Mises – globální pohled



S, Mises – detail oblasti zatížení



U, Magnitude – globální deformace



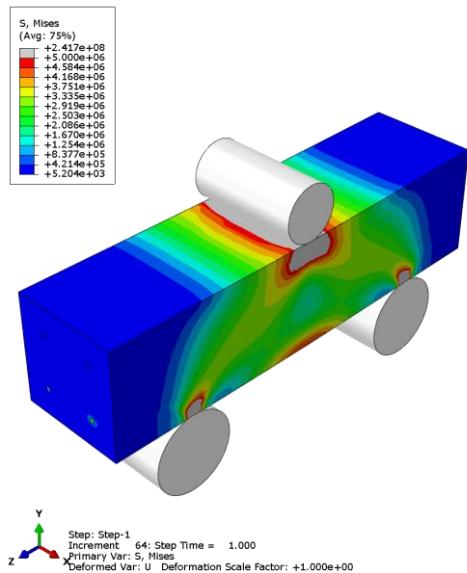
U, Magnitude – detail deformace

Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)

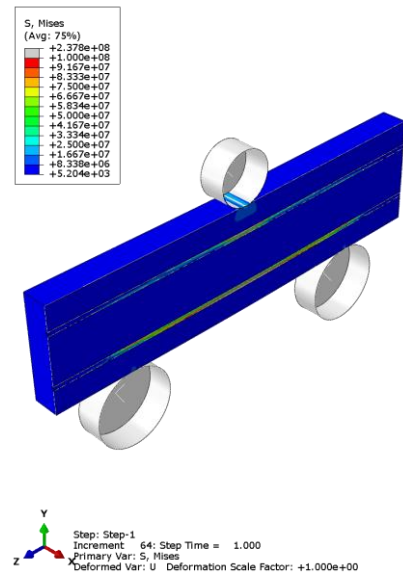
**Obrázek 34: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 28 dní hydratace, bez výztuže**

Numerická simulace vlastnoručně míchané betonové směsi s ocelovou výztuží o průměru 2 mm ukazuje přenos části tahových napětí z betonové matrice do výztuže v dolní části průřezu. Deformační pole potvrzuje charakteristický průhyb zkušebního tělesa při tříbodovém ohybovém zatížení s maximální deformací ve střední části rozpětí (viz obrázek 35).

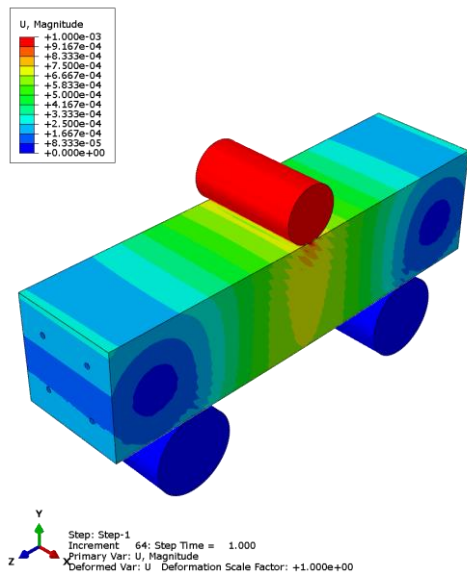
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 28 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  2 mm



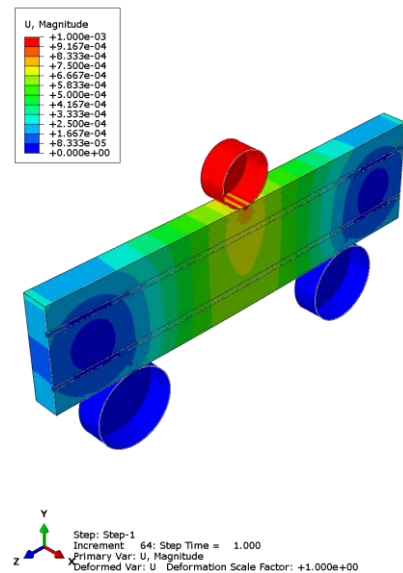
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



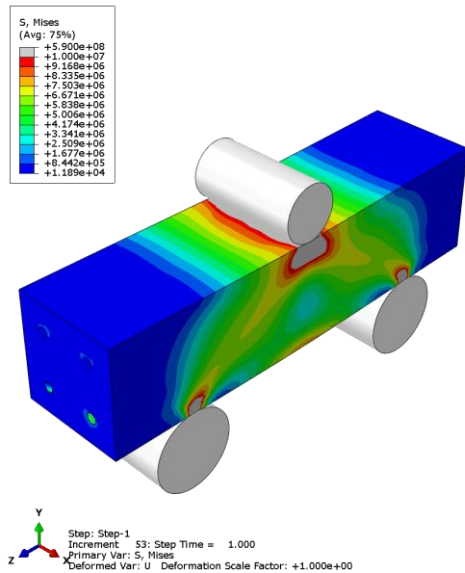
*U, Magnitude – detail deformace*

*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

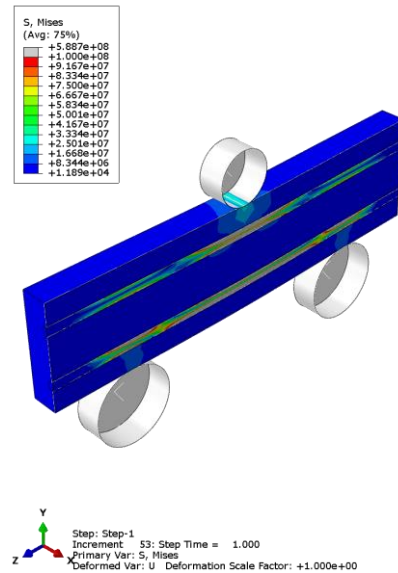
**Obrázek 35: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 28 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  2 mm**

U modelu s ocelovou výztuží o průměru 4 mm je patrná koncentrace napětí v oblasti výztuže v dolní tahové části průřezu. Deformační pole odpovídá ohybovému zatížení s maximálním průhybem ve středu rozpětí (viz obrázek 36).

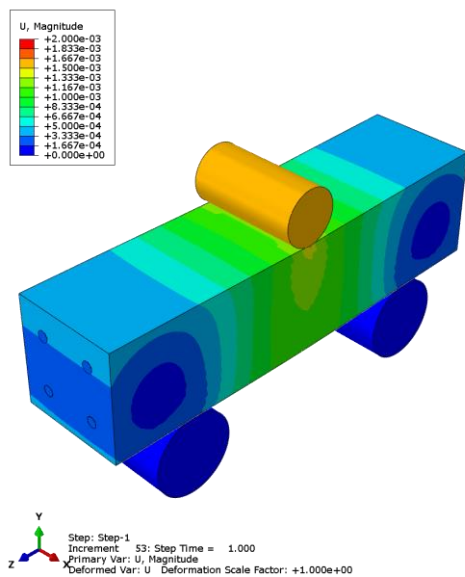
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní mícháná betonová směs, 28 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  4 mm



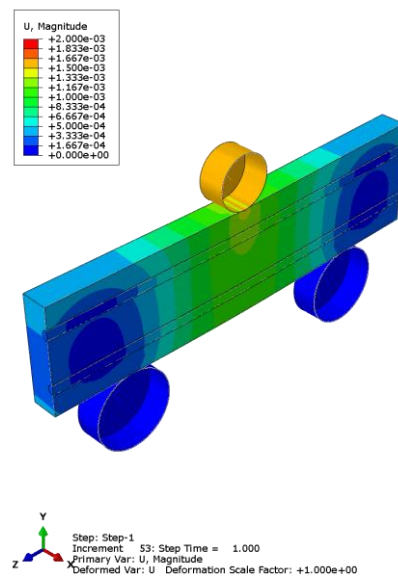
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



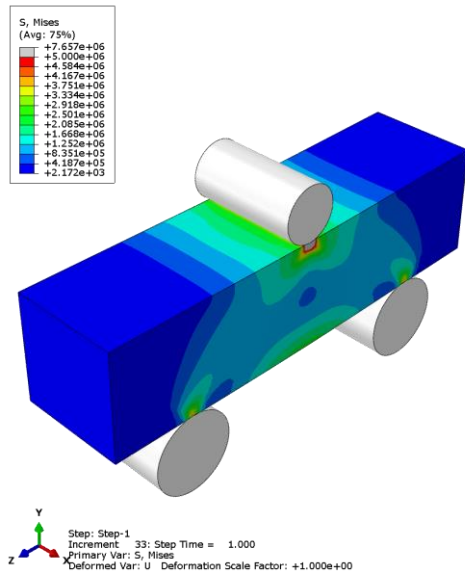
*U, Magnitude – detail deformace*

Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)

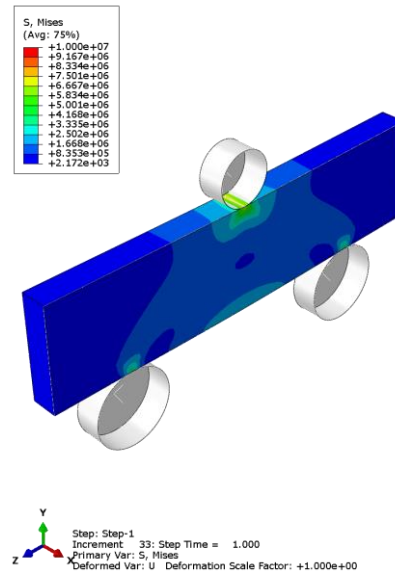
**Obrázek 36: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní mícháná betonová směs, 28 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  4 mm**

U vzorku po 7 dnech hydratace bez výztuže je patrné rozložení napětí v oblasti zatěžovacího válce a v dolní tahové části průřezu. Deformační pole vykazuje výraznější průhyb ve střední části rozpětí, což odpovídá nižší tuhosti materiálu v počáteční fázi hydratace (viz obrázek 37).

