

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza chování spoje dvou betonů různého stáří

Autor: Bc. Ian Crowther

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Akademický rok: 2023/2024

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Crowther** Jméno: **Ian** Osobní číslo: **477015**  
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studijní program: **Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce pozemních staveb**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Analýza chování spoje dvou betonů různého stáří**

Název diplomové práce anglicky:

**Analysis of behaviour of new – old concrete interface**

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešeršní část práce na téma pracovních spár v betonových konstrukcích s důrazem na typy úprav podle způsobu zatížení, vliv spojování betonů různého stáří a případné komplikace.  
Vytvořte zkušební vzorky s různě tvarovanou pracovní spárou a ty odzkoušejte na ohybovou únosnost. Výsledky porovnejte. Ověřte chování vzorků během zatěžovací zkoušky pomocí numerické simulace s využitím metody konečných prvků.

Seznam doporučené literatury:

- \* České státní normy
- \* www.scopus.com
- \* internetové stránky

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D. katedra betonových a zděných konstrukcí FSV**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Máca, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Analýza chování spoje dvou betonů různého stáří“ vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Ian Crowther

.....

## **Abstrakt:**

Tato práce se zabývá soudržností betonových vrstev v pracovních spárách rozdílného stáří betonu. V práci je popsána problematika soudržnosti betonu se zaměřením na provádění pracovní spáry. V druhé části této práce je detailně popsán experiment od výroby vzorků s pracovními spárami, destruktivní zkoušky čtyřbodovým ohybem, až po následné vyhodnocení pevnosti betonových vzorků v tahu. Ve třetí části diplomové práce jsou navrženy vlastnosti zkoušených betonových spár numerickou analýzou za pomoci metody konečných prvků.

Výsledkem práce je získání povědomí o chování betonových styků různých tvarů a způsobu provedení při namáhání ohybem. Dále jsou získané experimentální výsledky nadefinovány ve výpočetním programu pro možné využití získaných poznatků o chování a vlastnostech pracovních spár v ohýbaných prvcích.

## **Klíčová slova:**

beton, soudržnost betonových vrstev, pracovní spára, pevnost betonu v tahu za ohybu, stykování betonových konstrukcí, koheze



## **Abstract:**

This thesis deals with the cohesion of concrete layers in construction joints of different concrete ages. The work describes the issue of concrete cohesion focusing on the execution of construction joints. In the second part of this thesis, the experiment is described in detail from the production of samples with construction joints, destructive testing by four-point bending, to the subsequent evaluation of the tensile strength of concrete samples. In the third part of the thesis, the properties of the tested concrete joints are proposed using numerical analysis with the finite element method

The result of the work is the acquisition of knowledge about the behavior of concrete joints of different shapes and methods of execution under bending stress. Furthermore, the obtained experimental results are defined in the computational program for possible use of the acquired insights into the behavior and properties of construction joints in bent elements.

## **Key words:**

concrete, cohesion of concrete layers, construction joint, tensile strength of concrete in bending, connecting concrete structures, cohesion

## **Poděkování**

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Josefovi Fládrovi, Ph.D. za odborné rady a vedení této práce. Také bych rád poděkoval panu docentovi za umožnění a cenou výpomoc v experimentální části diplomové práce. V neposlední řadě děkuji své rodině a blízkým za podporu při mém studiu.

# Obsah

Úvod.....	8
1 Teoretická část .....	9
1.1 Soudržnost betonových vrstev .....	9
1.1.1 Přirozená soudržnost.....	10
1.1.2 Tření mezi vrstvami betonu ve styku.....	12
1.1.3 Vliv drsnosti spáry na adhezi betonových vrstev .....	12
1.2 Spáry v betonových konstrukcích.....	14
1.2.1 Pracovní spáry v masivních betonových konstrukcích.....	16
1.2.2 Pracovní spáry ve vodorovných monolitických konstrukcích.....	17
1.2.3 Spolupůsobení prefabrikovaných a monolitických prvků .....	20
2 Experimentální část.....	23
2.1 Popis zkoušky .....	23
2.2 Popis provádění vzorků .....	24
2.3 Přehled vzorků .....	25
2.3.1 Referenční vzorek (REF) .....	25
2.3.2 Vzorek se svislou spárou s využitím tahokovu (BS 1) .....	25
2.3.3 Vzorek s vyboulenou pracovní spárou s využitím tahokovu (BS 2) .....	25
2.3.4 Vzorek s šikmou pracovní spárou pod úhlem 45° B-systém (BS 3) .....	26
2.3.5 Vzorek s pracovní spárou ve tvaru zámku (Z).....	26
2.3.6 Vzorek s šikmou spárou tvořenou bednicí překližkou (H) .....	26
2.3.7 Vzorek s šikmou spárou mechanicky zdrsňenou (D) .....	26
2.4 Receptura betonu .....	27
2.5 Stanovení pevnosti betonu v tlaku.....	27
2.5.1 Postup zkoušky .....	27
2.5.2 Použité pomůcky.....	27
2.5.3 Výsledky .....	27

2.5.4	Určení pevnostní třídy betonu.....	28
2.6	Stanovení betonu v tahu za ohybu .....	30
2.6.1	Postup zkoušky .....	30
2.6.2	Použité pomůcky.....	31
2.6.3	Neplatné vzorky .....	31
2.6.4	Výsledky zkoušky.....	32
2.7	Vyhodnocení experimentální části.....	33
2.7.1	Referenční skupina vzorků .....	34
2.7.2	Skupina BS1 .....	35
2.7.3	Skupina BS2 .....	36
2.7.4	Skupina BS3 .....	37
2.7.5	Skupina Z.....	38
2.7.6	Skupina H .....	39
2.7.7	Zhodnocení zkoušky .....	41
3	Numerické ověření zatěžovací zkoušky .....	42
3.1	Návrh referenčního numerického modelu .....	43
3.1.1	Materiál.....	43
3.1.2	Topologie.....	44
3.1.3	Zatížení a podpory .....	44
3.1.4	Zatížení styčníků.....	45
3.1.5	Nastavení monitorů.....	45
3.1.6	Výsledky výpočtu .....	45
3.2	Numerické simulace prvků s pracovními spárami.....	46
3.2.1	Výpočetní model BS 1 .....	46
3.2.2	Výpočetní model BS 2.....	47
3.2.3	Výpočetní model BS 3.....	48
3.2.4	Výpočetní model Z .....	48

3.2.5	Výpočetní model H.....	49
3.2.6	Výpočetní model D.....	50
3.3	Porovnání numerických a zkoušených výsledků .....	51
4	Závěr .....	52
	Seznam literatury .....	53
	Seznam tabulek.....	54
	Seznam obrázků.....	55

# Úvod

Realizace betonových konstrukcí je ve skutečnosti složitý proces, který vyžaduje hodně času a pečlivé plánování. Beton sám o sobě svou vahou a specifickými vlastnostmi komplikuje a omezuje stavbu betonových konstrukcí. Na každé stavbě se každodenně řeší potřeba zajistit spojení mezi jednotlivými vrstvami betonu, aby spolupracovaly harmonicky a zabránily tak možným problémům v citlivých oblastech. Je klíčové vytvořit spoj, který je spolehlivý a trvanlivý, zejména pokud jde o nosnou část konstrukce. Spoje v betonu bývají považovány za slabé a nespolehlivé body konstrukce, což může vést k rozhodnutím brzdícím průběh stavby nebo k neoptimálním řešením z důvodu nedostatečné znalosti a obav z kvality spojů v betonu.

U konstrukcí z železobetonu je zásadní, aby konstrukce fungovala jako jednotný celek a byla schopna rovnoměrně přenášet napětí stejně jako v původním předpokládaném provedení.

V praxi jde zejména o níže uvedené případy:

Při technologických přestávkách, které jsou nevyhnutelné při konstrukci komplexních a objemných betonových prvků. Zde můžeme zařadit také provádění smršťovacích pásů.

Zmonolitnění prefabrikovaných dílců tak, aby daná konstrukce působila jako jeden celek a přenášela požadované napětí.

Při restauracích betonových konstrukcí je klíčové zajistit správné spolupůsobení starého betonu s novým.

Z výše uvedených důvodů je motivací této diplomové práce objasnit chování pracovních spár při zatížení. Zejména při ohybových účincích. Budou tedy navrženy nejčastěji prováděné pracovní spáry a zkoušeny čtyřbodovým ohybem v experimentální části.

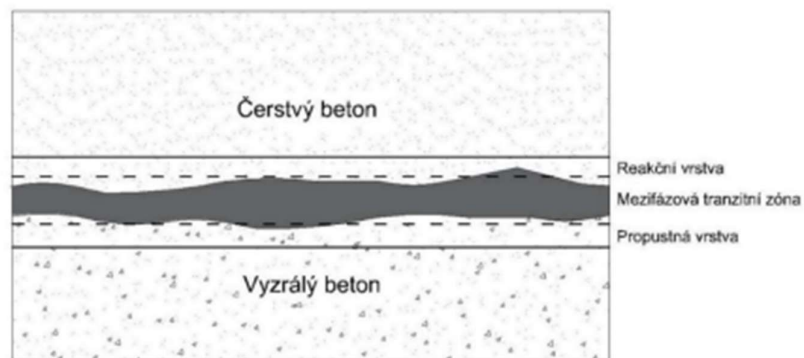
Pro kontrolu a možnou aplikaci průběhu zatěžování pracovních spár v betonových konstrukcích budou získané znalosti a vlastnosti pracovních spár ověřeny ve výpočetním modelu s využitím metody konečných prvků v programu ATENA.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Soudržnost betonových vrstev

Základním předpokladem úspěšného spojení betonových struktur je pochopení koherence mezi jednotlivými vrstvami betonu a znalost faktorů, které na ni mají vliv. Při plánování spojení betonových vrstev je důležité vzít v úvahu přenášení zatížení skrz rozhraní betonového spoje a vytváření vnitřních sil v místě přerušení. Pokud se zkoumané vrstvy betonu liší ve stáří, typicky čerstvá betonová směs a zatvrdlý beton s nabývajícím pevností nebo zralý beton, je nutné pečlivě zajistit spolupůsobení neboli soudržnost mezi vrstvami betonu, viz obr. 1.

Pro zajištění odolného a dlouhotrvajícího spoje mezi cementovými vrstvami je nevyhnutelné brát v úvahu dva klíčové aspekty. První z nich se týká míry přilnavosti mezi původním povrchem a novým betonem. Tento adhezni proces závisí zejména na pevnosti, čistotě a hrubosti povrchu. Druhý aspekt, vazební mechanismus, je spojen s pórovitostí a mezo- a mikrostrukturou přechodové zóny mezi vrstvami, nazývané OTZ (overlay transition zone). Hustší OTZ, která zlepšuje mechanismus spojení a soudržnosti, lze dosáhnout pomocí správných technik aplikace (např. samonivelační nebo stříkaný beton) a pečlivého postupu během tuhnutí, aby se zabránilo přílišnému plastickému smrštění a smrštění při vysychání. [1]



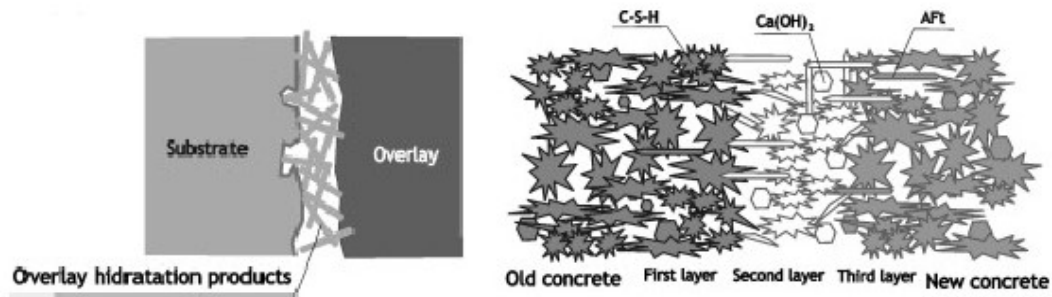
Obrázek 1: Rozhraní betonových vrstev [2]

Soudržnost nebo adheze je fyzikálně mechanický jev, který se vyskytuje na rozhraní dvou propojených materiálů. Síla potřebná k oddělení těchto materiálů se označuje jako adhezni síla. U kompozitních materiálů hrají roli tři základní faktory ve vztahu k pevnosti. Tyto faktory zahrnují přirozenou soudržnost, tření mezi vrstvami a využití vyztužení spoje. [3]

### 1.1.1 Přirozená soudržnost

Přirozená soudržnost může být dále rozdělena na mechanickou nebo specifickou soudržnost. Při spojení vrstev dochází k pronikání lepidla, což je například cementová pasta čerstvého betonu, do nerovností druhé vrstvy, čímž se vytváří spojení. Specifická adheze zahrnuje adsorpční jevy (chemické vazby, vodíkové vazby, Van der Waalsovy síly), elektrostatiku a difuzi. [3]

Pokud jde o spojení dvou vrstev betonu, klíčovým faktorem je mechanická soudržnost a adsorpce. Po spojení čerstvého betonu s již existujícím povrchem betonu začnou působit síly mezi částicemi. Tento jev usnadňuje pronikání cementové pasty z čerstvého betonu do nerovného povrchu zatuhlých betonových vrstev. Jakmile začne čerstvý beton tuhnout, začne se projevovat chemická přilnavost. Probíhají chemické reakce mezi složkami čerstvé betonové směsi a nehydratovanými cementovými částicemi ve starším betonu. Nehydratovaná jádra cementu začnou reagovat jen v případě narušení cementových zrn, tedy v případě, že je stará betonová vrstva mechanicky narušena. Tento proces připomíná chemickou reakci při míchání cementu a kameniva v betonové směsi. V oblasti mezi dvěma vrstvami betonu vzniká tzv. mezifázová tranzitní zóna, kde se hydratují cementová zrna kvůli vyššímu obsahu vody. V důsledku toho vznikají dutiny na místě cementových zrn, které se s výsledky hydratace přemisťují do mezikrystalového prostoru. Tato oblast může mít různou míru poréznosti podle použité receptury betonové směsi. Na okrajích mezifázové zóny se vytvářejí propustné a reakční vrstvy. Mechanická soudržnost ovlivňuje propustnou vrstvu, zatímco specifická soudržnost má vliv na reakční vrstvu. [3]

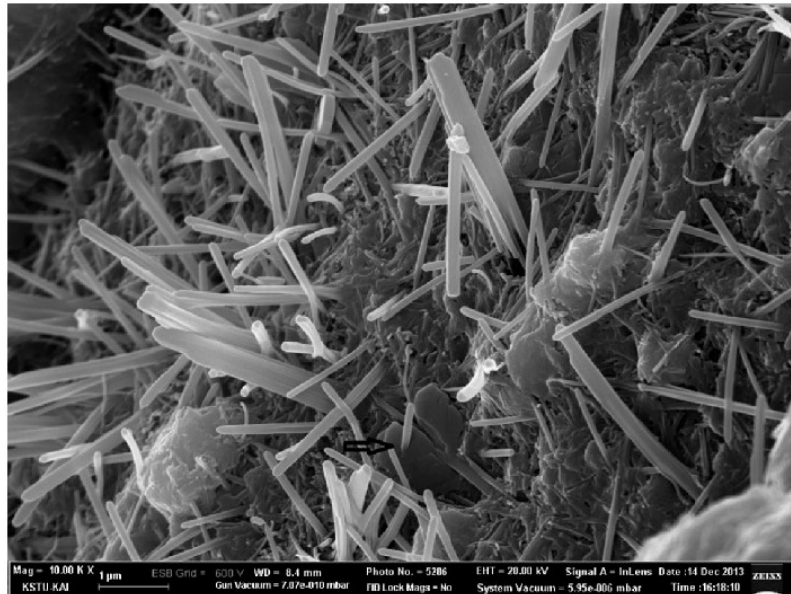


Obrázek 2: Chemický spoj vyzrálého a čerstvého betonu [1]

Zmíněná propustná vrstva se vyskytuje na okraji zatuhlých betonových prvků, kde je zjištěno vyšší množství hydrosilikátů C-S-H a křemičitanu vápenatého. V menší míře se vyskytuje  $\text{Ca(OH)}_2$  nebo ettringit. Naopak, reakční vrstva se objevuje na rozhraní čerstvé betonové směsi. Krystaly v reakční vrstvě mají podobné složení jako krystaly v čerstvé



betonové směsi. Mezi propustnou a reakční vrstvou je mezifázová tranzitní zóna, která se nachází mezi čerstvým a zatuhlým betonem. Tato zóna obsahuje mnoho pórů a vyšší obsah  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a krystalických jehlic ettringitu. Výskyt pórů je způsoben orientací jehlic ettringitu kolmo na povrch staršího zatuhlého betonu. Tato zóna je slabší než reakční vrstva. [3]



Obrázek 3: Krystaly ettringitu v betonové směsi [4]

Jak je známo, čerstvý beton obsahuje aktivní ionty, jako jsou  $\text{Al}_3^{3+}$ ,  $\text{Ca}_2^{2+}$ ,  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  a  $\text{SO}_4^{2-}$ . Tyto aktivity pronikají do pórů staršího betonu a reagují s nehydratovaným cementem. Vznik propustné vrstvy nastává, když se aktivní ionty dostanou do pórů betonu. Rozsah propustné vrstvy závisí na receptuře použité u betonových vrstev. Dále je spojen s porézností staršího betonu, kde existuje přímá úměra mezi porézností a velikostí propustné vrstvy. Větší vodní poměr zvyšuje propustnost. Mezifázová tranzitní zóna je bohatá na chemické produkty, jako je  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a ettringit, a má mnoho pórů. Beton je hydrofilní materiál, což způsobuje tok vody směrem ke staršímu betonu a zvyšuje tak vodní poměr a pórovitost. Stáří zatuhlého betonu je dalším faktorem ovlivňujícím mezifázovou zónu. Velikost mezifázové zóny silně ovlivňuje kvalitu betonového spoje, kde menší zóna znamená vyšší kvalitu spoje. [5]

Podle informací uvedených výše je zřejmé, že klíčovým faktorem pro spojení betonových vrstev je mechanická adheze. Je důležité, jak je upravena spára mezi zralým betonem v daném spoji a jak dobře se cementová pasta přilne k této spáře, která funguje jako lepidlo.

### 1.1.2 Tření mezi vrstvami betonu ve styku

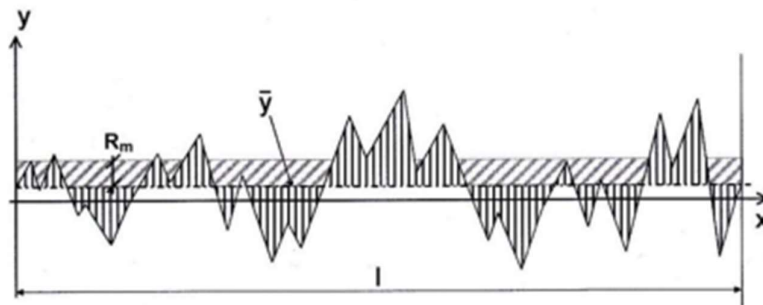
Na spojení betonových vrstev mohou působit různé druhy zatížení. Je důležité, aby se tato zatížení přenášela přímo mezi betonovými vrstvami. Když se zatížení projevuje ve směru rovnoběžném s rozhraním vrstev, vznikají smykové síly. Tlakové síly působící kolmo na rozhraní mohou vyvolat smykový třecí mechanismus v závislosti na drsnosti povrchu. Výztuž a smykové trny mohou nepřímo způsobit toto zatížení, protože smykové napětí může uvolnit spoje výztuže s betonem. [6]

Vzhledem k intenzitě vazby, hrubosti rozhraní a úrovni zesílení spoje ovlivňuje celkově přenos zatížení buď soudržností nebo smykovým třením. Můžeme tedy identifikovat tyto dvě situace:

- silný adhezní spoj-tuhý spoj – adhezní vazba je primárním mechanismem, který odolává působení zatížení
- slabý adhezní spoj-netuhý spoj – primárním mechanismem odolávající zatížením jsou smykové tření a případná výztuž na rozhraní spáry [6]

### 1.1.3 Vliv drsnosti spáry na adhezi betonových vrstev

Je potřeba popsat hrubost betonového povrchu. Existuje několik způsobů, jak charakterizovat a měřit hrubost betonových povrchů. Nejjednodušším a nejčastěji používaným parametrem je průměrná aritmetická odchylka  $R_m$ , která vyjadřuje průměrnou odchylku od osy. Určuje se jako průměrná hodnota výšky profilu po určité délce měřeného úseku. Čím vyšší je průměrná odchylka, tím je mechanické spojení účinnější a betonová spojení má lepší mechanické vlastnosti. [2]



Obrázek 4: Drsnost povrchu,  $l$ -délka úseku,  $R_m$ -průměrná odchylka,  $y$ -absolutní odchylka [6]

Cementové mléko, známé také jako cementová pasta, na povrchu prvku v oblasti krycí vrstvy, by mělo být před kontaktem s novou betonovou vrstvou odstraněno nebo upraveno pro zhrubnutí povrchu. Existuje několik způsobů, jak povrch upravit. Jednou z

možností je použití drátěného kartáče nebo pískování. Tyto postupy jsou jemné a nemají negativní vliv na zbytkové vlastnosti betonové konstrukce. Alternativně lze použít mechanické kladivo pro vytvoření drsnějšího povrchu, avšak tato metoda může kvůli rázům poškodit okolní konstrukci a vyvolat nežádoucí mikrotrhliny v prvcích. [6]

Další možností je zhrubnutí povrchu manuálním kladivem nebo čištěním tlakovou vodou. Tato metoda je náročná, zejména pokud je betonový prvek již zpevněný a dosahuje požadované pevnosti. Doporučuje se provést zhrubnutí povrchu poté, co betonová konstrukce ztuhne, ale ještě není příliš tvrdá. Obvykle se doporučuje tuto úpravu povrchu provést druhý den po zalití, ale časování může být ovlivněno různými faktory, které ovlivňují tuhnutí betonové směsi. Oproti pískování nebo využití drátěného kartáče jsou dané varianty lépe proveditelné v železobetonových prvcích.

Mechanické blokování, konkrétně smykový zámek, má největší vliv na spojení betonových vrstev. Tato technika blokuje síly a zlepšuje mechanické vlastnosti spoje. [7]



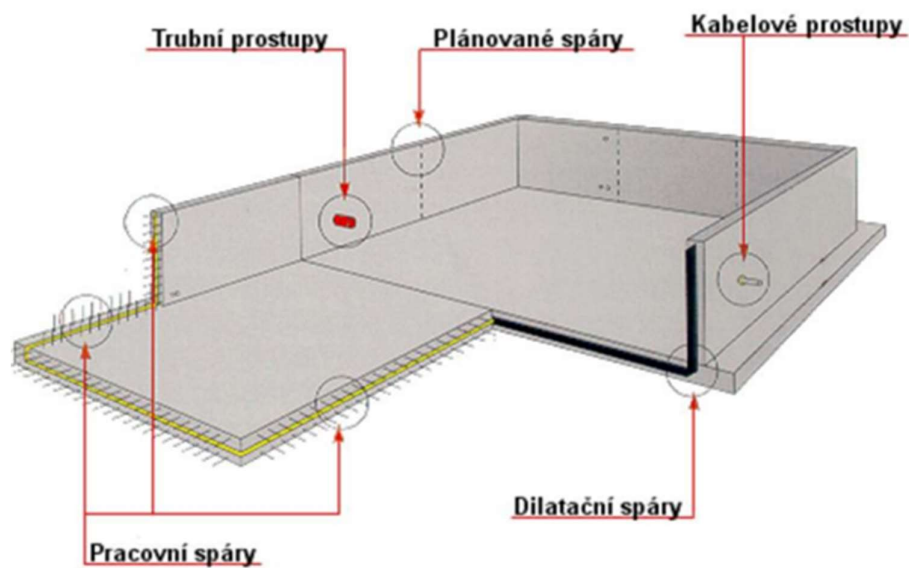
*Obrázek 5: Zdrsňený základový pás pneumatickým kladivem, vlastní zpracování*

## 1.2 Spáry v betonových konstrukcích

Komplikované a rozsáhlé konstrukce z betonu nebo železobetonu nelze výrobně realizovat v jediném záběru betonáže. Je nezbytné propojovat jednotlivé části konstrukce podle plánovaného projektu tak, aby vyhovovaly statickým a funkčním požadavkům. Dále je důležité brát v úvahu reologické a fyzikální vlastnosti betonu: jeho smrštění, dotvarování a tepelnou roztažnost. Spáry umožňují rozdělit betonové konstrukce na oddělené úseky, což je optimální z hlediska realizace a statického chování konstrukce.

Spáry dělíme především na:

- Pracovní spáry
- Dilatační spáry
- Řízené spáry



Obrázek 6: Typy spár a prostupů v betonové konstrukci [8]

Jednotlivé spáry mají své vlastnosti a požadavky závislé na charakteru dané betonové konstrukce.

Dilatační spáry jsou důmyslně umístěny v konstrukci s cílem zabránit poškození materiálu a umožnit volné pohyby prvků vlivem různých faktorů, jako je změna objemu, teplota nebo nerovnoměrné usazování. Rozdělení stavby svislými dilatačními spárami na menší celky je nezbytné pro minimalizaci vnitřních napětí. Pokud jsou tyto spáry umístěny pouze v horní části, umožňují pouze pohyb vlivem změn objemu betonu.

Naopak svislá dilatační spára, která prochází celou stavbou, umožňuje pohyb způsobený změnami objemu a nerovnoměrným usazováním základů. [9]

Řízené spáry ve stěnách vodotěsných betonových struktur, známé také jako jalové spáry, mají za úkol oslabit průřez stěny s cílem prodloužit délku pracovních záběrů monolitických stěn a řídit, kde se konstrukce poruší kvůli změnám v objemu betonu. Navržené mezery mají zabránit pronikání vody nejkratší možnou cestou. Voda je nucena obejít instalovanou záchytnou lištu a proniknout do neporušeného vodotěsného betonu, který svou tloušťkou dokáže zastavit pronikání vody skrz konstrukci. Nicméně není zaručeno, že bude výztuž chráněna před koroze v oblasti těchto řízených spárách.

Dále se nebude o dilatačních a řízených spárách pojednávat, jelikož v samotném návrhu není vyžadováno spolehlivé spolupůsobení betonových vrstev.

Pracovní spáry jsou nezbytné v rámci technologických procesů a odstavek. Je důležité, aby tato spára neohrozila integritu konstrukce a aby efektivně bránila pohybům prvků, jak je stanoveno v projekční dokumentaci a statických výpočtech. Dilatační spára musí procházet nosnou i konstrukční výztuží a dalšími klíčovými prvky obsaženými v železobetonové konstrukci.

Je nezbytné, aby pracovní spáry splňovaly požadavky stanovené pro železobetonovou monolitickou konstrukci. Existují situace, kdy přerušení konstrukce není schopno zachovat vlastnosti betonové směsi, zejména u vodonepropustných železobetonových monolitických konstrukcí.

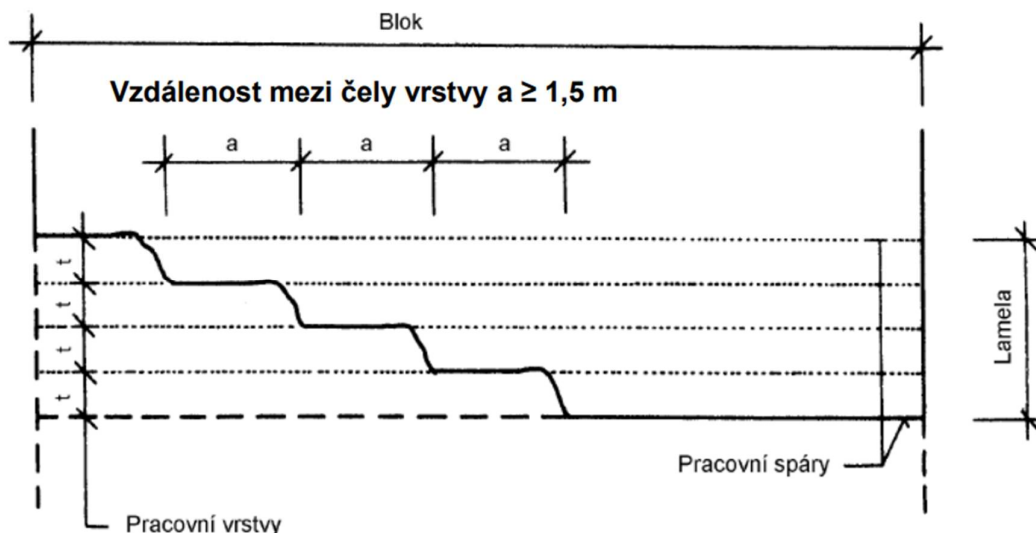
Pracovní spáry by měly být umístěny v oblastech s minimálním namáháním a je snahou, aby přenášely především tlakové síly. Stanovení modulu pružnosti betonu je obtížné a hodnota betonové směsi se často odhaduje. Projektanti předpokládají nedokonalou realizaci pracovních spár, a proto je obvyklé umisťovat je do míst s nižším rizikem trhlin a minimálním zatížením konstrukce.

Při měření tuhnutí betonu podle ČSN 73 1332 je penetrace 0,5 MPa spojena s časem, kdy je vhodné betonovou směs dopravit a zpracovat. Penetrace dosahující 3,5 MPa značí dobu, kdy je spojení dvou vrstev čerstvého betonu zajištěno bez vzniku pracovní spáry. [10]

### 1.2.1 Pracovní spáry v masivních betonových konstrukcích

Jednotlivé technické normy a dokumenty (ČSN 73 1209, ŘSD TKP 18, TP ČBS 02) nemají jednotnou definici masivních betonových konstrukcí, avšak obecně se považuje, že masivní konstrukce má šířku přesahující jeden metr. Při výstavbě těchto konstrukcí je důležité brát v potaz vysoký teplotní rozdíl mezi středem a povrchem stavby, který je výsledkem nadměrného tepla uvolňovaného během hydratace betonu. Když teplota v jádru konstrukce dosáhne vyšší úrovně (přibližně 65–70 °C), dochází k opožděné tvorbě ettringitu a vnitřní napětí v betonové konstrukci se značně zvyšuje. To může vést k trhlinám v důsledku tahových sil. Podobné problémy mohou nastat při dosažení kritického teplotního rozdílu 20 °C mezi středem a povrchem konstrukce. Teplotní rozdíl tedy představuje rozdíl teplot mezi nejteplejším a nejchladnějším místem betonové stavby. [11]

Snížení hydratačního tepla lze dosáhnout vícero způsoby a je doporučeno provádět kombinaci daných opatření. Mezi ty nejzásadnější patří optimální receptura betonu, chlazení betonových složek nebo samotné receptury během výroby a dopravy. Dále je důležité dodržet správný pracovní postup a masivní konstrukci rozdělit optimálně na dilatační celky, a také dodržet umístění smršťovacích pruhů a pracovních spár dělené na lamely. Po betonáži je také možné konstrukci chladit chladicí kapalinou v zabudovaných trubkách nebo naopak ohřívat konstrukci topnými tělesy. Vliv má i správný čas odbednění konstrukce. Ke správnému pracovnímu postupu mohou pomoci teplotní čidla. [11]