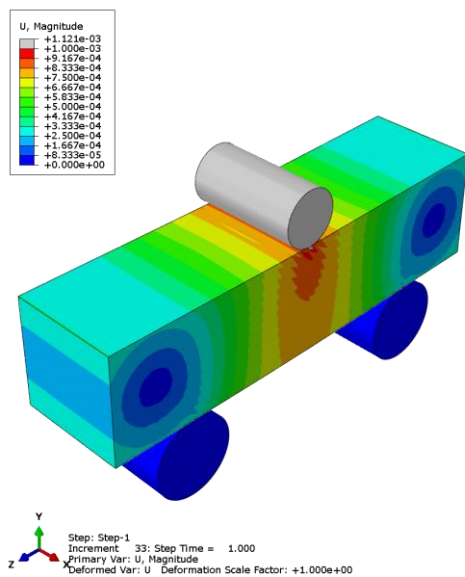
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – cementový potěr, 7 dní hydratace, bez výztuže



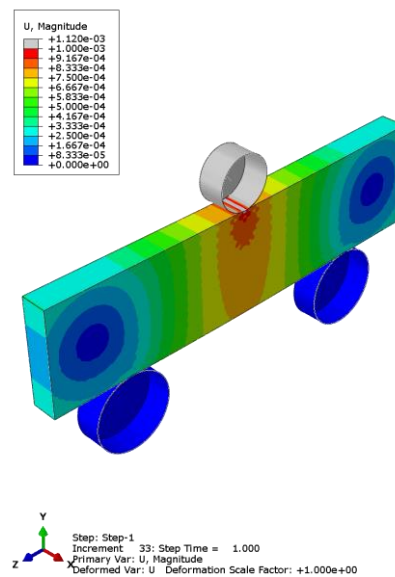
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



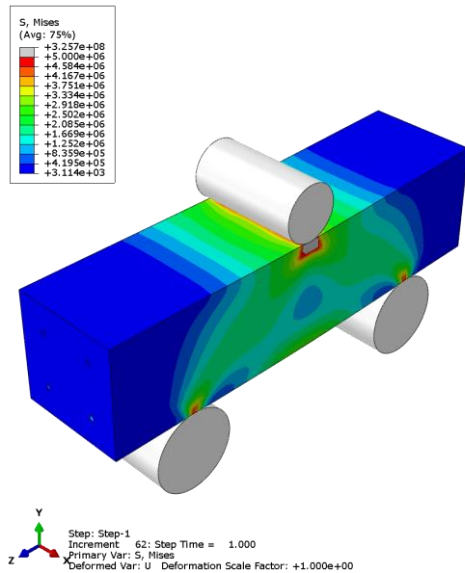
*U, Magnitude – detail deformace*

*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

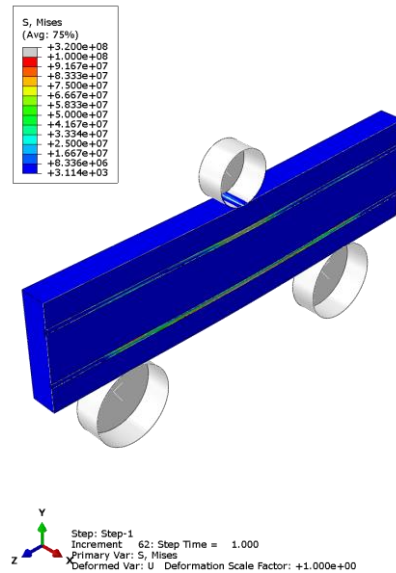
**Obrázek 37: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – cementový potěr, 7 dní hydratace, bez výztuže**

U vzorku po 7 dnech hydratace s ocelovou výztuží o průměru 2 mm je patrné přenesení části tahových napětí do výztuže v dolní části průřezu. Deformační pole odpovídá ohybovému zatížení s maximální deformací ve střední části rozpětí (viz obrázek 38).

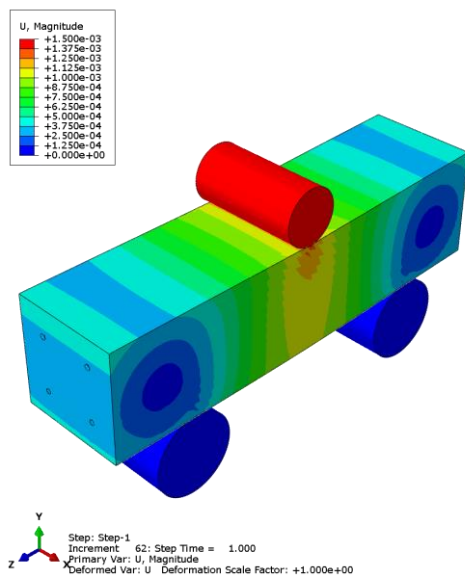
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 7 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  2 mm



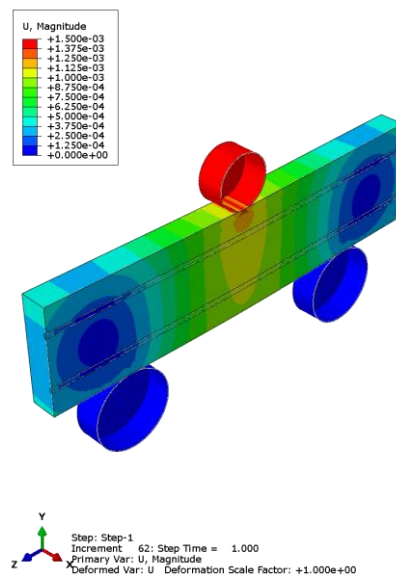
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



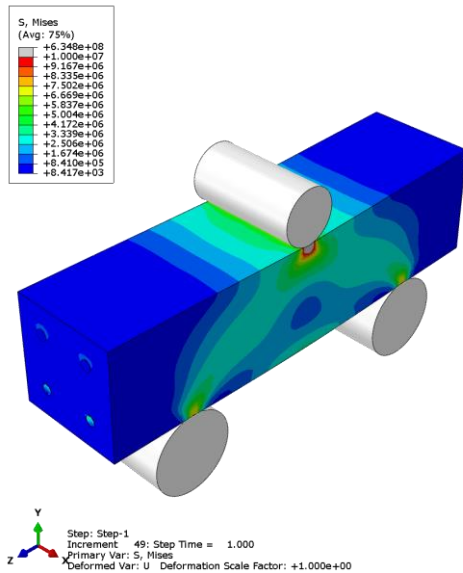
*U, Magnitude – detail deformace*

Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)

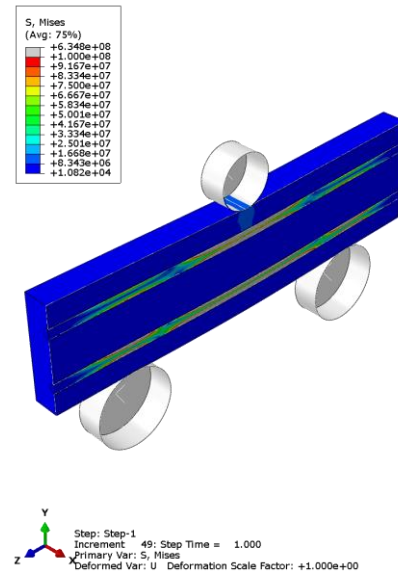
**Obrázek 38: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 7 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  2 mm**

U vzorku po 7 dnech hydratace s ocelovou výztuží o průměru 4 mm je patrná koncentrace napětí v oblasti výztuže v dolní části průřezu. Deformační pole potvrzuje ohybový charakter zatížení s maximální deformací ve střední části rozpětí (viz obrázek 39).

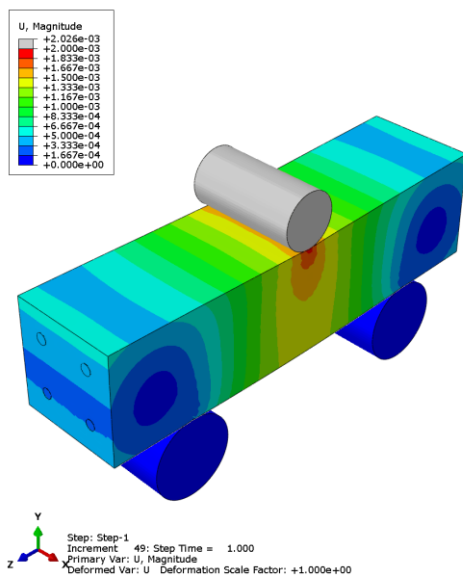
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 7 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  4 mm



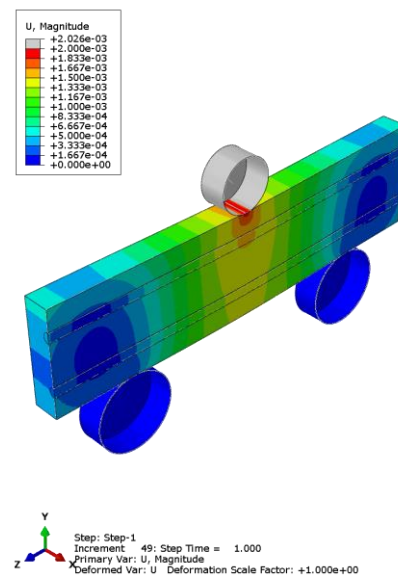
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



*U, Magnitude – detail deformace*

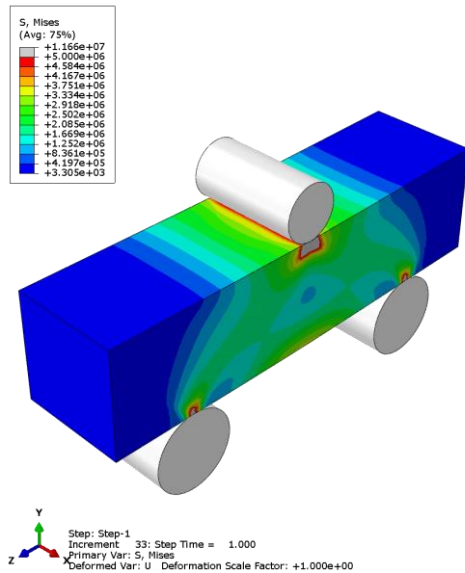
Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)

**Obrázek 39: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při tříbodovém ohybu – cementový potěr, 7 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  4 mm**

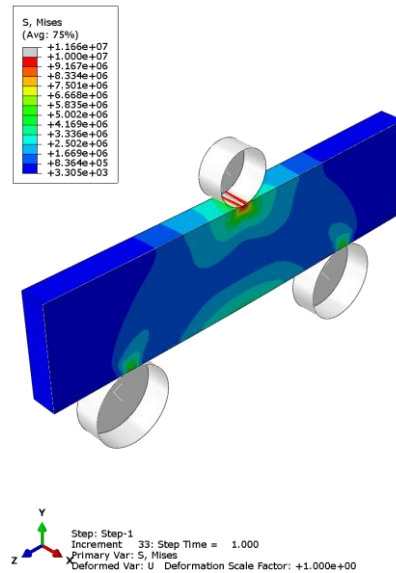
Ve srovnání se vzorky po 28 dnech hydratace vykazují modely po 7 dnech hydratace vyšší deformace, což odpovídá nižší tuhosti betonu v rané fázi zrání.