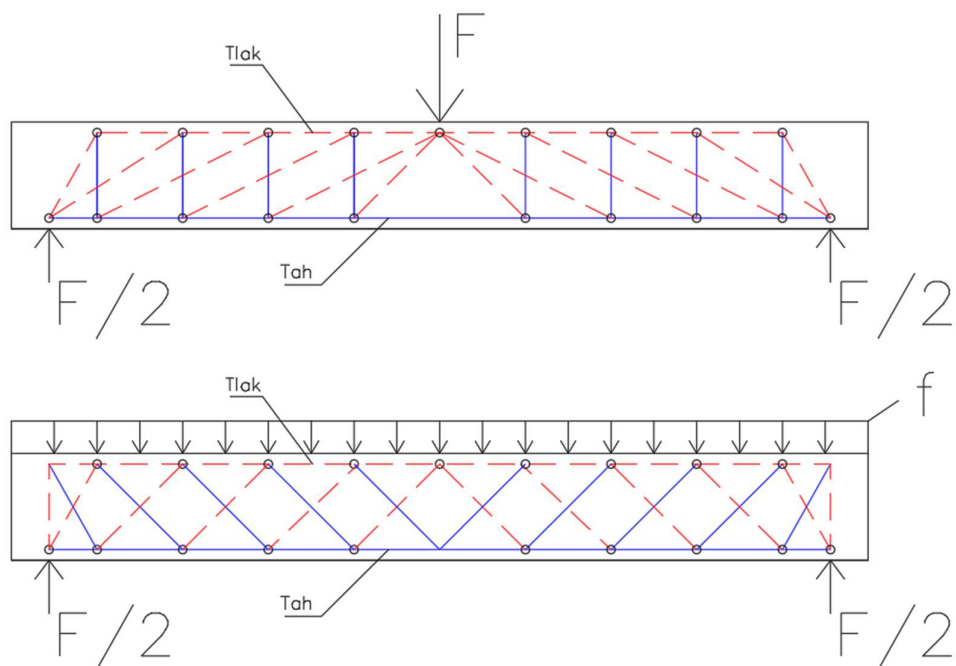
Obrázek 7: Schéma betonáže odstávky pracovního záběru masivní betonové konstrukce [11]

Při realizaci masivních betonových konstrukcí je klíčové dodržovat postup betonování jednotlivých bloků podle technologických předpisů. Doporučený časový interval mezi bloky by měl být kolem 3-7 dní. Pro eliminaci nutnosti dodržovat takový časový odstup mezi betonážemi se doporučuje použít tzv. šachovnicového betonování, kdy se betonuje každý druhý blok a následně se vrátit k neprobetonovaným částem. Výška povolené betonované vrstvy se stanovuje v závislosti na teplotách při betonování, buď v letních nebo zimních měsících. V létě se doporučuje dodržovat 2m vysoké vrstvy a v zimě 3m. Existuje také možnost matematického výpočtu pro stanovení vyšší výšky betonované vrstvy. Vrstvy by měly být betonovány po úsecích o tloušťce 300-500 mm, které je třeba řádně zhutnit před zahájením další vrstvy betonu. Po dokončení pracovního bloku je vhodné postupně odstupňovat jednotlivé vrstvy po délce větší než 1,5 m (viz obr. 7). [11]

### 1.2.2 Pracovní spáry ve vodorovných monolitických konstrukcích

Při realizaci horizontálních konstrukcí jsou klíčové požadavky na plánování a provedení pracovních spár. Tyto konstrukce jsou důkladně zkoumány ve vztahu k limitnímu stavu použitelnosti, kde je kladen důraz na průhyb a trhliny v konstrukci. V praxi je preferováno, aby pracovní spáry v železobetonových deskách, průvlacích a dalších vodorovných konstrukcích vznikaly pouze v nezbytných situacích. Avšak pracovní spáry jsou nedílnou součástí výstavby betonových konstrukcí. Projektanti se snaží umístit spáry do oblastí s minimálními ohybovými momenty a smykovými silami.[12]





Obrázek 8: Příhradová analogie toku tlakového a tahového napětí na prostém nosníku od zatížení [12]

Při pochopení směru toku napětí v daném prvku je možné navrhnout řez konstrukce kolmý k působení tlakového napětí. Navržením pracovní spáry do vhodného řezu je zajištěno minimalizování tahových sil působících kolmo na spáru. Tlakové působení na pracovní spáru významně snižuje nedostatky spojené s přerušением monolitické betonové konstrukce. Pro zaručení spolehlivosti uvedených informací je klíčové dodržovat vysoké standardy při provádění pracovní spáry. Ačkoli není doporučeno umisťovat pracovní spáry do oblastí s maximálním ohybovým momentem v betonovém prvku, je důležité zajistit větší flexibilitu při určení umístění pracovních spár. [12]



Obrázek 9: Betonovaná pracovní spára stropní desky [12]



Na ilustraci číslo 9 je znázorněna betonáž pracovní spáry ve stropní desce umístěné v oblasti s minimálním ohybovým momentem. K zhrubnutí pracovní spáry byl v první fázi betonáže použit B-systém. Před nalitím betonu byla pracovní spára důkladně vyčištěna. Žádná další technologická opatření nebyla v dané pracovní spáře provedena. [12]

Dle častých poučekách v technologickém postupu by měla být pracovní spára zkosena pod úhlem  $45^\circ - 60^\circ$  tedy kolmo k tlačené diagonále vnitřních sil.

Dříve se dřevěná prkna používaly k bednění pracovních spár, aby mohly absorbovat vzduchové bubliny během tuhnutí betonu. Dnes je běžné používat tahokov, který propouští pouze cementové mléko a vytváří hrubou povrchovou vrstvu. [12]



Obrázek 10: Pracovní spára základového pasu [12]

Během realizace horizontálních konstrukcí s hydroizolačními vlastnostmi je klíčové udržet integritu přerušené konstrukce. Díky instalaci těsnicího prvku typu ABS je pracovní spára oslabena a může dojít k vzniku trhliny. Těsnicí plech však zabraňuje proniknutí tlačené vody skrz spáru. Voda je nucena proudit kolem plechu skrz celistvý beton, který je navržen tak, aby odolal daným tlakům vody. Proto je doporučeno, aby byla spára v těchto konstrukcích provedena kolmo k povrchu, což zajistí funkčnost těsnicího opatření. [12]



*Obrázek 11: Pracovní spára v základové desce s vodonepropustnými vlastnostmi [12]*

### 1.2.3 Spolupůsobení prefabrikovaných a monolitických prvků

Při spojování prefabrikovaných prvků se často využívá svařování ocelových bodových spojů, které přenášejí veškeré zatížení a zbývající mezery jsou následně vyplněny cementovou maltou. Alternativně lze prvky spojit cementovou maltou nebo betonem s odpovídající pevnostní třídou, čímž se zajistí integrita a vzájemná spolupráce celé konstrukce.



*Obrázek 12: Betonování spár mezi prefabrikovanými prvky*

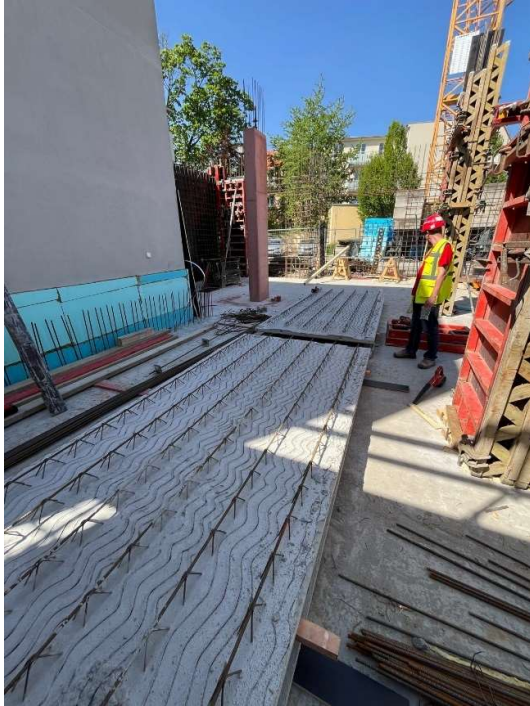
Příkladem je také uložení prefabrikovaného sloupu na základovou patku. Aby jednotlivé prvky spolupůsobily a tvořily prostorově tuhou konstrukci, je třeba vytvořit v základové patce prostor kuželovitěho tvaru, do kterého se následně uloží a zaklíní prefabrikovaný sloup. Poté proběhne betonáž zbylého prostoru mezi patou sloupu a základovou patkou. Zdrsnění paty sloupu je tvořené již při výrobě pomocí prostorové folie jako je například nopová nebo bublinková folie. [12]



*Obrázek 13: Uložení a zabetonování prefabrikovaného sloupu do základové patky*

Dalším případem mohou být filigránové stěny nebo stropní desky. Spolupůsobení betonových vrstev různého stáří je zajištěno prostorovou úpravou betonového povrchu a ocelovými žebříčky nebo smykovými trny, které jsou zakotveny do obou vrstev betonové konstrukce. Viz obr 14.





Obrázek 14: Filigránová stěna

## 2 Experimentální část

Účelem dané laboratorní zkoušky, bylo získat povědomí, jak se ve skutečnosti chová spojení dvou odlišně starých směsí betonu. Tedy simulace pracovních spár v betonových konstrukcích. Především vzniká nejasnost chování pracovních spár v tažených a ohýbaných betonových konstrukcích. Zkouška se tedy skládala ze vzorků s rozličným tvarem a provedením pracovní spáry, aby se daly výsledky a způsob porušení porovnat s referenčními vzorky monolitického betonového prvku. Fotodokumentace z experimentu je obsažena v Příloze k diplomové práci.

### 2.1 Popis zkoušky

Nejprve byly navrženy typy pracovních spár zabudovaných do vzorků. Každý typ vzorku byl proveden třikrát. Pracovní spára měla stáří 7 dnů následně se vzorky dobetonovaly. Provádění jednotlivých vzorků je popsáno níže viz kapitola 1.2 *Popis prováděných vzorků*. Po uběhnutí 28 dní od odlití vzorků do forem byly vzorky zkoušeny destruktivní metodou. Určila se krychelná pevnost betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3. Dále se určila pevnost betonu v tahu za ohybu všech navržených a provedených vzorků dle ČSN EN 12390-5. Destruktivní zkouška byla prováděna čtyřbodovým ohybem ve zkušebním lisu.

Výsledky se zapsaly a následně porovnály. Cílem zkoušky bylo porovnat vlastnosti vzorků s pracovní spárou a referenčního vzorku.

## 2.2 Popis provádění vzorků

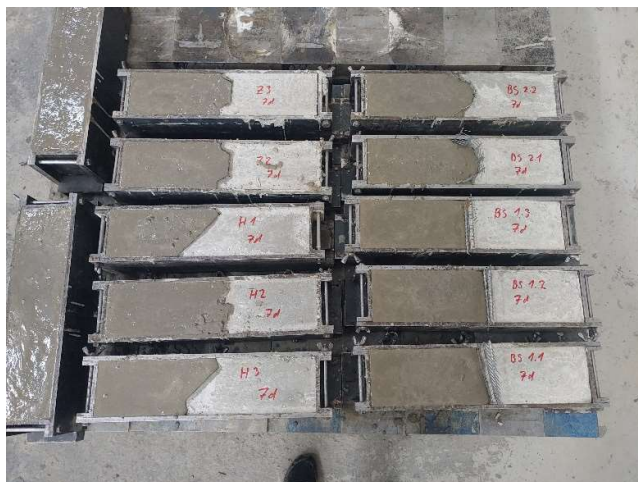
Betonové vzorky byly betonovány v ocelové formě 400 x 100 x 100 mm. V polovině byly vzorky zabetonovány dle typu navržené pracovní spáry. Každý typ pracovní spáry byl zhotoven na třech vzorcích. Dále byly zhotoveny 3 referenční vzorky bez pracovní spáry a 3 vzorky ve tvaru krychle o rozměrech 150 x 150 x 150 mm pro určení krychelné pevnosti betonu v tlaku. Po zabetonování celých vzorků byly následující den odbedněny a uskladněny po dobu 28 dní.

Průběh zhotovení vzorků:

- I. Instalace bednění do ocelových forem
- II. Nanesení odbedňovacího oleje na formu
- III. Betonáž první poloviny všech vzorků s pracovní spárou a betonáž krychelných vzorků
- IV. 7 denní interval
- V. Odbednění vzorků (B – systém se neodstraňuje)
- VI. Zčištění formy od cementového mléka
- VII. Nanesení odbedňovacího oleje na zbytek formy
- VIII. Betonáž druhé poloviny všech vzorků s pracovní spárou a celých referenčních vzorků
- IX. 28 dní mezi betonáží a zkoušením vzorků



Obrázek 15: Instalované bednění a betonáž první poloviny každého vzorku s pracovní spárou



Obrázek 16: Betonáž druhé poloviny každého vzorku s pracovní spárou

## 2.3 Přehled vzorků

Jednotlivé vzorky s pracovními spárami byly inspirovány dle užívaných tvarů a materiálu při provádění pracovních spár v železobetonových konstrukcích. Účelem bylo napodobit dané spáry v experimentu co nejpřesněji k reálným spárám prováděných v praxi. Všechny pracovní spáry byly instalovány v polovině zkušebních vzorků.

### 2.3.1 Referenční vzorek (REF)

Referenční vzorek byl zabetonován jako monolitický prvek bez žádné pracovní spáry. Sloužil k určení materiálových vlastností betonu, který byl použit při daných zkouškách. Také byl potřebný k porovnání vlastností zbylých vzorků s vlastnostmi neporušeného betonu pracovními spárami. Referenční vzorek byl dále popisován zkratkou REF.

### 2.3.2 Vzorek se svislou spárou s využitím tahokovu (BS 1)

Vzorek byl přerušen ocelovou tkaninou jménem B-systém. Ocelová tkanina přerušila vzorek v polovině své délky svislým směrem. Viz Příloha (kap. 2.1). Vzorek byl pojmenován BS 1.

### 2.3.3 Vzorek s vyboulenou pracovní spárou s využitím tahokovu (BS 2)

Vzorek byl přerušen B-systémem, který byl v jednom směru vyboulen. Cílem je simulovat nedostatečně upevněný B-systém k výztuži. Během betonáže tlak betonové směsi tímto způsobem prohnul tahokov a vznikla parabolická pracovní spára. Viz Příloha (kap. 2.2). Vzorek byl pojmenován BS 2.

#### 2.3.4 Vzorek s šikmou pracovní spárou pod úhlem 45° B-systém (BS 3)

Vzorek byl přerušen ocelovou tkaninou stejného typu jako vzorky BS 1 a BS 2. Pracovní spára byla vychýlena od svislého směru o 45°. Simuluje tak pracovní spáry běžně používané ve skutečných vodorovných konstrukcích, které se z pravidla předepisují v 1/4 až 1/3 rozponu betonovaného prvku. Viz Příloha (kap. 2.3). Vzorek byl dále popisován zkratkou BS 3.

#### 2.3.5 Vzorek s pracovní spárou ve tvaru zámku (Z)

Vzorek byl přerušen pracovní spárou ve tvaru takzvaného zámku, tedy spárou umístěnou svislým směrem se zalomeným geometrickým tvarem. Vzorky tohoto typu měli napodobit pracovní spáry v železobetonových vodě nepropustných konstrukcích. Cílem daného tvaru je prodloužit a ztížit cestu vodě, která se bude tlačit vytvořenou trhlinou v místě pracovní spáry. Spára je dále doplněna prvky využívané ve vodě nepropustných ŽB konstrukcích například bentonitové pásky nebo BK plechy. Tyto prvky nepřispívají k vlastnostem zkoušených v tomto experimentu, tudíž nebyly instalovány a zohledněny. Daná pracovní spára byla ve vzorku provedena bednicí překližkou v požadovaném tvaru viz Příloha (kap. 2.4). Vzorek byl dále popisován zkratkou Z.

#### 2.3.6 Vzorek s šikmou spárou tvořenou bednicí překližkou (H)

Vzorek byl uprostřed přerušen bednicí překližkou vychýlenou od svislého směru o 45° během betonáže první poloviny. Před betonáží zbytku vzorku je bednění odstraněno a vzorek je dobetonován. Cílem bylo vytvořit pracovní spáru s hladkým a suchým povrchem. Viz Příloha (kap. 2.5). Vzorek byl pojmenován zkratkou H.

#### 2.3.7 Vzorek s šikmou spárou mechanicky zdrsňenou (D)

Tento typ vzorku měl pracovní spáru stejné geometrie jako vzorek H. Rozdíl byl v úpravě pracovní spáry před betonáží druhé poloviny vzorku. Pracovní spára byla odbedněna a následně kladivem zdrsňena. Před betonáží zbylé části vzorku byla pracovní spára řádně navlhčena vodou za pomoci štětce. Viz Příloha (kap. 2.6). Vzorek byl dále pojmenován zkratkou D.



## 2.4 Receptura betonu

Betonová směs byla připravena v laboratorním míchačce s odnímatelným bubnem a čtyřmi míchacími lopatkami. Nejprve byly do bubnu uloženy všechny suché směsi v odměřených hmotnostech dle předepsaném složení betonu viz níže. Buben byl zajištěn do míchačky a suché směsi byly promíchány. Následně byla postupně přidávána voda a plastifikátor během míchání. Přesná vlhkost obsažena v kamenivu není známa, ale kamenivo bylo skladováno v suchém a otevřeném prostředí, uzpůsobené k samovolnému vysychání přebytečné vlhkosti.

Poměr betonové směsi je předepsán v níže uvedeném poměru:

- Portlandský cement (EN 197-1-CEM I 42,5 R)	- 28,8 %
- Voda	- 12,7 %
- Kamenivo 0/4	- 29,9 %
- Kamenivo 4/8	- 7,3 %
- Kamenivo 8/16	- 21,9 %
- Plastifikátor	- 0,278 %

## 2.5 Stanovení pevnosti betonu v tlaku

Z důvodu relevantního vyhodnocení výsledků pevnosti betonových vzorků v tahu za ohybu, bylo třeba také vyhodnotit pevnost použitého betonu v tlaku. Stanovení pevnosti betonu v tlaku bylo určeno za pomoci krychelné pevnosti destruktivní zkouškou tří těles dle ČSN EN 12390-3.

### 2.5.1 Postup zkoušky

Pevnost betonu v tlaku byla zkoušena na třech krychlích o rozměrech 150 x 150 x 150 mm, které byly odlity během první betonáže vzorků s pracovními spárami. Krychle se změřily a zvažily. Následně se vložily do lisu a elektronicky se zaznamenávaly výsledky. Pomocí rozměrů získaných z měření a hodnoty maximální síly při porušení vzorků z lisu se vypočítala pevnost betonu v tlaku.

### 2.5.2 Použité pomůcky

Pro uskutečnění zkoušky byl využit zkušební lis, počítač, posuvné měřítko a váha.

### 2.5.3 Výsledky

Výsledky destruktivní zkoušky pro získání krychelné pevnosti betonu v tlaku byly popsány v tabulce 1.

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b>  <b>FAKULTA STAVEBNÍ</b>            Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel: 224 954 627, fax: 224 954 446, e-mail: k133@fsv.cvut.cz  <b>ODBORNÁ LABORATOR KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ</b> </div> </div>																	
<b>Zpráva o zkoušce</b>												ze dne: 12.05.23			Číslo protokolu : PT_doprava1/2022		
Zákazník :												Pořadované číslo :			Poznámka :		
Akce :																	
Výsledky laboratorních zkoušek																	
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa	Objem. hmot.	Datum		Stáří vzorku	Tah za ohybu		Tlak		Příčný tah		Poznámka ke zkoušce	
		Šířka	Výška	Délka			výroby	zkoušky		dny	dny	síla	pevnost	síla	pevnost		síla
		mm	mm	mm	g	kg/m <sup>3</sup>	d.m.r.	d.m.r.	dny	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa		
1	spoje	148,5	149,2	149,1	7799,3	2362	13.04.23	12.05.23	29			1124,12	50,8				
2	spoje	149,4	149,2	149,2	7727,6	2323	13.04.23	12.05.23	29			970,57	43,6				
3	spoje	149,2	149,3	149,2	7725,6	2325	13.04.23	12.05.23	29			1073,37	48,2				
Typ zkoušky : Tlak Druh vzorku : Krychle 150x150x150 Teplota : 22 °C Relativní vlhkost : 38%																	
Zkoušel : doc. Ing. Josef Fiadr, Ph.D. Vypracoval : doc. Ing. Josef Fiadr, Ph.D. Vedoucí laboratoře : doc. Ing. Josef Fiadr, Ph.D. Kontroloval : doc. Ing. Josef Fiadr, Ph.D.																	
Podpis : Podpis : Podpis : Podpis :																	

Tabulka 1: Výsledky krychelné pevnosti betonu v tlaku

#### 2.5.4 Určení pevnostní třídy betonu

Dle přílohy D normy ČSN EN 1990 by se měly výsledky zkoušek vyhodnotit na základě statistických metod, které využijí dostupné informace o typu rozdělení. Při provádění řady zkoušek pro odhad vlastností výrobku, jako je jeho odolnost nebo vlastnost, která přispívá k odolnosti výrobku, je možné využít metody klasického statistického hodnocení. V následující praktické úloze je vyšetřována pevnost betonu v tlaku  $f_c$ . Tato řešená vlastnost betonu je stanovena jako charakteristická hodnota definovaná 5 % kvantilem. Je uvažováno, že soubor má normální rozdělení. Je tedy splněn předpoklad v příloze D ČSN EN 1990, že vyšetřovaná veličina má normální nebo lognormální rozdělení. [13]

Průměrná hodnota byla stanovena ze zkoušek dle vztahu (1). [13]

$$f_{m(n),is} = \frac{1}{n} \sum_n f_{is,i} \quad (1)$$

Rozlišují se případy, kde je variační koeficient známý nebo neznámý. V případě neznámého koeficientu  $V$  byla vypočtena dle vzorce (2). [13]

$$V = \frac{s}{f_{m(n),is}} \quad (2)$$

Kde  $s$  je výběrová směrodatná odchylka stanovená z výsledků zkoušek.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (f_{is,i} - f_{m(n),is})^2} \quad (3)$$

Dle přílohy D ČSN EN 1990 lze charakteristickou hodnotu pevnosti betonu v tlaku  $f_{ck}$  danou z výsledků  $n$  zkoušek určit předpovědní metodou vzorcem (4), kde  $k_n$  je součinitel závislý na počtu zkoušek  $n$  a pravděpodobnosti, které odpovídá hledaný kvantil viz tab. 2.

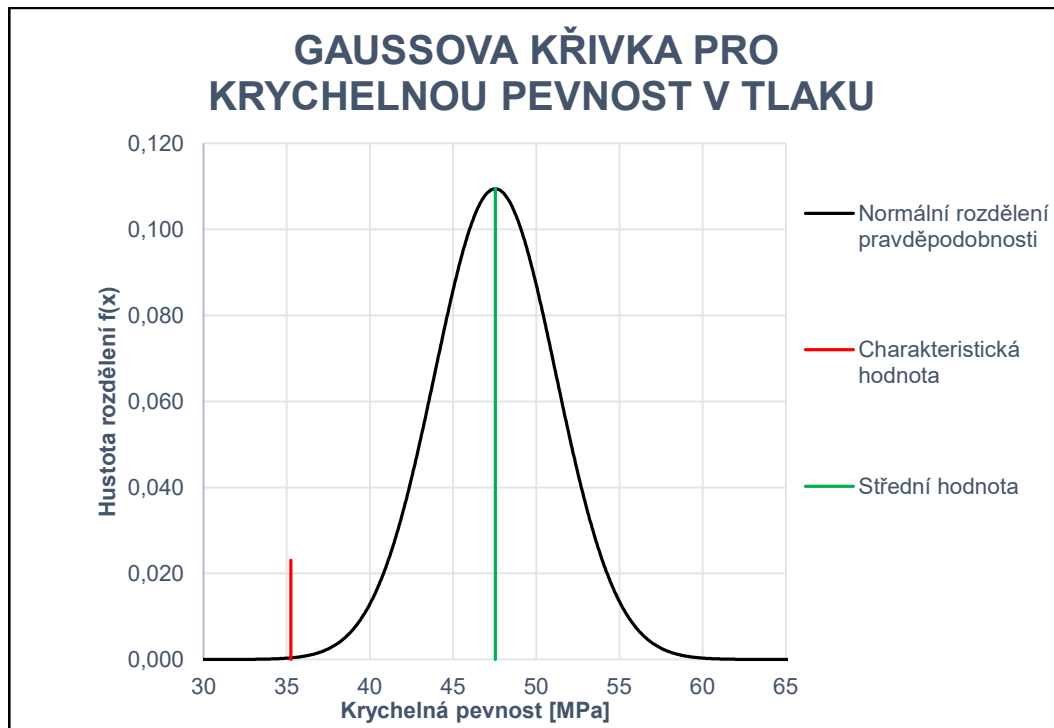
$n$	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$V_x$ známý	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
$V_x$ neznámý	–	–	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Tabulka 2: Hodnoty součinitele  $k_n$  pro 5% kvantil [14]

Výsledná pevnostní třída použitého betonu byla získána z vypočtené charakteristické pevnosti krychelné pevnosti v tlaku. Při stanovení charakteristické hodnoty bylo využita metoda Gaussovy křivky normálního rozdělení pravděpodobnosti závislé na hustotě rozdělení naměřených vzorků a jejich pevnosti (obr. 3). Charakteristická hodnota krychelné pevnosti byla spočtena pomocí vzorců a vypočtených hodnot (tab. 3). Variační koeficient byl neznámý, tudíž byl vypočten dle vzorce (2). Součinitel  $k_n$  byl určen dle tab. 2, kde hodnota 3,37 odpovídá tři provedených zkoušek za předpokladu neznámého variačního koeficientu. Pevnostní třída použitého betonu v experimentu byla stanovena C25/30.

Hodnoty naměřených vzorků				
1. krychle [MPa]	2. krychle [MPa]	3. krychle [MPa]		
50,8	43,6	48,2		
Veličina	Symbol	Hodnota	Vzorce	
Střední hodnota [MPa]	$f_{cube,m}$	47,53	$f_{cube,m} = 1/n \times \sum f_i$	
Směrodatná odchylka [MPa]	$\sigma$ (S)	3,65	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (f_i - f_m)^2}$	
Neznámý variační koeficient	$V_x$	0,077		
Součinitel $k_n$	$k_n$	3,37	$V = \sigma / f_{cube,m}$	
Charakteristická hodnota [MPa]	$f_{cube,k}$	35,25		
Pevnostní třída C25/30			$f_{cube,k} = f_{cube,m} \times (1 - k_n \times V)$	

Tabulka 3: Určení pevnostní třídy betonu



Obrázek 17: Krychelná pevnost v tlaku

## 2.6 Stanovení betonu v tahu za ohybu

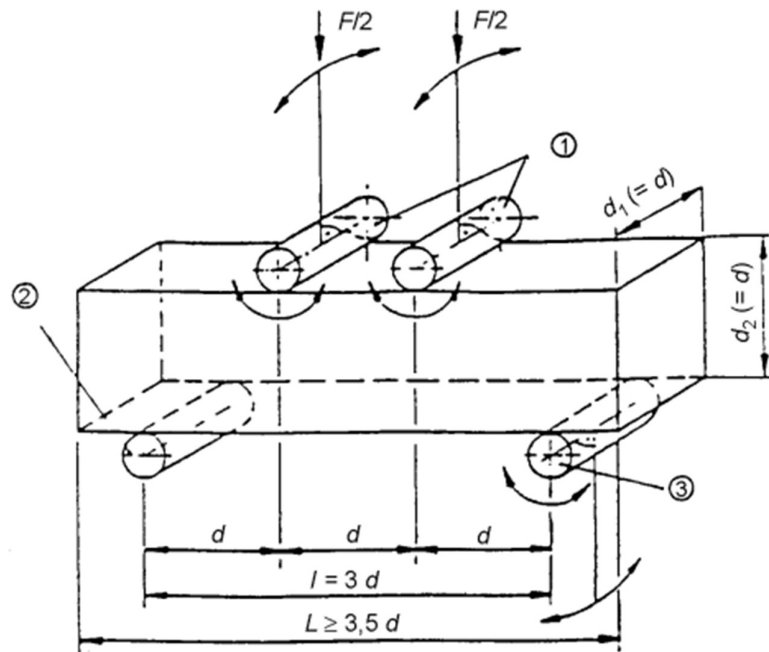
### 2.6.1 Postup zkoušky

Pevnost betonu v tahu za ohybu byla zkoušena na trámcích o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Každý trámec byl změřen posuvným měřítkem a zvážen. Hodnoty byly zapsány. Následně byl každý vzorek začištěn a vložen centricky do zkušební lisu tak, aby směr zatěžování vzorku byl kolmý směru ukládání betonu do formy. Na vzorek bylo umístěno čidlo přesně mezi horní zatěžovací válce, tedy v polovině trámce. Čidlo zaznamenávalo průhyb vzorku během zatěžování. Po správném uložení vzorku do lisu byly zadány všechny potřebné hodnoty do programu. Po spuštění zatěžování trámku zkušebním lisem program zaznamenal maximální zatěžovací sílu působící na vzorek. Následně díky vstupním hodnotám program spočítal pevnost betonu v tahu za čtyřbodového ohybu níže uvedeném vzorcem (4).

$$f_{ct,fl} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_2^2} \quad (4)$$

kde je

$f_{ct,fl}$  pevnost v tahu ohybem v MPa  
 $F$  maximální zatížení v N  
 $l$  vzdálenost mezi podpěrnými válečky v mm (300 mm)  
 $d_1$  a  $d_2$  rozměry příčného řezu trámce v mm [15]



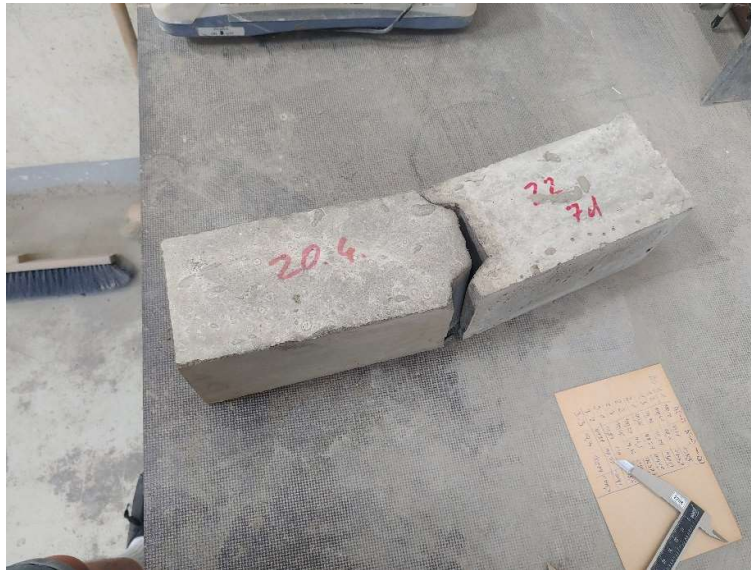
Obrázek 18: Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa dvěma břemeny [15]

### 2.6.2 Použité pomůcky

Pro uskutečnění zkoušky byl využit zkušební lis, počítač, posuvné měřítko a váha.



### 2.6.3 Neplatné vzorky

Při odbedňování vzorků se rozpadl vzorek v pracovní spáře vzorek číslo Z2. Tento náhlý rozpad vzorku bez značného zatížení naznačovalo, že typ pracovní spáry Z mohl vykazovat zanedbatelnou pevnost v tahu. Uvažována pevnost pracovní spáry byla ve výsledcích uvažována 0 MPa.



## 2.6.4 Výsledky zkoušky

Výsledky zkoušky byly zaznamenány do ucelené tabulky se všemi relevantními vstupními vlastnostmi vzorků (tab. 4). Pro názorný přehled pevností v tahu ohybem u jednotlivých vzorků a jejich rozdílné hodnoty je přiložen sloupcový graf vzorků v závislosti na pevnosti v tahu v MPa (obr. 5).