U vlastnoručně míchané betonové směsi po 7 dnech hydratace bez výztuže je patrná koncentrace napětí v oblasti zatěžovacího válce a v dolní tahové části průřezu. Deformační pole vykazuje maximální průhyb ve střední části rozpětí (viz obrázek 40).

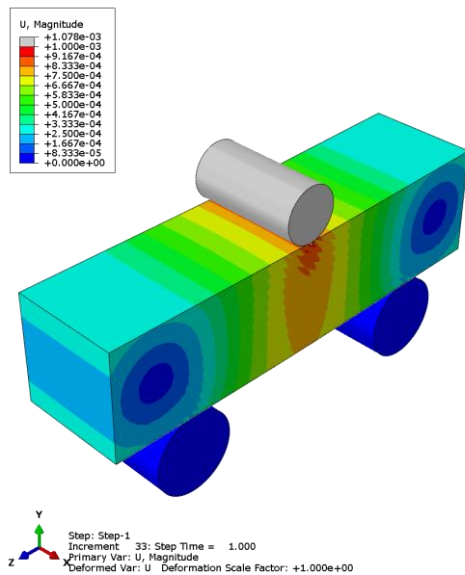
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 7 dní hydratace, bez výztuže



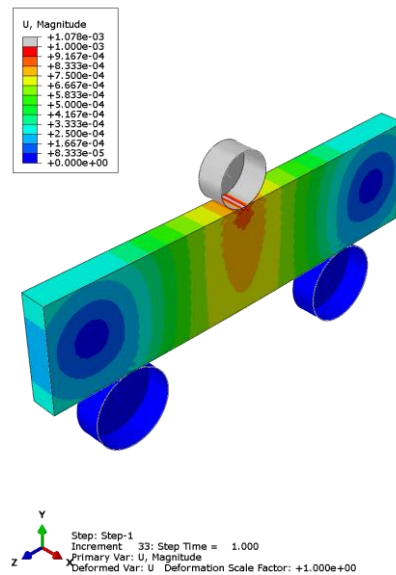
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



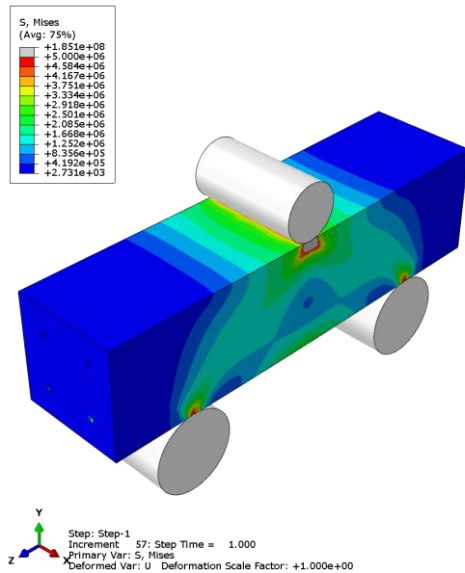
*U, Magnitude – detail deformace*

*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

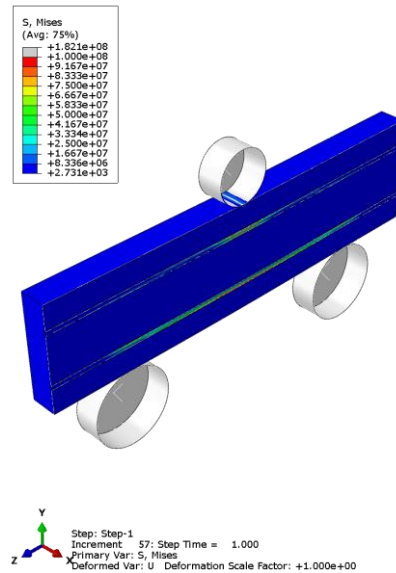
**Obrázek 40: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 7 dní hydratace, bez výztuže**

U vlastnoručně míchané betonové směsi po 7 dnech hydratace s ocelovou výztuží o průměru 2 mm je patrný přenos části tahových napětí do výztuže v dolní části průřezu. Deformační pole odpovídá ohybovému zatížení s maximálním průhybem ve střední části rozpětí (viz obrázek 41).

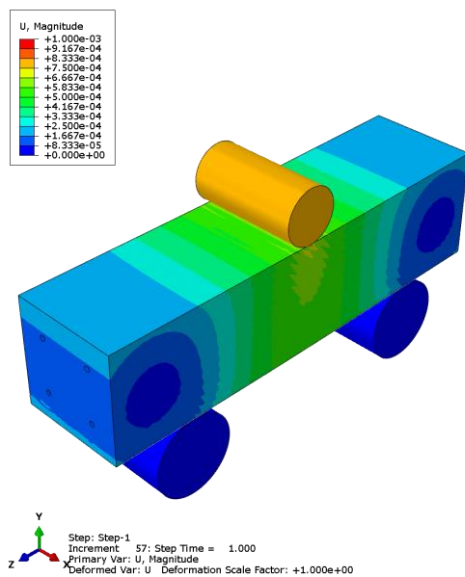
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 7 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  2 mm



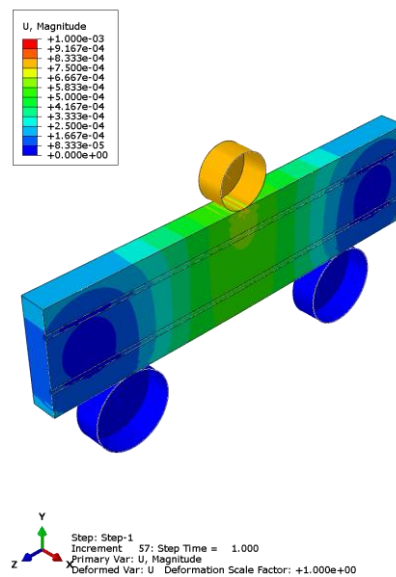
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



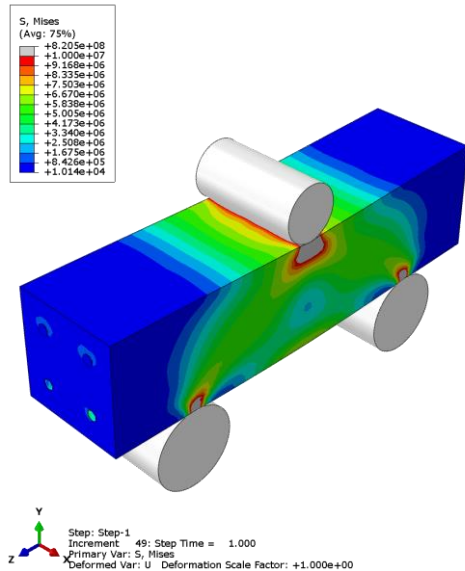
*U, Magnitude – detail deformace*

*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

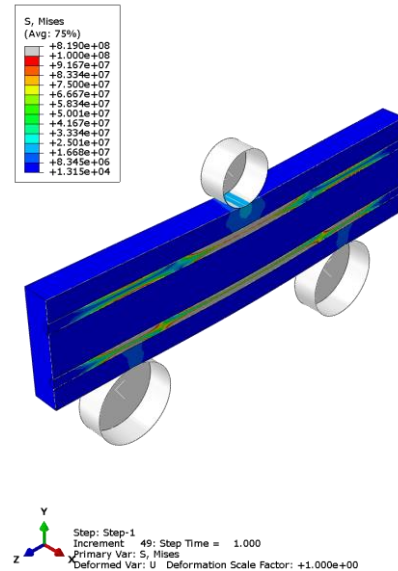
**Obrázek 41: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 7 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  2 mm**

U vlastnoručně míchané betonové směsi po 7 dnech hydratace s ocelovou výztuží o průměru 4 mm je patrná koncentrace napětí v oblasti výztuže v dolní části průřezu. Deformační pole potvrzuje ohybový charakter zatížení s maximální deformací ve střední části rozpětí (viz obrázek 42).

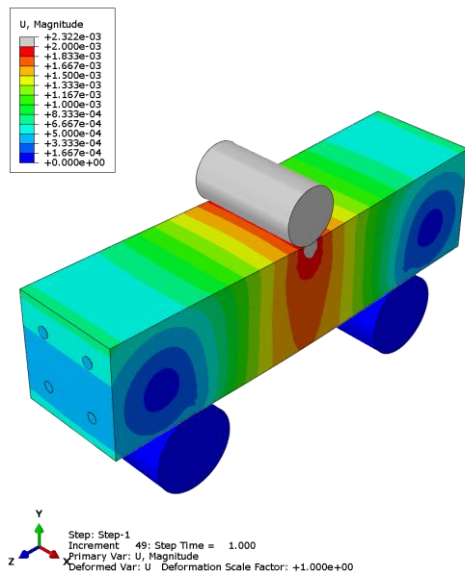
Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 7 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  4 mm



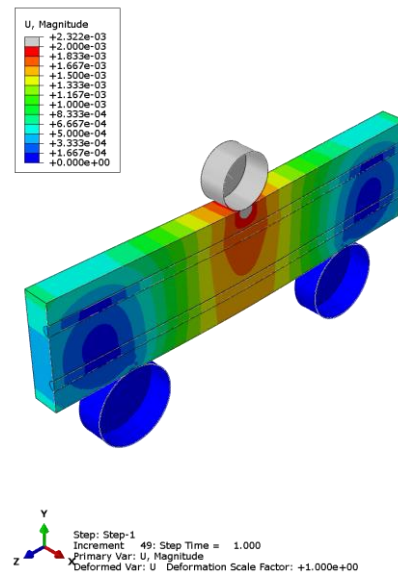
*S, Mises – globální pohled*



*S, Mises – detail oblasti zatížení*



*U, Magnitude – globální deformace*



*U, Magnitude – detail deformace*

*Zdroj: vlastní zpracování (numerická simulace, software Abaqus/CAE)*

**Obrázek 42: Rozložení napětí (S, Mises) a deformací (U, Magnitude) při třibodovém ohybu – vlastní míchaná betonová směs, 7 dní hydratace, ocelová výztuž  $\varnothing$  4 mm**

Z výsledků numerických simulací vyplývá, že přítomnost výztuže významně ovlivňuje rozložení napětí v tahové oblasti průřezu. Se zvětšujícím se průměrem ocelové výztuže dochází k přenosu větší části tahových napětí z betonové matrice do oceli. Současně se projevuje vliv doby hydratace betonu, kdy modely po 7 dnech vykazují vyšší deformace než modely po 28 dnech hydratace.

### **Souhrn**

Numerická simulace byla provedena pro jednotlivé skupiny betonových vzorků. Model zahrnoval vzorky z cementové potěrové směsi i vlastní míchané betonové směsi s dobou hydratace 7 a 28 dní. Do výpočtu byly zadávány průměrné hodnoty efektivního modulu pružnosti betonu stanovené z experimentálních třibodových ohybových zkoušek pro jednotlivé skupiny vzorků vždy pro verzi bez ocelové výztuže. Pro výztuž pak byl zadán odpovídající modul pružnosti oceli zjištěný z tahové zkoušky.

Výsledky simulace byly vyhodnocovány pomocí map ekvivalentního napětí ( $S$ , Mises) a map celkového posunutí ( $U$ , Magnitude). Ze simulací je vyplývá, že maximální napětí vzniká ve spodní části průřezu vzorku ve střední části rozpětí, což odpovídá teoretickému předpokladu třibodového ohybu. Horní část vzorku je naopak namáhána tlakem.

Mapy posunutí vykazují největší průhyb v místě působení zatěžovací síly, kdy tvar deformace odpovídá experimentálně pozorovanému chování vzorků. Vzorky s vyšším modulem pružnosti vykazují nižší deformace při stejném zatížení, což se projevuje zejména u směsi po 28 dnech hydratace.

Numerický model neuvažuje vznik trhlin ani nelineární chování materiálu, a proto představuje zjednodušené lineárně elastické chování. Reálné experimentální křivky vykazují nelineární průběh vlivem vzniku trhlin a vzájemné působení betonu s výztuží. Přesto simulace poskytuje kvalitativně správný obraz rozložení napětí a deformací a umožňuje porovnat vliv jednotlivých materiálových parametrů na chování vzorků při ohybovém zatížení.

Podobný přístup je běžně používán i v odborné literatuře zabývající se modelováním betonových prvků metodou konečných prvků, kde i zjednodušené lineární materiálové modely umožňují věrně popsat rozložení napětí a deformací při ohybovém zatížení (de Borst et al., 2012).

### **3.7.3 Interpretace výsledků numerické simulace**

Z porovnání výsledků numerických simulací jednotlivých variant zkušebních těles vyplývá, že rozložení napětí a deformací je výrazně ovlivněno přítomností a průměrem ocelové výztuže. U nevyztužených těles dochází ke koncentraci maximálních napětí především v oblasti působení zatěžovacího válce a ve spodní části průřezu zkušebního tělesa, která je namáhána tahem.

Se zvětšujícím se průměrem ocelové výztuže dochází ke změně rozložení napětí v průřezu. Výztuž přebírá část tahových napětí vznikajících při ohybovém zatížení, dochází k jejich redistribuci mezi betonovou maticí a ocelovou výztuží a ke zvýšení celkové tuhosti systému. Tento jev je viditelný zejména u vzorků s ocelovou výztuží o průměru 4 mm, kde je výraznější přenos napětí do oblasti výztuže a současně vyšší hodnoty deformací v okolí zatěžovacího bodu.

Výsledky simulací rovněž potvrzují vliv stáří betonu na mechanické chování zatěžovaného tělesa. Vzorky po 28 dnech hydratace vykazují nižší hodnoty deformací než vzorky po 7 dnech

hydratace, což odpovídá vyšší pevnosti a tuhosti vyvrážděnějšího materiálu. Tento trend je v souladu s výsledky experimentálních třibodových ohybových zkoušek.

### 3.7.4 Vyhodnocení napětového a deformačního stavu

Pro lepší interpretaci výsledků numerické simulace byly hodnoty redukovaného napětí rozděleny na napětí v betonové matici a na maximální napětí v ocelové výztuži. Napětí v betonu bylo vyhodnocováno ve spodní části průřezu ve střední části rozpětí, která odpovídá tahově namáhané oblasti při třibodovém ohybu. U vyztužených variant byla samostatně sledována také maximální hodnota napětí v ocelové výztuži.

Hodnoty napětí byly stanoveny odečtem z grafických výstupů numerické simulace a mají orientační charakter. U nevyztužených vzorků není hodnota napětí v ocelové výztuži uvedena, protože výztuž nebyla v modelu přítomna.

Tabulka 6 uvádí vybrané hodnoty napětí v betonu (ve spodní části průřezu ve střední části rozpětí), maximální napětí v ocelové výztuži a maximální deformace získané z numerických simulací v programu Abaqus/CAE. Uvedené hodnoty byly stanoveny následným zpracováním výstupů numerického modelu (pole napětí a deformací) a slouží především k porovnání trendů mezi jednotlivými variantami vzorků.

**Tabulka 6: Vybrané hodnoty napětí a deformací z MKP simulací**

Sada	Hydratace [dny]	Směs	Výztuž $\varnothing$ [mm]	S,Mises v betonu - dolní středová oblast [MPa]	Max S,Mises v ocelové výztuži [MPa]	Max U,Magnitude [mm]
01	28	Potěr	0	2,5	—	1,0
02	28	Potěr	2	2,5	5	1,0
03	28	Potěr	4	5	10	2,1
04	28	Míchaná	0	2,5	—	1,0
05	28	Míchaná	2	2,5	5	1,0
06	28	Míchaná	4	5	10	2,0
07	7	Potěr	0	2,5	—	1,1
08	7	Potěr	2	2,5	5	1,5
09	7	Potěr	4	5	10	2,0
10	7	Míchaná	0	2,5	—	1,1
11	7	Míchaná	2	2,5	5	1,0
12	7	Míchaná	4	5	10	2,3

*Zdroj: vlastní zpracování na základě výstupů ze softwaru Abaqus/CAE*

Z tabulky je viditelný vliv přítomnosti a průměru výztuže, kdy s rostoucím průměrem dochází k nárůstu napětí v oceli a současně ke změně deformační odezvy systému. Vliv doby hydratace se projevuje zejména ve změně deformací, zatímco hodnoty napětí v betonu zůstávají ve srovnatelném rozsahu. Výsledky vykazují ucelený průběh pro oba typy směsí a odpovídají předpokládanému mechanickému chování kompozitního systému beton–ocel.

Z výsledků uvedených v tabulce 6 lze vyvodit následující poznatky:

### **Vliv doby hydratace**

U všech sledovaných variant vykazují vzorky po 28 dnech hydratace vyšší tuhost a nižší maximální deformace než vzorky po 7 dnech hydratace. Tento trend odpovídá postupnému vývoji mikrostruktury cementového tmelu a nárůstu pevnosti v důsledku probíhající hydratace.

Z hlediska napětí v betonu nebyly mezi jednotlivými dobami hydratace pozorovány výrazné rozdíly, hodnoty se pohybovaly přibližně kolem 3 MPa u nevyztužených a slabě vyztužených variant a kolem 5 MPa u vzorků s výztuží o průměru 4 mm. Vliv hydratace se tedy výrazněji projevuje v oblasti deformací než v lokálních hodnotách napětí.

### **Vliv výztuže**

Se zvyšujícím se průměrem ocelové výztuže dochází k nárůstu napětí přenášeného ocelí a k přerozdělení napětí v průřezu. Maximální hodnoty napětí v ocelové výztuži dosahovaly přibližně 5 MPa u průměru 2 mm a až 10 MPa u průměru 4 mm, a to pro oba typy směsí i obě doby hydratace.

Zvýšení napětí v oceli odpovídá chování kompozitního systému beton–ocel, kdy výztuž přebírá tahová napětí vznikající při ohybovém zatížení. Současně dochází ke zvýšení napětí v oblasti kontaktu zatěžovacího prvku.

### **Vliv typu směsi**

Porovnáním cementového potěru a vlastní míchané betonové směsi bylo zjištěno, že obě směsi vykazují podobný průběh napětí v betonu i v ocelové výztuži.

Rozdíly mezi jednotlivými směsmi se projevují především v oblasti deformací, kde vlastní míchaná směs v některých případech vykazuje vyšší deformovatelnost. Tento jev může souviset s odlišnou zrnitostí kameniva a strukturou cementové matrice.

### **Deformace**

Maximální deformace se pohybovaly přibližně v intervalu:

- 1,0-1,12 mm pro nevyztužené vzorky,
- Přibližně 1,0-1,5 mm pro vzorky s ocelovou výztuží 2 o průměru mm,
- Až 2,32 mm pro vzorky s ocelovou výztuží o průměru 4 mm.