 <b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b> <b>FAKULTA STAVEBNÍ</b> Thákurova 7, 166 28 PRAHA - 6, tel: 224 354 627, fax: 224 354 446, email: k133@fsv.cvut.cz <b>ODBOŘNÁ LABORATOŘ KATEDRY BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ</b> 																	
Zpráva o zkoušce			ze dne: 18.05.23						Číslo protokolu : PO_spoje1/2022								
Zákazník :			Pořadové číslo :						Poznámka :								
Akce :			Výsledky laboratorních zkoušek														
Číslo vzorku	Ozn. tělesa	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m <sup>3</sup>	Datum		Stáří vzorku dny	Tah za ohybu		Tlak		Příčný tah		Poznámka ke zkoušce	
		Délka mm	Šířka mm	Výška mm			výroby d.m.r.	zkoušky d.m.r.		síla kN	pevnost MPa	síla kN	pevnost MPa	síla kN	pevnost MPa		
1	BS1	99,6	100,1	400,0	9386,5	2353				6,42	1,9						
2	BS1	99,6	100,1	400,0	9386,5	2353				5,61	1,7						
3	BS1	99,6	100,1	400,0	9386,5	2353				7,40	2,2						
1	BS2	97,3	99,7	400,0	9161,9	2362				12,58	3,9						
2	BS2	99,6	100,3	400,0	9437,9	2363				15,81	4,7						
3	BS2	99,3	100,5	400,0	9381,8	2351				11,92	3,6						
1	BSS	100,0	99,9	400,0	9435,5	2361				1,34	0,4						
2	BSS	98,77	99,81	400,0	9209,1	2335				6,54	2,0						
3	BSS	100,8	99,7	400,0	9256,7	2302				6,02	1,8						
1	Z	98,9	100,3	400,0	9376,4	2363				4,65	1,4						
3	Z	97,3	100,2	400,0	9288,4	2381				2,07	0,6						
1	H	97,1	99,8	400,0	9146,9	2361				1,96	0,6						
2	H	99,1	100,6	400,0	9387,9	2355				3,78	1,1						
3	H	97,7	100,0	400,0	9162,8	2345				0,54	0,2						
1	D	100,4	100,0	400,0	9369,9	2332				1,63	0,5						
2	D	98,8	100,2	400,0	9371,0	2368				1,85	0,6						
3	D	98,6	99,9	400,0	9105,9	2310				1,75	0,5						
1	REF	99,5	99,7	400,0	9233,8	2325				15,74	4,8						
2	REF	101,7	100,6	400,0	9639,4	2356				18,16	5,3						
3	REF	99,6	99,9	400,0	9540,2	2396				19,38	5,8						

Typ zkoušky	: Tah za ohybu 4B	Zkoušel	: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.	Podpis	:
Druh vzorku	: Trámeč 100x100x400	Vypracoval	: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.	Podpis	:
Teplota	: 22 °C	Vedoucí laboratoře	: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.	Podpis	:
Relativní vlhkost	: 38%	Kontroloval	: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.	Podpis	:

Tabulka 4: Výsledky laboratorních zkoušek



Obrázek 19: Pevnost v tahu za ohybu vzorků v MPa

## 2.7 Vyhodnocení experimentální části

Výsledky ukázaly, že všechny vzorky s instalovanou pracovní spárou nedosahovaly pevnosti v tahu referenčních celistvých betonových vzorků. Byly tu však viditelné rozdíly ve vlastnostech a způsobu porušení jednotlivých vzorků.

Dle ČSN EN 13670 by se pracovní spáry neměly provádět v kritických místech a v době betonáže má být teplota pracovní spáry vyšší než 0 °C. Dále je v uvedené normě v příloze A doporučení stanovit v prováděcí dokumentaci požadavky na konstrukční spáry, pokud je to důležité.

Zkoušené pracovní spáry dle experimentu nedosáhly pevnosti nepřerušovaných betonových vzorků. Je tedy nutné se pracovní spárou vyhýbat kritickým místem v konstrukci. Před provedení pracovní spáry je doporučeno konzultovat návrh s projektantem, zda konstrukční přerušování konstrukce nezasahuje do kritických míst v konstrukci.

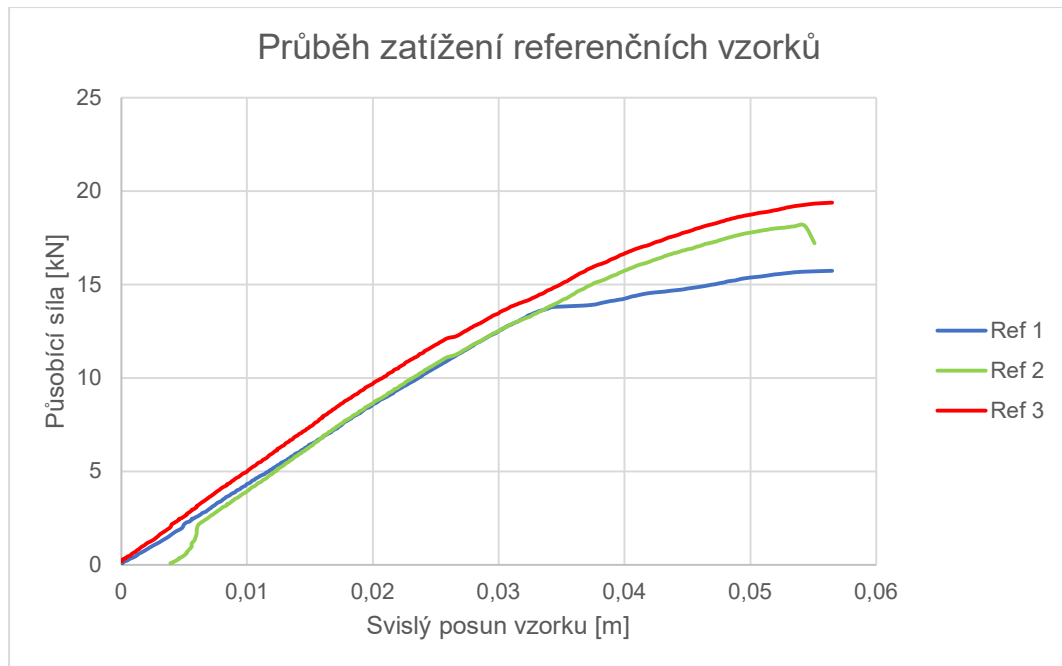
Jednotlivé pevnostní třídy betonu mají uvedené průměrné hodnoty pevnosti v prostém tahu  $f_{ctm}$ . Dané pevnosti v prostém tahu jsou uvažovány jako orientační, avšak u některých stavebních projektů je tato vlastnost betonu zaručená. Dle ČSN EN 1992-1-1 lze předepsaná pevnost v prostém tahu přepočítat z pevnosti betonu v příčném tahu  $f_{ct,sp}$ . Dle normy ČSN 73 1318 se také dá pevnost betonu v prostém tahu  $f_{ct}$  vypočítat z pevnosti tahu za ohybu  $f_{ct,fl}$  dle vzorce (5). [16]

$$f_{ct} = 0,65f_{ct,fl} \quad (5)$$

V porovnání výsledky pevnosti betonu v prostém tahu vychází vždy hůře než deklarovaná hodnota  $f_{ctm}$  dle normy ČSN EN 1992-1-1. Nicméně přepočítaná pevnost z příčného tahu nebo tahu za ohybu vykazuje vyšší hodnoty, než je deklarována normou. [16]

### 2.7.1 Referenční skupina vzorků

Monolitický vzorek dosahoval nejvyšších pevností v tahu ohybem. Avšak při dosažení kritického zatížení vznikl okamžitý lom. Prvek nebyl schopen přenášet další zatížení. Názorné porušení vzorku je zdokumentováno v Příloze 3.1.



Obrázek 20: Průběh zatížení referenčních vzorků

Vypočtené hodnoty pevnosti v prostém tahu byly vyšší, než je deklarováno pro třídu betonu v ČSN EN 1992-1-1. Příčinou může charakteristická hodnota vyskytující se na horní mezní hranici určené pevnostní třídy betonu C 25/30. Výsledky potvrdily tvrzení [16], že přepočítaná pevnost z tahu za ohybu vykazuje vyšší hodnoty, než je deklarována normou.

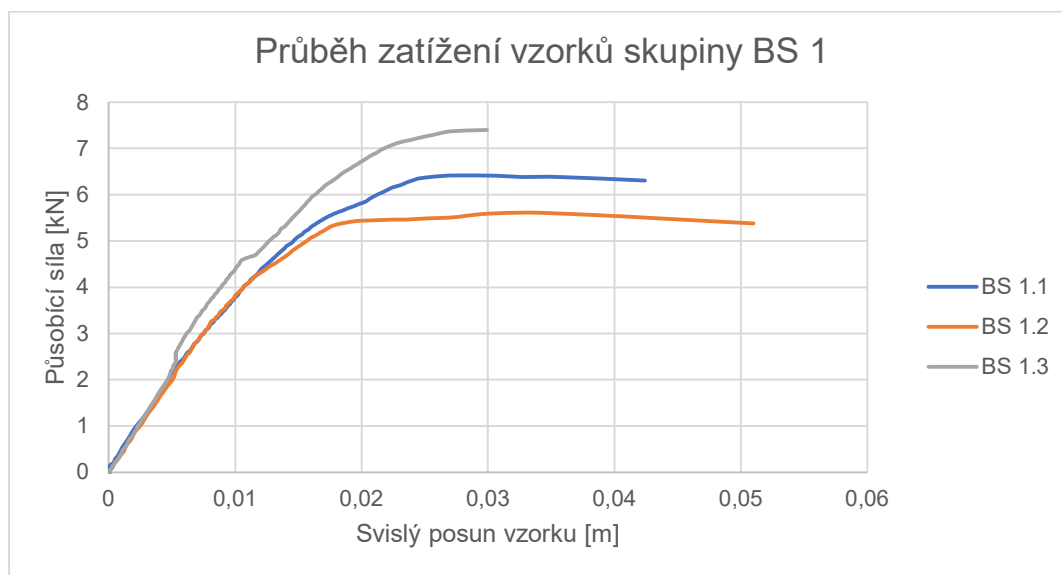


Hodnoty naměřených vzorků					
1. těleso [MPa]	2. těleso [MPa]	3. těleso [MPa]			
4,8	5,3	5,8			
Veličina			Symbol	Hodnota	Jednotky
Pevnost v tahu za ohybu			$f_{ctm,fl}$	5,30	[MPa]
Přepočet $f_{ctm} = 0,65 f_{ctm,fl}$			$f_{ctm}$	3,45	[MPa]
Pevnost v prostém tahu dle ČSN EN 1992-1-1			$f_{ctm,C25/30}$	2,60	[MPa]

Tabulka 5: Určení pevnosti v tahu referenčních prvků

### 2.7.2 Skupina BS1

Svislá pracovní spára provedena pomocí B-systému vedla trhlinu podél tahokovu na straně, kde byla betonová směs dobetonována o 7 dní později. Vedla tedy na straně dopojeného betonu. Názorné porušení vzorku bylo zdokumentováno v Příloze 3.2.



Obrázek 21: Průběh zatížení skupiny vzorků BS1

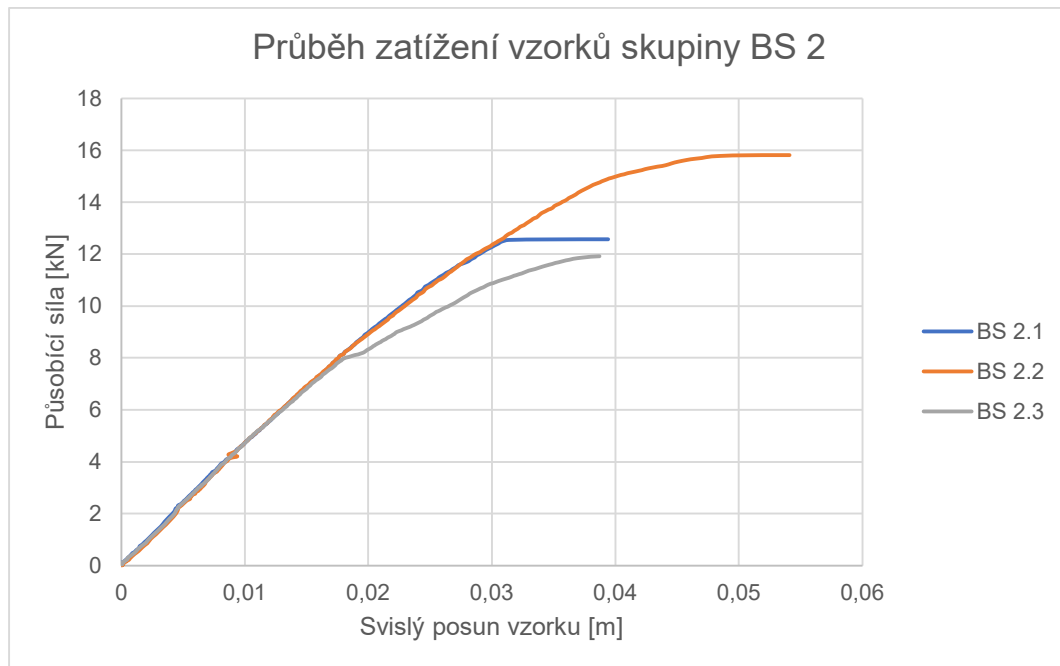
Tato pracovní spára snížila hodnoty pevnosti v tahu betonu přibližně na 36 % betonu bez pracovní spáry.

Hodnoty naměřených vzorků			
1. těleso [MPa]	2. těleso [MPa]	3. těleso [MPa]	
1,9	1,7	2,2	
Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotky
Pevnost v tahu za ohybu	$f_{ctm,fl}$	1,93	[MPa]
Přepočet $f_{ctm} = 0,65 f_{ctm,fl}$	$f_{ctm}$	1,26	[MPa]
Pevnost v prostém tahu dle ČSN EN 1992-1-1	$f_{ctm,C25/30}$	2,60	[MPa]

Tabulka 6: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků BS 1

### 2.7.3 Skupina BS2

Vzorky s touto geometrií pracovní spáry dosahovaly nejlepších výsledků. Trhlina začala vznikat podél tahokovu, ale po odchýlení od pracovní spáry trhlina bránil celistvý beton a trhlina dál nepokračovala. Vznikla tedy druhá trhlina svisle ke vzorku, která nakonec vedla skrze uhnutý tahokov. Pevnost betonu v tahu byla tedy vylepšena tahovou pevností B-systému a hodnotami se nejlépe přibližovali referenčním výsledkům. Při provádění pracovních spár doporučuji provádět tento tvar dočasněho bednění pomocí B-systému. Trhliny vznikaly opět na straně dobetonávky vzorku. Názorné porušení vzorku je zdokumentováno v Příloze 3.3.



Obrázek 22: Průběh zatížení skupiny vzorků BS 2

Tato pracovní spára snižuje hodnoty pevnosti v tahu betonu přibližně na 76 % betonu bez pracovní spáry. Přepočtená pevnost betonu v tahu přesáhla deklarovanou pevnost dle ČSN EN 1992-1-1.

Hodnoty naměřených vzorků		
1. těleso [MPa]	2. těleso [MPa]	3. těleso [MPa]
3,9	4,7	3,6

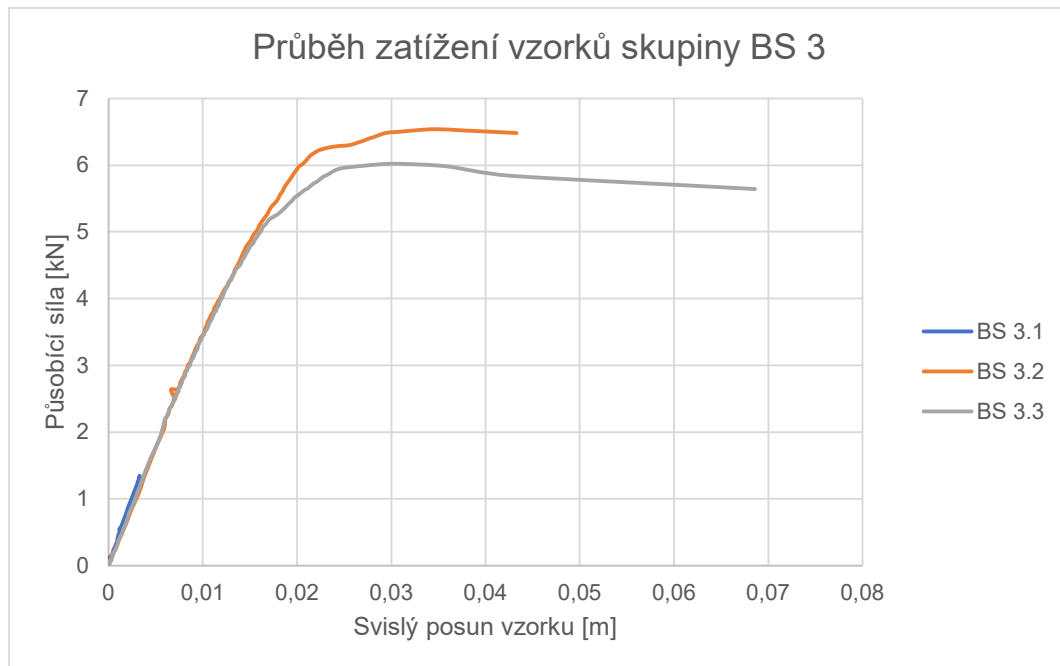
  

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotky
Pevnost v tahu za ohybu	$f_{ctm,fl}$	4,07	[MPa]
Přepočet $f_{ctm} = 0,65 f_{ctm,fl}$	$f_{ctm}$	2,64	[MPa]
Pevnost v prostém tahu dle ČSN EN 1992-1-1	$f_{ctm,C25/30}$	2,60	[MPa]

Tabulka 7: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků BS 2

#### 2.7.4 Skupina BS3

Zkosení tahokovu při prostém ohybu nemá žádný vliv na pevnost betonu v tahu. Výsledky jsou obdobné jako u vzorku se svislou pracovní spárou s využitím B-systému. Názorné porušení vzorku je zdokumentováno v Příloze 3.4.