Nejvyšší hodnota průhybu byla zaznamenána u vlastní míchané betonové směsi po 7 dnech hydratace s ocelovou výztuží o průměru 4 mm.

Z výsledků je patrné, že přítomnost výztuže významně ovlivňuje deformační odezvu systému, kdy s rostoucím průměrem výztuže dochází ke zvýšení maximálních deformací.

### **Souhrn**

Na základě vyhodnocení napětí v betonu, napětí v ocelové výztuži a maximálních deformací lze usoudit, že numerická simulace umožňuje přehledně posoudit vliv typu směsi, doby hydratace a průměru ocelové výztuže na mechanické chování zkoušených vzorků při ohybovém zatížení.

Získané výsledky vykazují ucelené trendy odpovídající fyzikálnímu chování kompozitního systému beton–ocel. V následující kapitole jsou tyto výsledky porovnány s hodnotami získanými z experimentálních ohybových zkoušek.

### 3.7.5 Porovnání výsledků experimentálního měření a numerické simulace

Cílem této podkapitoly je porovnat výsledky získané numerickou MKP simulací s výsledky experimentálních ohybových zkoušek provedených na reálných zkušebních tělesech. Hlavní pozornost je věnována maximálním hodnotám redukovaného napětí  $\sigma_{\text{Mises}}$  a maximálním deformacím (průhybům) v závislosti na typu směsi, době hydratace a průměru vložené ocelové výztuže.

Tabulka s maximálními hodnotami napětí a deformací získanými z MKP simulací je zařazena před grafickým vyhodnocením. Grafy následně zobrazují závislost maximálního napětí a maximální deformace na průměru ocelové výztuže pro jednotlivé kombinace směsi a stáří betonu.

#### **Porovnání maximálních napětí**

Z grafického porovnání maximálních hodnot redukovaného napětí  $\sigma_{\text{Mises}}$  je viditelné, že s rostoucím průměrem ocelové výztuže dochází k nárůstu lokálních maxim napětí, zejména v oblasti kontaktu zatěžovacího prvku se zkušebním tělesem. Tento trend byl pozorován jak u numerické simulace, tak u experimentálních výsledků.

Nejnižší hodnoty napětí se vyskytují u nevyztužených těles, u vzorků s výztuží o průměru 4 mm dochází k výraznému nárůstu maximálních hodnot napětí. U vzorků po 28 dnech hydratace vykazují obě směsi vyšší tuhost a stabilnější rozložení napětí ve srovnání se vzorky po 7 dnech.

Numerická simulace zároveň zobrazuje vliv výztuže na změnu rozložení napětí v průřezu, kdy se se zvětšujícím průměrem výztuže zvyšuje lokální tuhost soustavy a dochází k výraznějším koncentracím napětí v kritických oblastech modelu.

Z hlediska trendu lze předpokládat, že numerický model dobře vystihuje chování reálných zkušebních těles. Rozdíly v absolutních hodnotách jsou způsobeny zejména zjednodušením materiálového modelu, idealizací okrajových podmínek a absencí některých reálných vlivů, jako jsou mikrotrhliny, nehomogenita směsi nebo lokální vady materiálu.

#### **Porovnání maximálních deformací**

Podobný trend byl pozorován i u maximálních deformací. S rostoucím průměrem ocelové výztuže dochází ke změně charakteru deformace, u vyztužených těles se deformace více nacházejí v oblasti působení zatěžovací síly. U nevyztužených vzorků je rozložení deformace rovnoměrnější podél délky tělesa.

Vzorky s kratší dobou hydratace (7 dní) vykazují vyšší deformace než vzorky po 28 dnech hydratace, což odpovídá nižší tuhosti a pevnosti mladšího betonu. Tento trend byl soustavně pozorován jak v experimentu, tak v numerické simulaci.

Nejvyšší hodnoty deformací byly zaznamenány u kombinace 7denní hydratace a výztuže o průměru 4 mm, což odpovídá nižší tuhosti betonové matrice a vyššímu podílu zatížení přenášeného výztuží.

### Zhodnocení shody výsledků

Na základě porovnání experimentálních dat a výsledků MKP simulace lze usoudit, že numerický model dokáže dobře vystihnout základní mechanické chování betonových těles při tříbodovém ohybu.

Simulace správně zachycuje zejména:

- Vliv doby hydratace na tuhost a deformaci,
- Vliv přítomnosti a průměru ocelové výztuže,
- Vznik koncentrací napětí v oblasti zatížení a podpor,
- Celkový charakter deformace tělesa.

V některých případech se objevují rozdíly v absolutních hodnotách maximálních napětí a deformací, trend vývoje jednotlivých veličin je ve velmi dobré shodě s experimentálními výsledky. Tyto odchylky lze přičíst idealizaci materiálových vlastností v numerickém modelu, zanedbání lokálních poruch v materiálu a zjednodušení kontaktních podmínek.

Na základě dosažené shody lze potvrdit, že vytvořený výpočtový model vhodně popisuje základní chování betonových zkušebních těles při tříbodovém ohybu a představuje použitelný nástroj pro analýzu napjatosti, deformací a vlivu výztuže na mechanickou odezvu kompozitního systému beton–ocel.

Uvedené trendy byly jednotně pozorovány jak v experimentální části (kap. 3.1), tak v numerické simulaci (kap. 3.7), což potvrzuje jejich fyzikální důležitost.

#### 3.7.6 Porovnání výsledků s publikovanými studii

Problematika numerického modelování betonových prvků zatížených tříbodovým ohybem je v odborné literatuře široce diskutována. Například Afanador García et al. (2021) se ve své práci zabývali numerickou analýzou železobetonových nosníků pomocí metody konečných prvků.

Na základě jejich simulací bylo zjištěno, že se maximální napětí koncentruje v tahové oblasti spodní části nosníku a v místě zatížení, rozložení napětí odpovídá teoretickému průběhu ohybového namáhání. Tento trend byl potvrzen i v rámci této diplomové práce, kde se maximální hodnoty napětí rovněž soustřeďují ve spodní části zkušebního tělesa ve střední části rozpětí.

V uvedené studii bylo pozorováno, že přítomnost výztuže ovlivňuje rozložení napětí a přispívá ke zvýšení tuhosti systému. Tento jev se projevil také v provedených simulacích, kde se se zvyšujícím se průměrem ocelové výztuže zvyšovala lokální tuhost a docházelo k větší koncentraci napětí v oblasti výztuže.

Studie Unuk a Kuhta (2024), zaměřená na experimentální a numerickou analýzu betonových prvků při tříbodovém ohybu, uvádí, že s rostoucí tuhostí výztuže dochází ke změně charakteru zatěžovacích křivek a k vyšší schopnosti přenášet zatížení po vzniku trhliny. Podobný trend byl zaznamenán v této práci, kde vyztužené vzorky vykazovaly vyšší deformovatelnost a schopnost přenášet zatížení i po dosažení maximálního napětí.

Na rozdíl od uvedených studií byl v této práci použit zjednodušený lineárně elastický materiálový model betonu, který neumožňuje zachytit vznik a šíření trhlin. Z tohoto důvodu dochází k

určitým rozdílům v absolutních hodnotách napětí a deformací. Numerická simulace poskytuje kvalitativně správný popis rozložení napětí a deformací a zachycuje hlavní trendy mechanického chování zkoušených těles.

Výsledky této diplomové práce jsou v kvalitativní shodě s publikovanými studiemi, z hlediska rozložení napětí, vlivu výztuže a charakteru deformace při ohybovém zatížení.

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo experimentálně stanovit mechanické vlastnosti betonových vzorků namáhaných při tříbodovém ohybu a následně porovnat získané výsledky s numerickou simulací vytvořenou metodou konečných prvků v prostředí programu Abaqus/CAE. Práce byla zaměřena na posouzení vlivu složení betonové směsi, doby hydratace a přítomnosti ocelové výztuže na napěťové a deformační chování zkušebních těles.

V experimentální části byly připraveny dvě skupiny zkušebních těles – vzorky z cementového potěru a vzorky z vlastní míchané jemnozrné betonové směsi. Tyto skupiny byly dále rozděleny podle doby hydratace (7 a 28 dní) a podle přítomnosti výztuže (bez výztuže, výztuž o průměru 2 mm a 4 mm). Na zkušebních tělesech byly provedeny tříbodové ohybové zkoušky, ze kterých byly vyhodnoceny závislosti napětí na průhybu, maximální únosnost a charakter porušení.

Experimentální výsledky prokázaly, že přítomnost ocelové výztuže má zásadní vliv na mechanické chování betonových těles. Nevyztužené vzorky vykazovaly křehké porušení, zatímco vyztužené vzorky byly schopny přenášet zatížení i po vzniku trhliny. Se zvyšujícím se průměrem výztuže docházelo k nárůstu únosnosti i deformovatelnosti. Významný vliv měla rovněž doba hydratace, kdy vzorky po 28 dnech vykazovaly vyšší pevnost a tuhost než vzorky po 7 dnech.

Na základě experimentálních dat byl vytvořen numerický model v programu Abaqus/CAE, ve kterém byl beton uvažován jako lineárně elastický materiál a ocelová výztuž byla modelována jako samostatná materiálová oblast s vazbou na betonovou matici. Simulace umožnila analyzovat rozložení redukovaného napětí  $\sigma_{\text{Mises}}$  a deformací v celém objemu tělesa.

Numerická simulace potvrdila vliv průměru výztuže na rozložení napětí i deformací. S rostoucím průměrem výztuže docházelo ke zvyšování napětí v oceli a k nárůstu lokálních napětí v betonu, zejména v oblasti zatížení a ve spodní tahové části vzorku. U vyztužených variant byl pozorován nárůst maximální deformace před porušením, což souvisí se schopností výztuže přenášet tahová napětí i po vzniku trhliny.

Porovnání experimentálních a numerických výsledků prokázalo dobrou shodu trendů mezi oběma přístupy. Numerický model správně zachytil vliv složení směsi, doby hydratace i průměru výztuže na mechanickou odezvu zkušebních těles. Rozdíly v absolutních hodnotách lze vysvětlit zejména zjednodušením materiálového modelu, absencí modelování vzniku a šíření trhlin a idealizací okrajových podmínek.

Výsledky práce potvrzují, že kombinace experimentálního měření a numerického modelování představuje efektivní nástroj pro analýzu mechanického chování betonových prvků. Experiment poskytuje reálný obraz o chování materiálu, zatímco numerická simulace umožňuje detailní analýzu rozložení napětí a deformací.

Přínosem práce je systematické srovnání vlivu typu směsi, doby hydratace a průměru ocelové výztuže na chování ohybově namáhaných betonových vzorků a současně ověření použitelnosti zjednodušeného numerického modelu pro popis tohoto chování.

Do budoucna by bylo vhodné rozšířit numerický model o nelineární materiálové chování betonu, zahrnout modelování vzniku a šíření trhlin a zpřesnit vstupní parametry na základě detailnějších experimentálních měření.

Stanovený cíl práce byl splněn. Experimentální i numerická část poskytly ucelený pohled na mechanické chování betonových vzorků při tříbodovém ohybu a potvrdily, že numerická simulace je vhodným nástrojem pro analýzu a interpretaci jejich namáhání.

## Využití nástrojů umělé inteligence

Při zpracování této diplomové práce byly využity nástroje AI.

## Seznam použité literatury

AFANADOR GARCÍA, N., et al., 2021. Reinforced Concrete Beams Subjected to Three-Point Bending Using Finite Element Method. *Journal of Physics: Conference Series*.

BUSWELL, R. A., LEAL DE SILVA, W. R., JONES, S. Z. & DIRRENBARGER, J., 2018. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*.

CALLISTER, W. D. & RETHWISCH, D. G., 2018. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th ed. Hoboken: Wiley.

ČSN EN 1015-11. 2020. Metody zkoušení malty – Část 11: Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku ztvrdlé malty. Praha: ÚNMZ.

ČSN EN 12390-5. 2019. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v ohybu zkušebních těles. Praha: ÚNMZ.

ČSN EN 197-1. 2012. Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: ÚNMZ.

ČSN EN 206+A2. 2021. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: ÚNMZ.

ČSN EN ISO 6892-1. 2020. Kovové materiály – Tahová zkouška – Část 1: Zkušební metoda při pokojové teplotě. Praha: ÚNMZ.

DASSAULT SYSTÈMES, 2014. *Abaqus Analysis User's Guide*. Providence, RI: Dassault Systèmes.

DE BORST, R., CRISFIELD, M. A., REMMERS, J. J. C. & VERHOOSEL, C. V., 2012. *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*. 2nd ed. Chichester: Wiley.

EPICENTRUM HOME s.r.o., 2026. Křemičité písky – technické údaje [online]. Dostupné z: <https://www.epicentrumhome.cz/stavebni-materialy/kremicity-pisek/>

[cit. 2026-01-31].

HEIDELBERG MATERIALS, 2026. Balený cement CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R evoBuild Low Carbon Cement 30 [online]. Dostupné z: <https://www.heidelbergmaterials.cz/cs/baleny-cement-cem-iib-m-v-ll-325-r-evobuild-low-carbon-cement-30>

[cit. 2026-01-31].

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M., 2014. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill.

MINDESS, S., YOUNG, J. F. & DARWIN, D., 2003. *Concrete*. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

NEVILLE, A. M., 2011. *Properties of Concrete*. 5th ed. Harlow: Pearson.

SANDSYSTEM s.r.o., 2015. Přírodní křemičité písky – technický list. Klimkovice.

SAINT-GOBAIN CONSTRUCTION PRODUCTS CZ a.s., 2026. weberbat potěr 30 MPa – cementový podlahový potěr [online]. Dostupné z: <https://www.cz.weber/podlahy/nesamonivelacni-specialni-potery/weberbat-poter-30-mpa>

[cit. 2026-01-31].

SAINT-GOBAIN WEBER, 2023. weberbat potěr 30 MPa – technický list výrobku.

SVARECIKUKLA.CZ, 2026. Svářecí drát ocel pro autogen G104, Ø 2,0–5,0 mm × 1000 mm [online]. Dostupné z: <https://www.svarecikukla.cz/drat-pro-autogen-ocel-g104---2-0-5-0-mm-x-1000-mm-esab--/>

[cit. 2026-01-31].

UNUK, Ž. & KUHTA, M., 2024. Nonlinear Semi-Numeric and Finite Element Analysis of Three-Point Bending Tests of Notched Polymer Fiber-Reinforced Concrete Prisms. Applied Sciences.

ZIENKIEWICZ, O. C., TAYLOR, R. L. & ZHU, J. Z., 2005. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 6th ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

# Seznam příloh

## **Příloha 1**

Technický list cementového potěru Weberbat potěr 30 MPa

## **Příloha 2**

Technický list cementového potěru Weberbat potěr 30 MPa

## **Příloha 3**

Technický list přírodních křemičitých písků – 1. strana

## **Příloha 4**

Technický list přírodních křemičitých písků – 2. strana

## **Příloha 5**

Technický list cementu CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R – evoBuild Low Carbon Cement 30

## **Příloha 6**

Technický list cementu CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R – evoBuild Low Carbon Cement 30

## **Příloha 7**

Prohlášení o vlastnostech č. 1202-CPR-040 069367 – Heidelberg Materials

## **Příloha 8**

Fyzikálně-mechanické vlastnosti cementu dle výrobce

## **Příloha 9**

Technický list svařovacího drátu ESAB G104

## **Příloha 10**

Technický výkres betonového vzorku

# Přílohy

## Příloha 1

Cementový podlahový potěr pro ruční zpracování

**weberbat potěr 20 MPa**

**weberbat potěr 30 MPa**

**weberbat jemný 25 MPa**

 **Nejdůležitější vlastnosti**

- o pro vytváření podkladních podlahových vrstev
- o pochůznost po 1 dni
- o pro vnitřní i vnější použití

**Použití a definice výrobku**

▶ Jednosložková cementová podlahová hmota pro ruční zpracování. Hmota je určena pro provádění vnitřních i vnějších připojených podlahových potěrů. Tvoří podkladní vrstvu pro konečnou povrchovou úpravu podlah a slouží jako vyrovnávací vrstva v suchém i vlhkém neagresivním prostředí.

**Rady, tipy, upozornění**

- ▶ Věnujte pozornost přípravě a penetraci podkladu.
- ▶ Do míchačky nejdříve nadávkuje záměsovou vodu, až poté vsype suchou směs.
- ▶ Hmotu zarovnejte stahovací latí nebo vibrační lištou a následně zatočte hladítkem.
- ▶ Podle potřeby provádějte vlhčení aplikované plochy.
- ▶ Aplikace dalších vrstev po 28 dnech.
- ▶ **Použijte předepsané ochranné pracovní pomůcky.**

**Spotřeba**

- ▶ suchá směs na 1 m<sup>2</sup> hmoty: ..... cca 1 950 kg
- ▶ suchá směs ..... cca 18 – 21 kg/m<sup>2</sup>/1 cm tl.

**Aplikační tloušťky, zrnitost, záměsová voda**

weberbat	potěr 20 MPa	jemný 25 MPa	potěr 30 MPa
dávkování vody na 25 kg pytel	cca 3,4-3,6l	cca 4l-4,3l	cca 3,4-3,6l
aplikační tloušťka vrstvy	10 – 40 mm	5 – 20 mm	10 – 40 mm
zrnitost	4 mm	1 mm	4 mm



**Číslo výrobku**  
BP 420  
BP 425  
BP 430

**Balení**  
25 kg

**Barva**  
Šedá



Technický list / Podlahy a betony



**Systémové výrobky**

Systémové výrobky	Číslo výrobku
weberpodklad A – podkladní nátěr	NPA 100
weberbat výztuž – skelná výztužná síť	G120

**Další praktické informace a odkazy  
kompletní dokumentace**

weberbat potěr 20 MPa	weberbat jemný 25 MPa	weberbat potěr 30 MPa
		

248 www.cz.weber

Zdroj: Technický list výrobce – Weberbat potěr 30 MPa.

## Příloha 2

### Aplikace



Do míchačky se nejdříve nadávkuje čistá voda a za stálého míchání se vsypává suchá směs. Hmotu se míchá cca 5 minut. Případné dodatečné přidání vody provádíme pomalu a opatrně tak, aby hmota na konci míchacího cyklu byla požadované konzistence.



Hmota se nanáší na připravený podklad (příp. do srovnávacích lišt).



Povrch se zároveň do roviny stahovací latí nebo vibrační lištou s následným zahlazením povrchu hladítkem. Podle prostředí, ve kterém byla směs aplikována, se provádí její ošetřování (kropení vodou). Podlaha je pochůzná po 1 dni.

#### Složení

Hmota na bázi anorganického plniva, pojiva a modifikujících přísad.

#### Technická data

Potěry jsou určeny pro vnitřní i venkovní použití.

#### Všeobecné požadavky na podklad

Podklad (beton) musí být zbavený prachu, nečistot, mastnoty a nesmí být zmrzlý. Před nanášením směsi doporučujeme podklad zdrsňit a důkladně navlhčit. Při nedostatečném navlhčení se může cementový potěr v důsledku rychlého odsátí vody odtrhnout od podkladu. Pro zvýšení přidržitosti k podkladu je vhodné aplikovat penetrační nátěr.

#### Podmínky pro zpracování

Teplota ovzduší při aplikaci musí být od +5 °C do +25 °C, teplota podkladu nesmí klesnout pod +5 °C. Čerstvě nanášené plochy nesmějí být vystaveny přímým negativním účinkům tepla, vlhka a průvanu.

#### Podkladní nátěr

Na penetrační podkladu před aplikací směsi použijeme ředěný roztok **weberpodklad A** s vodou v poměru 1:5 dle savosti podkladu. V případě vyšší savosti je doporučeno provést ještě jednu penetraci.

#### Nářadí

Míchačka s nuceným mícháním, zednická lžice, lat (doporučujeme vibrační), vodováha, nerezové hladítko.