Obrázek 23: Průběh zatížení skupiny vzorků BS 3

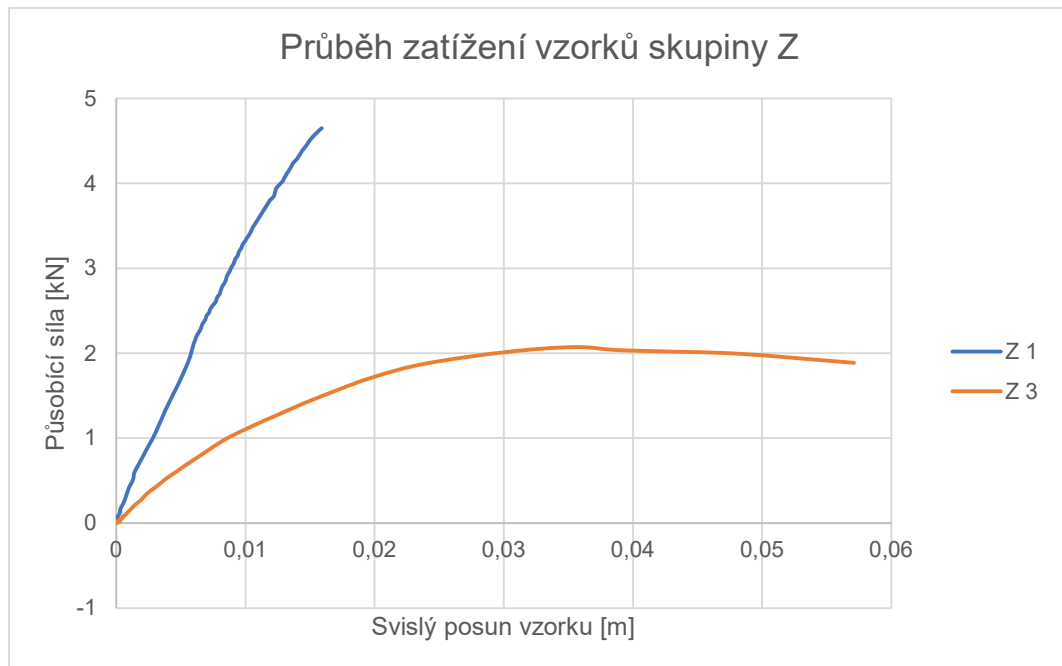
Tato pracovní spára snižuje hodnoty pevnosti v tahu betonu přibližně na 26 % betonu bez pracovní spáry.

Hodnoty naměřených vzorků					
1. těleso [MPa]	2. těleso [MPa]	3. těleso [MPa]			
0,4	2,0	1,8			
Veličina			Symbol	Hodnota	Jednotky
Pevnost v tahu za ohybu			$f_{ctm,fl}$	1,40	[MPa]
Přepoččet $f_{ctm} = 0,65 f_{ctm,fl}$			$f_{ctm}$	0,91	[MPa]
Pevnost v prostém tahu dle ČSN EN 1992-1-1			$f_{ctm,C25/30}$	2,60	[MPa]

Tabulka 8.: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků BS 3

### 2.7.5 Skupina Z

Takzvaný zámek, nedosahuje prakticky žádným pevnostním vlastnostem v tahu. Tyto velmi nízké hodnoty mohou být také zapříčiněné povrchovou úpravou pracovní spáry. Betonové vrstvy se nijak nespojili. Geometricky se pracovní spára podobá spáře ve vzorcích BS 2. Navrhují využit na trhu dostupné lisované perforované plechy v daném tvaru. Názorné porušení vzorku je zdokumentováno v Příloze 3.5.



Obrázek 24: Průběh zatížení skupiny vzorků Z

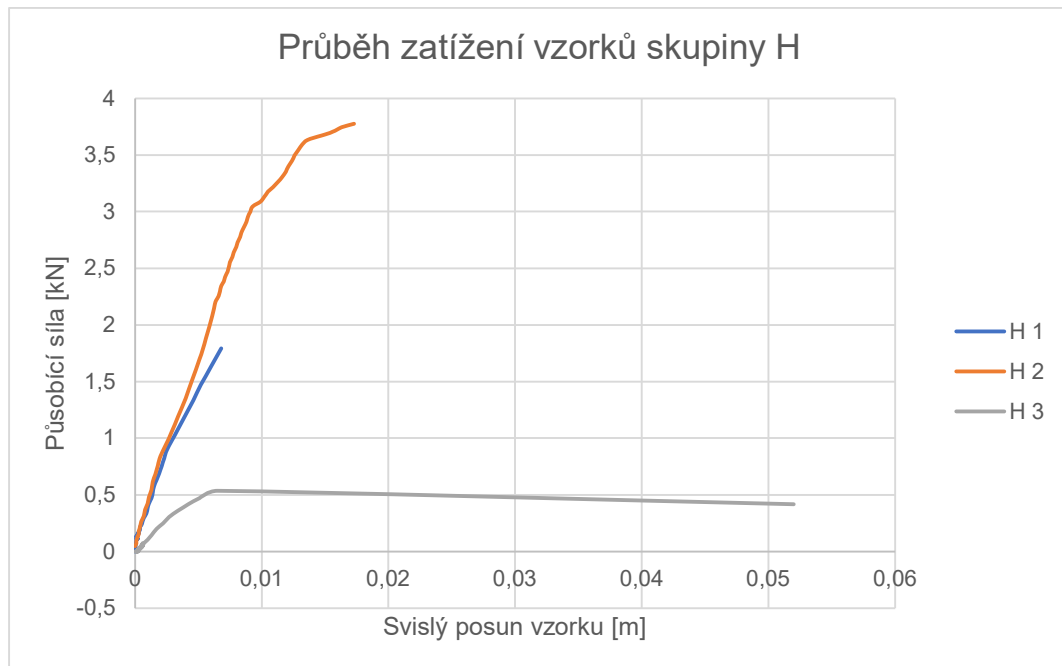
Tato pracovní spára snižuje hodnoty pevnosti v tahu betonu přibližně na 12 % betonu bez pracovní spáry.

Hodnoty naměřených vzorků			
1. těleso [MPa]	2. těleso [MPa]	3. těleso [MPa]	
1,4	0,0	0,6	
Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotky
Pevnost v tahu za ohybu	$f_{ctm,fl}$	0,67	[MPa]
Přepočet $f_{ctm} = 0,65 f_{ctm,fl}$	$f_{ctm}$	0,43	[MPa]
Pevnost v prostém tahu dle ČSN EN 1992-1-1	$f_{ctm,C25/30}$	2,60	[MPa]

Tabulka 9: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků Z

### 2.7.6 Skupina H

Hladká pracovní spára neproказuje žádnou soudržnost betonu a probíhá okamžitý čistý lom. S povrchovou úpravou pracovní spáry pomocí bednicích překližek téměř nelze počítat s pevností betonu v tahu. Názorné porušení vzorku je zdokumentováno v Příloze 3.6.



Obrázek 25: Průběh zatížení skupiny vzorků H

Tato pracovní spára snižuje hodnoty pevnosti v tahu betonu přibližně na 11 % betonu bez pracovní spáry. Výsledky znatelně zhoršuje vzorek H3, který se porušil při zatížení 0,54 kN.

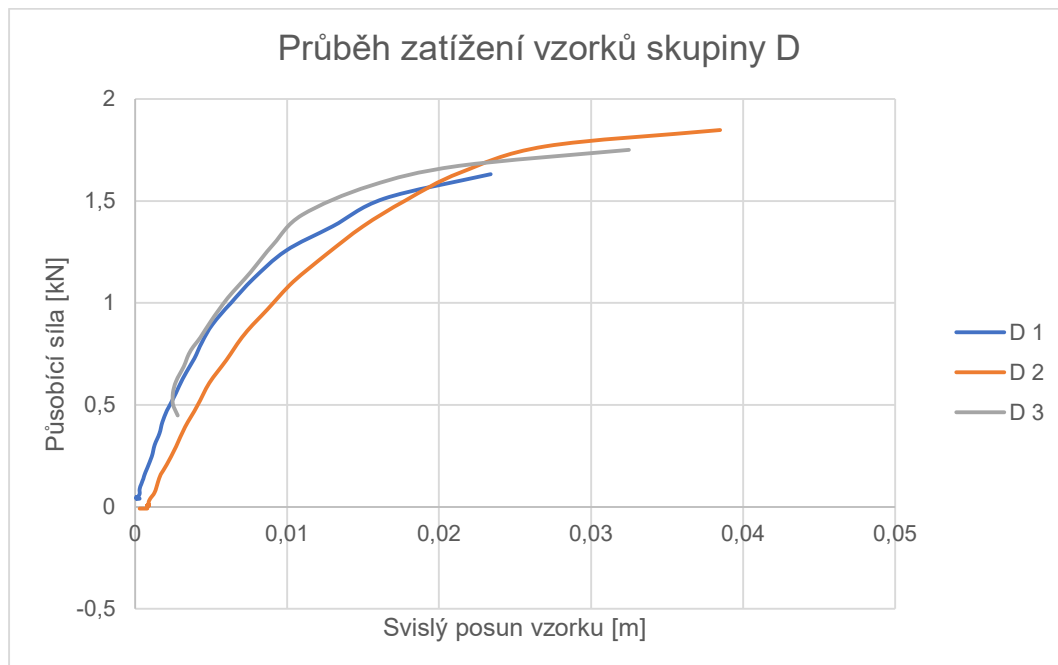
Hodnoty naměřených vzorků					
1. těleso [MPa]	2. těleso [MPa]	3. těleso [MPa]			
0,6	1,1	0,2			
Veličina			Symbol	Hodnota	Jednotky
Pevnost v tahu za ohybu			$f_{ctm,fl}$	0,63	[MPa]
Přepočít $f_{ctm} = 0,65 f_{ctm,fl}$			$f_{ctm}$	0,41	[MPa]
Pevnost v prostém tahu dle ČSN EN 1992-1-1			$f_{ctm,C25/30}$	2,60	[MPa]

Tabulka 10: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků H

### Skupina D

Zdrsněná a navlhčená pracovní spára dosahuje stejných, ne-li horších výsledků v pevnosti v tahu za ohybu jako pracovní spára bez mechanické úpravy. Je tedy zbytečné zdrsnit pracovní spáry, které budou ohýbané. Pracovní spáry jsou zdrsněny a vlhčeny před betonáží v místech, kde působí znatelné smykové síly, není však ověřeno, zda daný

pracovní postup zlepšuje vlastnosti pracovní spáry. Názorné porušení vzorku je zdokumentováno v Příloze 3.7.



Obrázek 26: Průběh zatížení skupiny vzorků

Tato pracovní spára snižuje hodnoty pevnosti v tahu betonu přibližně na 10 % betonu bez pracovní spáry.

Hodnoty naměřených vzorků					
1. těleso [MPa]	2. těleso [MPa]	3. těleso [MPa]			
0,5	0,6	0,5			
Veličina			Symbol	Hodnota	Jednotky
Pevnost v tahu za ohybu			$f_{ctm,fl}$	0,53	[MPa]
Přepočet $f_{ctm} = 0,65 f_{ctm,fl}$			$f_{ctm}$	0,35	[MPa]
Pevnost v prostém tahu dle ČSN EN 1992-1-1			$f_{ctm,C25/30}$	2,60	[MPa]

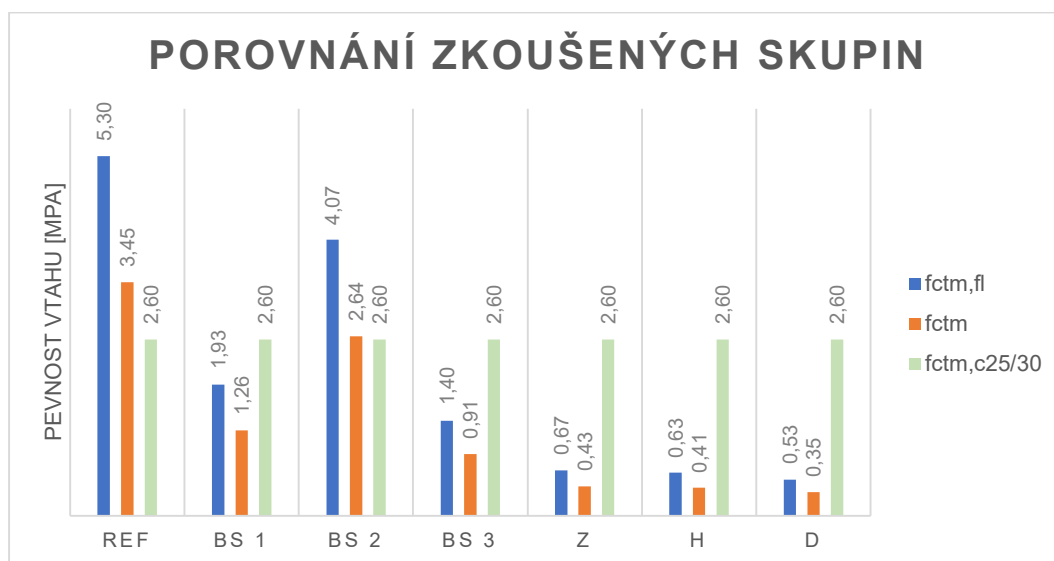
Tabulka 11: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků D

### 2.7.7 Zhodnocení zkoušky

Zkoušená tělesa s navrženými pracovními spárami dosáhla dle předpokladu s nižšími hodnotami pevnosti v tahu než celistvý betonový vzorek. Obecně se dá říci, že pracovní

spáry pomocí vestavěného bednění materiálem B-systém dosahovaly kvalitnější soudržnosti než jiné způsoby přerušení betonového prvku. Doporučuji provádět pracovní spáry dle vzorků BS 2. Soudržnost dané skupiny vzorků výrazně přesahovala hodnoty zbytku zkoušených pracovních spár a zároveň hodnoty pevnosti betonu se dali téměř srovnávat s referenční skupinou vzorků. Koeficient pro snížení pevnosti v tahu oproti celistvému betonovému vzorku je roven 0,76. Dle ČSN EN 1992-1-1 vzorek s pracovní spárou BS 2 splnil pevnost betonu v tahu. Bylo by vhodné dále experimentálně ověřit vlastnosti pracovní spáry typu BS 2.

Pokus o zlepšení spojení odlišně starých betonových vrstev mechanickým zdrsněním pracovní spáry a navlhčením nemělo dle zkoušek žádný vliv na pevnost betonu v tahu. Při provádění pracovní spáry pomocí bednicího materiálu (bednicí desky, prkna, polystyren atd.) doporučuji neuvažovat se soudržností betonových vrstev a počítat na straně bezpečnosti s hodnotou pevnosti betonu v tahu rovné 0.



Obrázek 27: Porovnání pevnosti v tahu zkoušených skupin

### 3 Numerické ověření zatěžovací zkoušky

Numerické ověření výsledků experimentální části bylo provedeno za pomoci výpočetního programu ATENA 2D. Cílem numerické analýzy pomocí metody konečných prvků bylo přenést výsledky experimentální části do vlastností styku betonových konstrukcí ve výpočtovém programu.