#### Čištění

Nádoby, přístroje a nářadí se po použití očistí vodou.

#### Balení

Ve 25 kg papírových obalech, 42 ks – 1050 kg/paleta.

#### Skladování

12 měsíců od data výroby v originálních obalech v suchých, krytých skladech.

#### Upozornění

Dodatečné přidávání plniva, pojiva a přísad se nepovoluje. Při teplotách vzduchu a podkladu pod +5 °C a při očekávaných mrazech nepoužívat.

**Veškeré údaje v tomto návodu jsou nezávazné.** Jsou však zpracovány podle nejlepších poznatků a zkušeností z praxe a jsou založeny na nejnovějších technických poznatcích.

#### Bezpečnost práce

Před započetím práce věnujte pozornost pokynům pro ochranu zdraví a životního prostředí, které jsou uvedené na obalech výrobků nebo v bezpečnostních listech. Při práci s výrobkem nejezte, nepijte, nekuřte a používejte předepsané ochranné pracovní pomůcky.

#### Likvidace odpadů

Postupujte podle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, v platném znění. Podrobnější informace jsou uvedeny v bezpečnostním listu výrobku.

**Dodržením uvedených pokynů chráníte své zdraví a životní prostředí!**

#### CE parametry

	<b>divize Weber</b>		
	Saint-Gobain Construction Products CZ a.s. Smrčková 2485/4, 180 00 Praha 8		
	<b>BP420</b> 045/2013 II	<b>BP425</b> 046/2013 II	<b>BP430</b> 047/2013 II
	<b>CT-C20-F4</b>	<b>CT-C25-F4</b>	<b>CT-C30-F5</b>
cementový potěrový materiál pro vnitřní použití ve stávkách			
<b>EN 13813</b>			
<b>Harmonizovaná technická specifikace</b>			
<b>Reakce na oheň</b>	AI <sub>1</sub>	AI <sub>1</sub>	AI <sub>1</sub>
<b>Uvolňování nebezpečných látek</b>	CT	CT	CT
<b>Propustnost vody</b>	NPD	NPD	NPD
<b>Propustnost vodní páry</b>	NPD	NPD	NPD
<b>Pevnost v tlaku</b>	C 20	C 25	C 30
<b>Pevnost v tahu za ohybu</b>	F4	F4	F5
<b>Přidržitost</b>	NPD	NPD	NPD
<b>Odolnost proti obrusu</b>	NPD	NPD	NPD
<b>Zvuková izolace</b>	NPD	NPD	NPD
<b>Zvuková pohltivost</b>	NPD	NPD	NPD
<b>Tepelný odpor</b>	NPD	NPD	NPD
<b>Odolnost proti chemickému vlivu</b>	NPD	NPD	NPD

Výrobek je nad rámec normy ČSN EN 13 813 testován na mrazuvzdornost a je použitelný i v exteriéru.

weberbat potěr 20 MPa, weberbat potěr 30 MPa, weberbat jemný 25 MPa

www.cz.weber



**TECHNICKÝ LIST:**

**PŘÍRODNÍ KŘEMIČITÉ PÍSKY n**

**POPIS:**

Přírodní křemičité písky se vyrábí z velmi kvalitních světlých křemičitých písků. Vysoká kvalita je zaručena pečlivou kontrolou vstupních surovin, písky jsou prané, sušené a tříděné. Obsah SiO<sub>2</sub> je 95 – 99,8%, vlhkost křemičitého písku je do 1%.

Písky se vyznačují vysokou mechanickou odolností, stejnoměrným rozdělením zrn a vysokou chemickou odolností.

**POUŽITÍ:**

Ve stavebnictví k výrobě stavebních tmelů, lepidel, pryskyřičných směsí a speciálních sanačních betonů, jako filtrační písek do pískových filtrací bazénů, v zahradnictví a zoologii, pro tvorbu kamínkových koberců, do tryskacích zařízení, na zásep zámkové dlažby. Vybrané zrnitosti pro zásep přírodních trávníků a pro zásep umělých sportovních povrchů.

**VLASTNOSTI:**

- Přesná granulometrie a konstantní stavba zrna
- Chemická odolnost i v agresivním prostředí
- Odolnost vůči UV záření a povětrnostním podmínkám
- Široká nabídka zrnitostí
- Bez organického znečištění

**ZRNITOSTI:**

Přírodní křemičité písky jsou dodávány v těchto základních zrnitostech:

- 0,1 – 0,3 mm
- 0,1 – 0,5 mm
- 0,2 – 0,8 mm
- 0,4 – 0,8 mm
- 0,6 – 1,2 mm
- 0,8 – 1,2 mm
- 1,0 – 1,6 mm
- 1,4 – 2,0 mm
- 2,0 – 3,0 mm
- 2,0 – 4,0 mm
- 3,0 – 5,0 mm
- 4,0 – 8,0 mm

Speciální zrnitost: 0,2 – 2,0 mm /pro zásep přírodních trávníků/

Křemičitá moučka: < 0,2 mm

*Písky je možné dodávat i v jiných zrnitostech na základě přání zákazníka.*

## Příloha 4



### FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI:

Vzhled	Pevná částice
Barva	V souladu se specifikací
Zápach	Bez zápachu
Teplota tání písku	1700 °C
Hořlavost	Nehořlavý
Sypná objemová hmotnost písku	1500 – 1800 kg/m <sup>3</sup>
Rozpustnost ve vodě	Nerozpustný
Rozpustnost s určitou složkou	Nevyskytuje se

### ZPRACOVÁNÍ:

Křemičité písky se velice snadno zpracovávají díky optimálnímu kulatému tvaru zrna. Pokyny pro aplikaci do podlah nebo omítek jsou uvedeny v technických listech výrobců pojiva.

### BALENÍ:

- Big bag – 1000 kg
- Papírový pytel 25 kg /na paletě 1000 kg/
- Plastový pytel 25 kg
- Plastový pytel 1 kg nebo 3 kg /jen vybrané zrnitosti/
- Další možnost po dohodě

### SKLADOVÁNÍ:

- Suchý sklad, na paletách

### VÝROBCE:

SANDECO SA, ul. Ks. Prałata St. Slonki 24, 34-300 Żywiec, Polsko



Sandsystem s.r.o.  
U Podjezdu 92  
742 83 Klimkovice – Václavovice

Tel.: +420 774 710 318  
info@sandsystem.cz  
www.sandsystem.cz

IČ: 26874253  
DIČ: CZ26874253

Zdroj: Technický list výrobce – SAND SYSTEM.

## CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R Mokrá evoBUILD Low carbon Cement 30

Portlandský směsný cement  
EN 197-1

Výrobce: Heidelberg Materials CZ, a.s. – Závod Mokrá



Technický list

červenec 2025



### Nízkouhlikový cement v nové produktové řadě evoBuild

#### Charakteristické vlastnosti:

- Středně rychlý nárůst pevností
- Nízká počáteční pevnost
- Středně vysoká konečná pevnost
- Středně rychlý vývin hydratačního tepla
- Středně vysoké celkové hydratační teplo

#### Použití:

- Betony středních pevnostních tříd
- Betony se středním nárůstem pevnosti
- Prosté a vyztužené betony
- Průmyslové stavby
- Betonové výrobky

**30%**

Nízkouhlikový cement  
30% snížení CO<sub>2</sub>  
ve srovnání  
s ref. hodnotou GCCA  
pro CEM I v r. 2020

#### Český cement:

- Symbol v národních barvách odkazuje na český původ zboží a českou identitu.
- Značka reprezentuje nový přístup, pokrok a úspěchy českého cementářského průmyslu.



#### Kvalita, bezpečnost, ekologie:

Kvalita výrobků, respekt k životnímu prostředí, důraz na bezpečnost zaměstnanců a hospodárné využívání energetických zdrojů patří k našim hlavním prioritám. Plnění požadavků příslušných systémů managementu je potvrzeno vydanými certifikáty:

- Management kvality ČSN EN ISO 9001
- Management bezpečnosti a ochrany zdraví při práci ČSN EN ISO 45001
- Environmentální management ČSN EN ISO 14001
- Management hospodaření s energií ČSN EN ISO 50001



#### Způsob dodání:

- Volně ložený v autocisternách nebo železničních vagonch Raj
- Balený v papírových pytlích 25 kg s polyetylenovou vložkou, na vratných paletách o celkové hmotnosti 1,4 t

Obsah složek		
Hlavní složky	Portlandský slínek	65 – 79 %
	Popílek	21 – 35 %
	Vápenec (max. 20 %)	
Doplňující složka		0 – 5 %

Druh, množství a kvalita hlavních i doplňujících složek se odvíjí od požadavků technické normy EN 197-1. Mezi složky nepatří síran vápenatý, který se přidává jako regulátor tuhnutí, ani případné přísady usnadňující výrobu nebo upravující vlastnosti cementu.

Heidelberg Materials CZ, a.s.  
Mokrá 359, 664 04 Mokrá-Horákov  
IČO: 26209578

www.heidelbergmaterials.cz  
www.heidelbergmaterials.cz/cs/evobuild

Zdroj: Technický list výrobce – Heidelberg Materials.

## CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R Mokrá eVOBUILD Low carbon Cement 30

Portlandský směsný cement

EN 197-1



Technický list

červenec 2025

Výrobce: Heidelberg Materials CZ, a.s. – Závod Mokrá

Fyzikální a mechanické vlastnosti			Chemické vlastnosti			
Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka	
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	7,5	EN 196-1	Obsah SO <sub>3</sub> [%]	2,69*	EN 196-2
	2 dny	20,4*	EN 196-1	Obsah Cl <sup>-</sup> [%]	0,060*	EN 196-2
	7 dní	30,6	EN 196-1	Na <sub>2</sub> O ekvivalent [%]	0,66*	EN 196-2
	28 dní	46,4*	EN 196-1	*Průměrné hodnoty získané z měsíčních statistických dat za rok 2024		
	56 dní	50,4	EN 196-1	V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr <sup>6+</sup> v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).		
	90 dní	53,0	EN 196-1			
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	2,0	EN 196-1			
	2 dny	4,2*	EN 196-1			
	7 dní	6,0	EN 196-1			
	28 dní	8,1*	EN 196-1			
	56 dní	8,7	EN 196-1			
	90 dní	8,8	EN 196-1			
Normální konzistence [%]	31,7*	EN 196-3				
Počátek tuhnutí [min]	237*	EN 196-3				
Konec tuhnutí [min]	348*	EN 196-3				
Objemová stálost [mm]	0,8*	EN 196-3, Le Chatelier				
Měrný povrch [m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	515*	EN 196-6, Blaine				
Měrná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]	2920	EN 196-6				
Sypná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ] - v autocisterně	-	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.				
Sypná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ] - v síle	1200 – 1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.				
Hydratační teplo [J·g <sup>-1</sup> ]	7 dní	260	EN 196-11			

Hodnoty uvedené v technickém listu mají čistě informativní charakter a mohou se lišit od hodnot konkrétních vzorků. Před jejich porovnáním s vlastnostmi jiných výrobků se prosím ujistěte, že všechna porovnávaná data byla získána pomocí totožných zkušebních postupů. V případě pochybností nás neváhejte kontaktovat.

**PROHLÁŠENÍ O VLASTNOSTECH**

č. 1020-CPR-040 069367



- Jedinečný identifikační kód typu výrobku:  
**Portlandský směsný cement EN 197-1 – CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R**
- Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití:  
**Příprava betonu, malty, injektážní malty a jiných směsí pro stavění a pro výrobu stavebních výrobků**
- Výrobce:  
**Heidelberg Materials CZ, a.s., Mokrá 359, 664 04 Mokrá-Horákov, Česká republika,  
Závod Mokrá**
- Systém POSV:  
**1+**
- Harmonizovaná norma:  
**EN 197-1: 2011**  
Oznámený subjekt:  
**Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., Prosecká 811/76a, Praha 9, NB 1020**
- Vlastnosti uvedené v prohlášení

Základní charakteristiky	Vlastnosti	Harmonizovaná technická specifikace
Cement pro obecné použití - složení	CEM II/B-M (V-LL)	EN 197-1:2011
Pevnost v tlaku (počáteční a normalizovaná pevnost)	32,5 R	
Počátek tuhnutí	splněno	
Objemová stálost	splněno	
Obsah síranů	splněno	
Obsah chloridů	splněno	

Toto prohlášení o vlastnostech je zpřístupněno na internetové stránce výrobce: [www.heidelbergmaterials.cz]

Vlastnosti výše uvedeného výrobku jsou ve shodě se souborem deklarovaných vlastností. Toto prohlášení o vlastnostech se v souladu s nařízením (EU) č. 305/2011 vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného výše.

Podepsáno za výrobce a jeho jménem:

Ing. Petr Schořík  
Vedoucí kontroly a řízení jakosti

Podpis

V Mokrém dne 1.1.2024

Tímto se ruší vydání prohlášení o vlastnostech ze dne 24.08.2022

	<b>® TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA, s.p.</b> <b>Technical and Test Institute for Construction Prague, SOE</b> <small>Akreditované laboratoře, Autorizovaná osoba, Notifikovaná osoba, Oznámený subjekt, Subjekt pro technické posuzování, Certifikační orgány, Inspekční orgán / Accredited Laboratories, Authorized Body, Notified Body, Technical Assessment Body, Certification Bodies, Inspection Body • Prosecká 811/76a, Prosek, 190 00 Praha 9, Czech Republic</small>
Oznámený subjekt 1020	
<b>OSVĚDČENÍ</b> <b>O STÁLOSTI VLASTNOSTÍ</b> certificate of constancy of performance	
<b>č. 1020 – CPR – 040 069367</b>	
V souladu s nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 305/2011 ze dne 9. března 2011 (nařízení o stavebních výrobcích nebo CPR) se vydává toto osvědčení pro stavební výrobek:	
<b>Portlandský směsný cement</b> typ / varianta: CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R	
uvedený na trh pod jménem nebo firmou nebo ochrannou známkou výrobce:	
<b>Heidelberg Materials CZ, a.s.</b> Mokrá 359, 664 04 Mokrá-Horákov IČO: 26 20 95 78 a vyrobený ve výrobním závodě: <b>závod Mokrá</b> Mokrá 359, 664 04 Mokrá-Horákov	
Toto osvědčení prokazuje, že všechna ustanovení týkající se posuzování a ověřování stálosti vlastností popsaná v příloze ZA normy	
<b>EN 197-1:2011</b>	
podle systému 1+ pro vlastnosti uvedené v tomto osvědčení byla uplatněna a že řízení výroby u výrobce zajišťuje	
<b>stálost vlastností stavebního výrobku.</b>	
Toto osvědčení bylo poprvé vydáno <b>24. června 2022</b> a zůstává v platnosti, dokud se harmonizovaná norma, stavební výrobek, postupy posuzování a ověřování stálosti vlastností ani výrobní podmínky v místě výroby výrazně nezmění nebo pokud oznámený subjekt pro osvědčení výrobku nepozastaví nebo nezruší platnost tohoto osvědčení.	
Teplice, 1. ledna 2024	 Ing. Pavel Rubáš Ph.D. zástupce vedoucího oznámeného subjektu

## Příloha 9



# G 104

EN 12536: OIII

### Použití:

Pro svařování energetických zařízení, např. trubek z oceli 12 020, 12 021 apod., pracujících do maximální teploty 425°C.

### Chemické složení drátu (%):

C	Si	Mn	Ni
0,08	0,15	1,0	0,5

### Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

Podmínky	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>eL</sub> MPa	A <sub>5</sub> %
EN	470	310	30

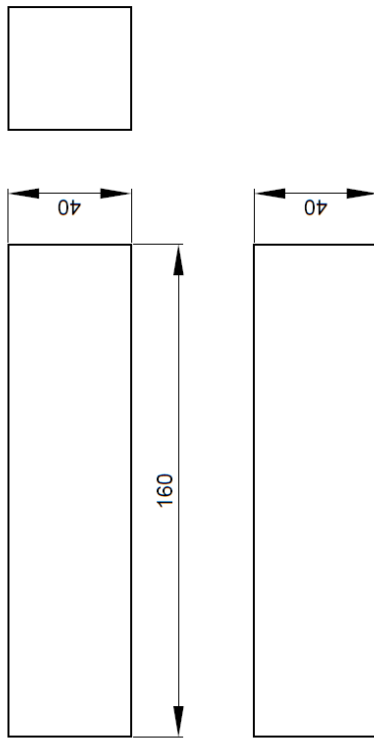
### Balení:

Průměr (mm)	Délka (mm)	Hmotnost balení (kg)
1,6	1000	9
2,0	1000	10
2,5	1000	11
3,2	1000	11
4,0	1000	11
5,0	1000	11

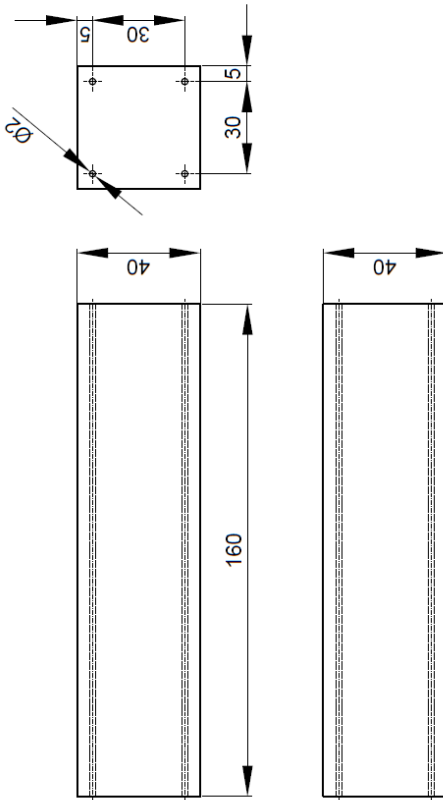
*Zdroj: Technický list výrobce*

Příloha 10

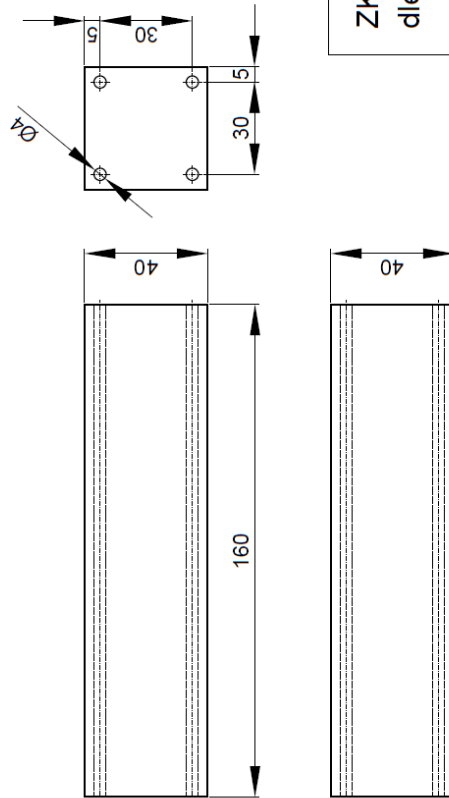
PŘÍPRAVEK č. 1 (betonová matrice bez výztuže)



PŘÍPRAVEK č. 2 (betonová matrice s ocelovou výztuží o průměru 2 mm)



PŘÍPRAVEK č. 3 (betonová matrice s ocelovou výztuží o průměru 4 mm)



ZKUŠEBNÍ TĚLESO PRO TŘÍBODOVOU OHYBOVOU ZKOUŠKU dle ČSN EN 1015-11			
NÁZEV VÝKRESU:	Geometrie zkušebního tělesa	MĚŘÍTKO:	1:1
VYPRACOVAL:	Bc. Tomáš Chalupský, DiS.	DATUM:	02/2026
ŠKOLA:	Vysoká škola polytechnická Jihlava	ČÍSLO VÝKRESU:	01