Ve výpočtovém programu byl tedy experiment navržen a simulován, tak aby byly získány vlastnosti pracovní spáry pomocí okrajových podmínek výpočtového modelu.

### 3.1 Návrh referenčního numerického modelu

Cílem návrhu daného referenčního modelu s využitím metody konečných prvků, byla spolehlivá numerická simulace chování betonového prvku při čtyřbodovém zatížení k dosažení pevnosti betonu v tahu za ohybu. Materiálové a geometrické vlastnosti jednotlivých skupin vzorků byly tedy přeneseny z experimentálních destruktivních zkoušek referenčních vzorků.

#### 3.1.1 Materiál

Vlastnosti betonu byly určeny na modelu materiálu ‚SBETA materiál‘. Relevantní zvolené materiálové vlastnosti byly vypsány v *tab. 12*. Pevnost betonu v tlaku byla zatříděna dle destruktivních zkoušek do třídy C25/30. Model trhlin v betonu byl zvolen jako fixované. Na průběh a finálních výsledků nebyl rozdíl mezi modelem fixovaných nebo rotovaných trhlin. Na přednastaveném materiálu byla pozměněna jen pevnost v tahu na hodnotu získané v experimentu a následně přepočítané na pevnost betonu v prostém tahu.

Typ materiálu	SBETA materiál	
Modul pružnosti E	30,32	GPa
Poissonovo číslo $\mu$	0,2	-
Pevnost v tahu $f_t$	3,45	MPa
Pevnost v tlaku $f_c$	25,5	MPa
Typ tahového změkčení	Exponencionální	
Specifická lomová energie $G_f$	0,0579	kN/m
Model trhlin	Fixované	
Poměrné přetvoření na pevnosti v tlaku při jedno-osém testu v tlaku $\epsilon_c$	-1,682 E-03	-
Snížení tlakové pevnosti vlivem trhlin	0,8	-
Typ tlakového změkčení	Crush Band	
Kritická tlaková deformace $w_d$	-5,0 E-04	
Smykové ochabnutí	Proměnné	
Interakce tah-tlak	Lineární	
Specifická hmotnost $\rho$	23	kN/m <sup>3</sup>
Koeficient tepelné roztažnosti $\alpha$	1,2E-05	1/K

*Tabulka 12: Materiálové vlastnosti betonu ve výpočtovém programu*

### 3.1.2 Topologie

Při geometrickém specifikaci zkoušeného vzorku byly umístěny styčníky nejen v rozích vzorku, ale také v polohách, kde byly umístěné podpory, zatížení vzorku a v místech umístěných monitorů. Jednotlivé styčníky dále napomohly ke specifikaci umístění výše uvedených parametrů. Referenční zkušební vzorek byl nastaven jako jeden ucelený makroprvek s nastavenou tloušťkou prvku 0,1 m a zvolenými čtyřúhelníkovými prvky CCQ10SBeta. Pro dostatečně přesné výsledky byla nastavena čtyřúhelníková síť konečných prvků délky 0,01 m.

### 3.1.3 Zatížení a podpory

Protože nosník nebyl vyztužený, dalo se očekávat, že k poruše dojde při relativně nízkých úrovních zatížení a reakcí v podporách. Bylo možné tedy přímo zadat soustředěné podpory a zatížení na navrhovaný nosník, aniž by hrozilo nebezpečí, že by způsobily lokální tlakové drcení betonu.

Cílem bylo sledovat křivku zatížení a posunutí jen do chvíle kritického porušení vzorku, tedy do dosažení nejvyšších hodnot zatížení. Za tímto účelem bylo možné předepsat zatížení v podobě sil a použít metodu délky oblouku, která automaticky mění znaménko přírůstku zatížení, jakmile bylo dosaženo vrcholu. Alternativně bylo možné řídit posunutí. Protože výpočet nepokračoval po porušení nosníku, bylo možné použít buď Newtonovu-Raphsonovu metodu, nebo metodu délky oblouku. Vzhledem k její lepší stabilitě bylo rozhodnuto pro Newtonovu-Raphsonovu metodu řešení.

Aby byla urychlena konvergence řešení, byla použita úplná Newtonovu-Raphsonovu metodu, přičemž v každé iteraci se aktualizovala tuhost tečny. K automatickému přizpůsobení rychlosti analýzy podle nelinearity odezvy byla využívána metoda prohledávání přímek. Za tímto účelem bylo třeba vytvořit novou sadu "Solution Parameters" v níž byly nastaveny příslušné volby a parametry, jak je shrnuje tabulka 13. Neuvedené parametry v tabulce byly zanechány dle Standardní Newton – Raphson metody výpočtu.

Standard solution parameters	
Metoda řešení	Newton - Raphson
Optimalizace číslování	Sloan
Oprava tuhosti ke	Každou iteraci
Typ tuhosti	Pružná
Omezení počtu iterací / výpočtový krok	80

Tabulka 13: Parametry výpočtu

### 3.1.4 Zatížení styčnicků

Pro přesné výsledky byl nastaven přírůstek zatížení o velikosti 0,1 kN. Zkoušený vzorek byl zatížen ve dvou bodech souběžně, ve stejné poloze jako byla předepsána čtyřbodová zkouška pevnosti tahu ohybem.

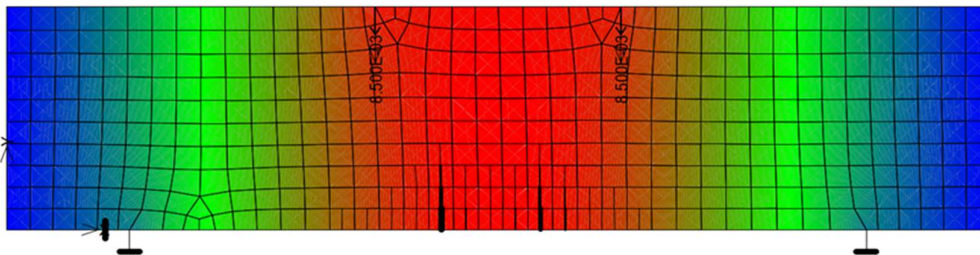
### 3.1.5 Nastavení monitorů

Aby bylo usnadněno získávání křivek zatížení a posunutí, byly zřízeny monitorovací body v blízkosti zatěžovacích bodů. První bod sledoval průhyb v polovině nosníku, druhý působící sílu.

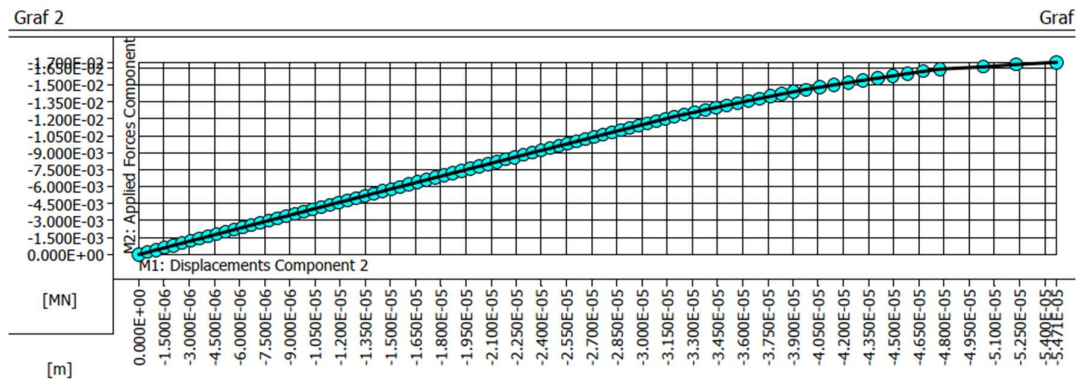
### 3.1.6 Výsledky výpočtu

Průběh zatěžování a samotné výsledky odpovídali středním hodnotám průběhu zkoušky referenčního modelu v laboratoři. Tímto byl potvrzen výpočtový model za vyhovující pro následné zkoumání a nastavení parametrů pracovních spár pro zbylé skupiny vzorků.

Výsledky 1	Výpočtový krok 85
Skaláry barevný přechod: základní materiál, v uzlech, Displacements, x(2), <-5.576E-05;1.590E-05>[m]	
Vektory: (všude), External Forces, Max: 8.500E-03[MN]	
Trhliny: v prvcích, otevření: <2.669E-08;5.606E-06>[m], SigmaN: <2.202E+00;3.440E+00>[MPa], SigmaT: <-1.669E-01;1.813E-01>[MPa]	



Obrázek 28: Výsledky výpočtového modelu REF



Obrázek 29: Průběh zatížení modelu REF

### 3.2 Numerické simulace prvků s pracovními spárami

Za předpokladu, že se základní výpočtový model referenčního prvku nezměnil, byly níže uvedené parametry pracovních spár ve výpočtovém programu ATENA 2D navrženy, aby se shodovaly se získanými hodnotami z experimentální části. Určené parametry odpovídají středním hodnotám pevnosti betonu v tahu za ohybu.

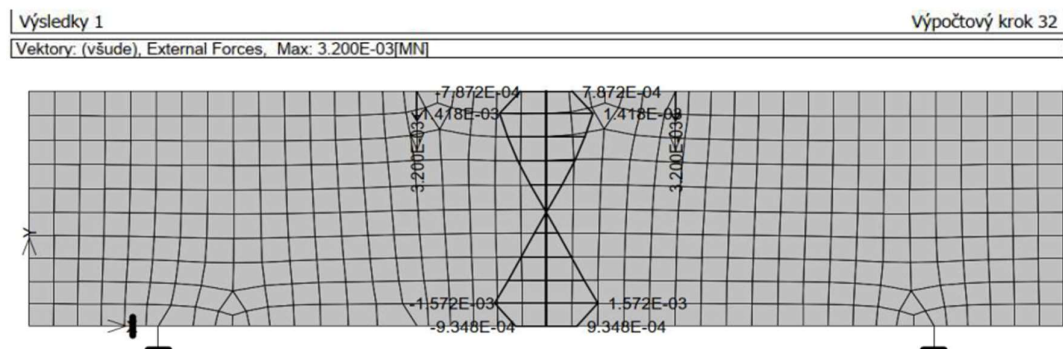
Pracovní spára byla modelována pomocí linie, která dělí model na dvě poloviny. Geometrická poloha odpovídala typu pracovní spáry jednotlivých zkoušených skupin. Dělicí linie byla nastavena jako přechodový prvek s tloušťkou 0,1 m s využitím materiálu 2D kontakt. Tloušťka odpovídá tloušťce zkoušeného trámce. Materiálové vlastnosti naprogramované linie určuje vlastnosti pracovní spáry.

Ve výsledcích byl také vykreslen průběh tahových a tlakových sil působící na pracovní spáru.

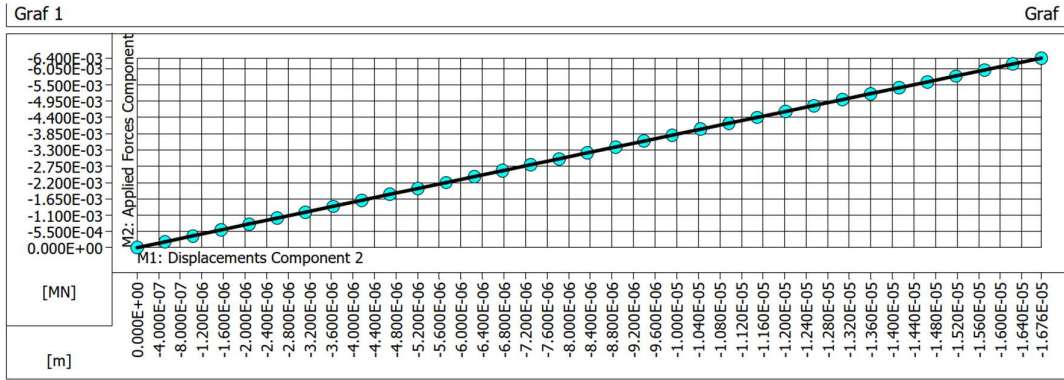
#### 3.2.1 Výpočetní model BS 1

Materiál	2D kontakt BS 1
Normálová tuhost $K_{nn}$	2,0 E+08 [MN/m <sup>3</sup> ]
Tečná tuhost $K_{tt}$	2,0 E+08 [MN/m <sup>3</sup> ]
Pevnost v tahu $f_t$	1,93 [MPa]
Koheze $C$	1,93 [MPa]
Součinitel tření	0,2 [-]

Tabulka 14: Materiálové vlastnosti pracovní spáry BS 1



Obrázek 30: Výsledky výpočtového modelu BS 1

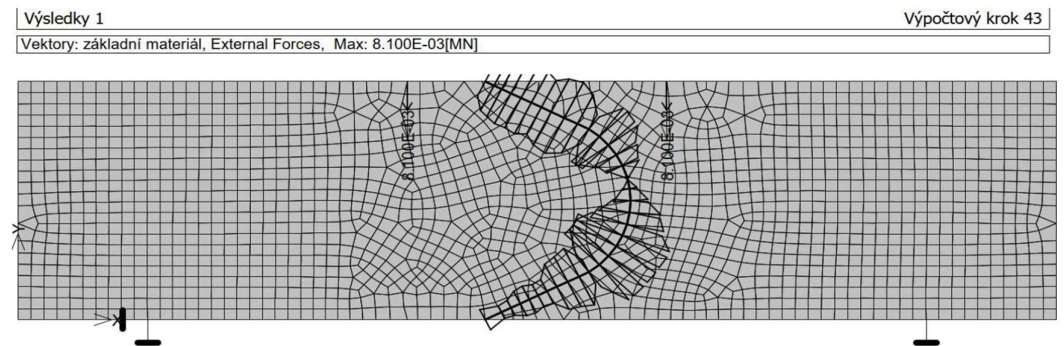


Obrázek 31: Průběh zatížení modelu BS 1

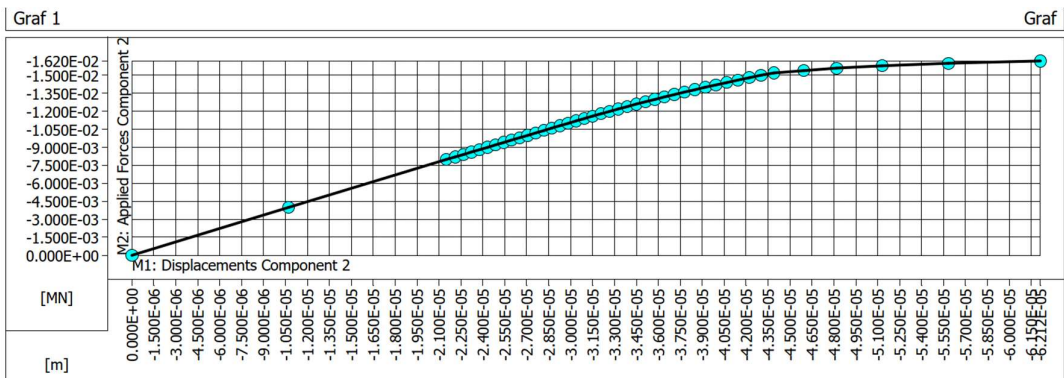
### 3.2.2 Výpočetní model BS 2

Materiál	2D kontakt BS 2
Normálová tuhost Knn	2,0 E+08 [MN/m3]
Tečná tuhost Ktt	2,0 E+08 [MN/m3]
Pevnost v tahu ft	4,07 [MPa]
Koheze C	1,64 [MPa]
Součinitel tření	0,2 [-]

Tabulka 15: Materiálové vlastnosti pracovní spáry BS 2



Obrázek 32: Výsledky výpočtového modelu BS 2



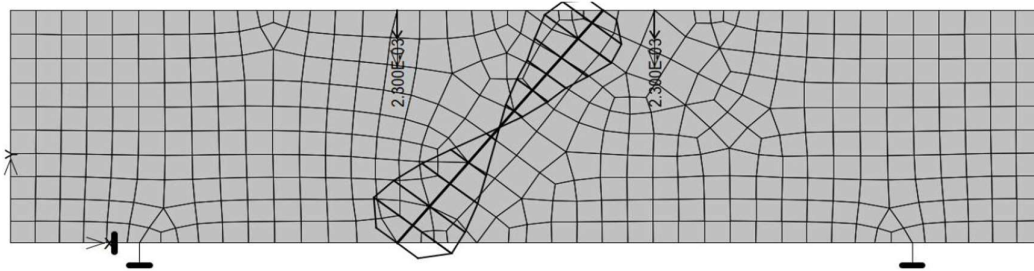
Obrázek 33: Průběh zatížení modelu BS 2

### 3.2.3 Výpočetní model BS 3

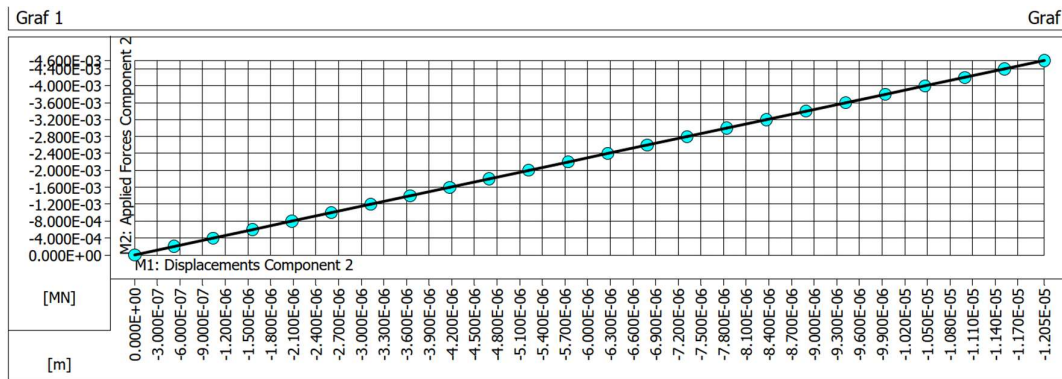
Materiál	2D kontakt BS 1
Normálová tuhost Knn	2,0 E+08 [MN/m3]
Tečná tuhost Ktt	2,0 E+08 [MN/m3]
Pevnost v tahu ft	1,4 [MPa]
Koheze C	0,91 [MPa]
Součinitel tření	0,2 [-]

Tabulka 16: Materiálové vlastnosti pracovní spáry BS 3

Výsledky 1	Výpočtový krok 23
Vektory: základní materiál, External Forces, Max: 2.300E-03[MN]	



Obrázek 34: Výsledky výpočtového modelu BS 3



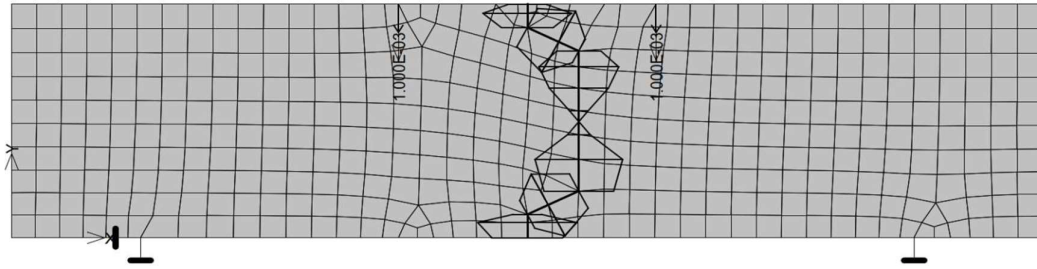
Obrázek 35: Průběh zatížení modelu BS 3

### 3.2.4 Výpočetní model Z

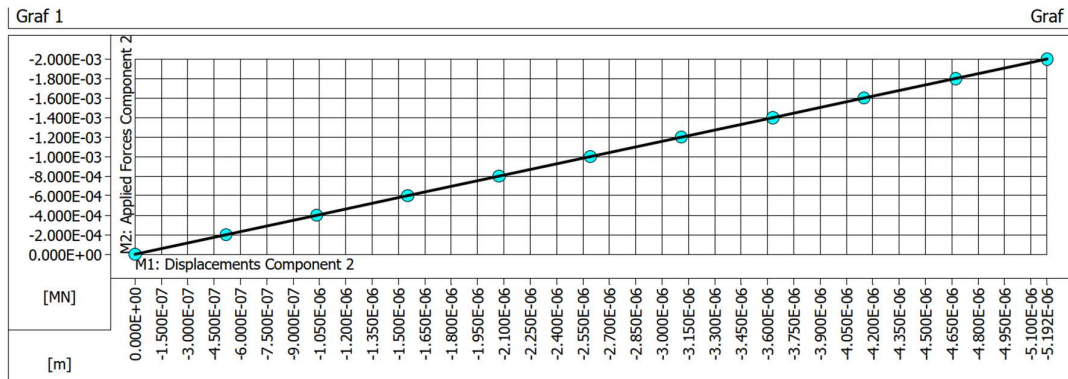
Materiál	2D kontakt Z
Normálová tuhost Knn	2,0 E+08 [MN/m3]
Tečná tuhost Ktt	2,0 E+08 [MN/m3]
Pevnost v tahu ft	0,67 [MPa]
Koheze C	0,67 [MPa]
Součinitel tření	0,1 [-]

Tabulka 17: Materiálové vlastnosti pracovní spáry Z





Obrázek 36: Výsledky výpočtového modelu Z

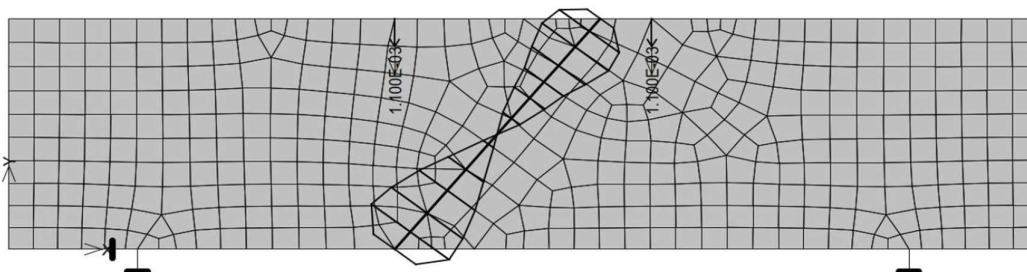


Obrázek 37: Průběh zatížení modelu Z

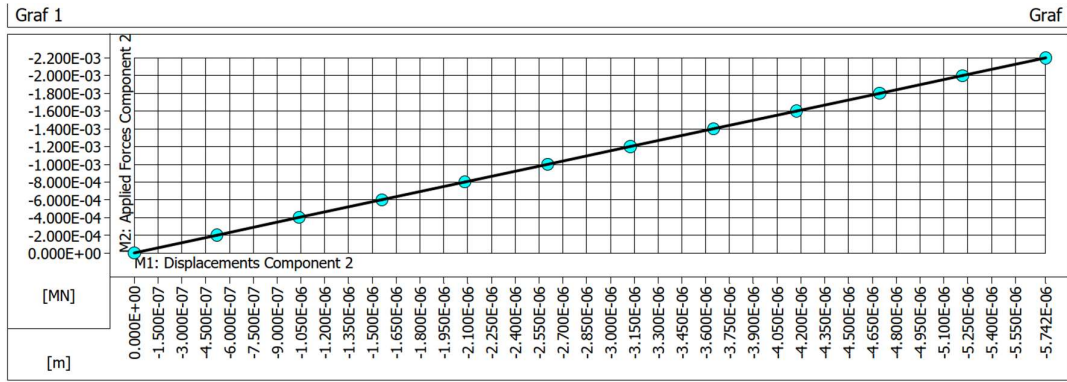
### 3.2.5 Výpočetní model H

Materiál	2D kontakt H
Normálová tuhost Knn	2,0 E+08 [MN/m3]
Tečná tuhost Ktt	2,0 E+08 [MN/m3]
Pevnost v tahu ft	1,4 [MPa]
Koheze C	0,41 [MPa]
Součinitel tření	0,2 [-]

Tabulka 18: Materiálové vlastnosti pracovní spáry H



Obrázek 38: Výsledky výpočtového modelu H

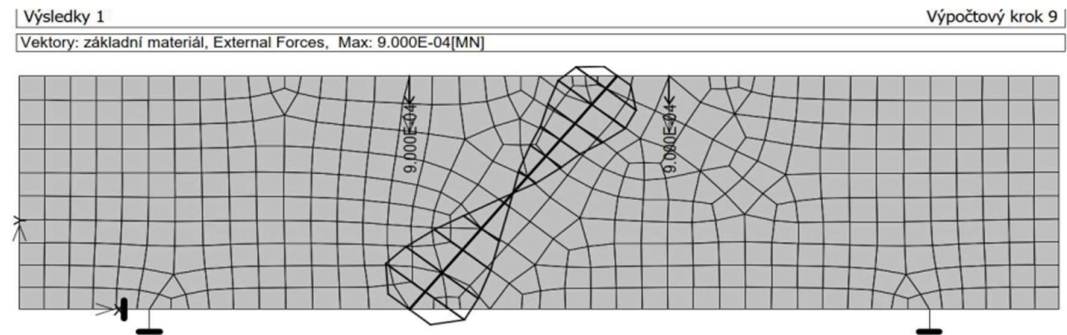


Obrázek 39: Průběh zatížení modelu H

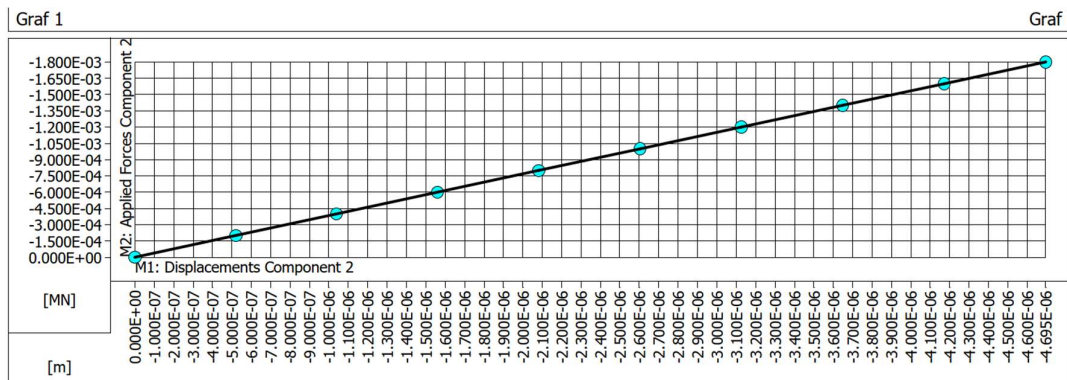
### 3.2.6 Výpočetní model D

Materiál	2D kontakt D
Normálová tuhost Knn	2,0 E+08 [MN/m3]
Tečná tuhost Ktt	2,0 E+08 [MN/m3]
Pevnost v tahu ft	0,53 [MPa]
Koheze C	0,35 [MPa]
Součinitel tření	0,1 [-]

Tabulka 19: Materiálové vlastnosti pracovní spáry D



Obrázek 40: Výsledky výpočtového modelu D

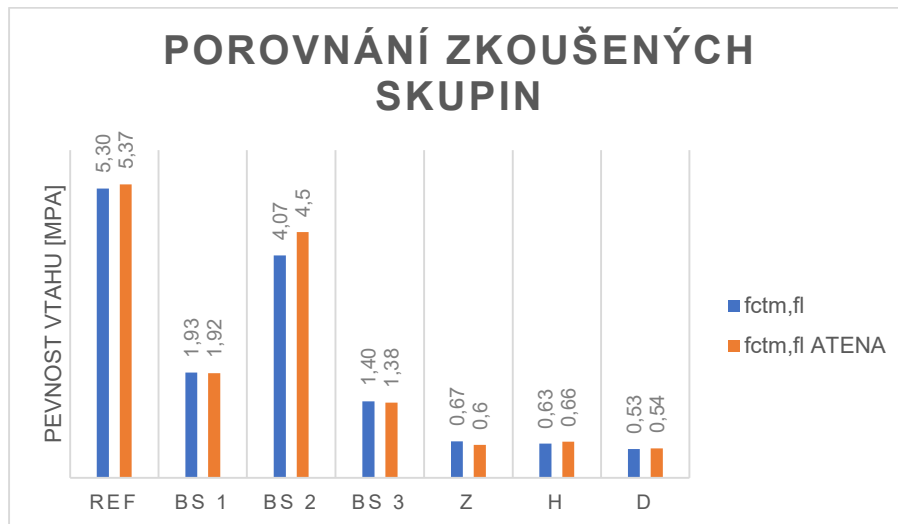


Obrázek 41: Průběh zatížení modelu D



### 3.3 Porovnání numerických a zkoušených výsledků

Výsledkem numerické analýzy bylo navrhnout výpočetní hodnoty jednotlivých pracovních spár, tak aby výsledky dosáhly stejných hodnot, jako získané hodnoty experimentální metodou. Tabulka (obr. 42) prokazuje shodu získaných hodnot pevnosti v tahu ohybem destruktivní metodou čtyřbodového ohybu a spočítaných hodnot numerickou analýzou za pomoci metody konečných prvků využitím programu ATENA 2D. Navržené hodnoty vyjadřující vlastnosti pracovní spáry v betonové konstrukci lze uvažovat jako shodné s vlastnostmi získané experimentální metodou.



Obrázek 42: Porovnání pevnosti v tahu zkoušenou a numerickou metodou

## 4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zkoumání soudržnosti betonových spojů rozdílného stáří betonu. Přesněji řečeno, pevnost betonu s pracovní spárou v tahu za ohybu. Následně bylo navrženo ověření výsledků numerickým výpočtem výsledků za pomoci metody konečných prvků.

V experimentální části byly vyrobeny trámce se zabudovanou pracovní spárou rozdílných tvarů a vlastností. Tyto zkušební vzorky byly následně zkoušeny na pevnost v tahu ohybem destruktivní metodou čtyřbodovým ohybem. Dále bylo porovnáno odlišné provedení pracovní spáry a jejich vliv na únosnost ohýbaných zkušebních vzorků.

Zkoušené vzorky s pracovní spárou nedosahovaly hodnot pevnosti betonu v tahu nepřerušené referenční skupině betonových vzorků. Vliv na výsledky měla povrchová úprava a instalace tahokovu za účelem ztraceného bednění pracovní spáry. Dále vznikaly rozdíly ve výsledcích mezi rozdílnou geometrickou úpravou betonového styku.

Nejlepší vlastnosti měla pracovní spára s využitím B-systému a tvaru hyperboly (vzorek BS 2). Hodnoty se přiblížili ze 76 % referenční skupině vzorků. Vzorky BS 2 zřetelně převyšovaly výsledky ostatních zkoušených betonových styků a přepočtená pevnost v prostém tahu byla rovna deklarované pevnosti betonu v prostém tahu pro třídu betonu C25/30 dle ČSN EN 1992-1-1. Z tohoto doporučuji navrhnout a provádět daný tvar pracovní spáry v namáhaných železobetonových konstrukcích.

Nejhůřší výsledky měly vzorky, které měly pracovní spáru tvořenou bednicí překližkou (vzorky D a Z). Geometrický tvar nijak nezlepšil výsledek daných zkoušených vzorků. Pevnost v tahu takového spoje doporučuji uvažovat jako zanedbatelnou.

S překvapením nebyly žádné zřetelné zlepšení výsledků u vzorku, který měl mechanicky zdrsněný a před betonáží řádně navlhčený betonový styk (vzorek D). Výsledky vzorku D a H byly srovnatelné.

V numerické analýze byly výsledky zkoušky ověřeny a navrženy vlastnosti pracovních spár jednotlivých provedení dle experimentální části. Hodnoty tak lze přenést do výpočtu složitějších betonových konstrukcí s modelovanou pracovní spárou a vyžadující vlastnosti daného styku mezi betonovými konstrukcemi nebo záběry.

## Seznam literatury

- [1] ESPECHE, Ariel D. a Javier LEÓN. Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test. *Construction and Building Materials* [online]. 2011, **25**(3), 1222–1235. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.032
- [2] *F1-BP-2018-Nanic-Denis-F1-BP-2018\_Nanic-Denis.pdf* [online]. [vid. 2024-05-17]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/78097/F1-BP-2018-Nanic-Denis-F1-BP-2018\\_Nanic-Denis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/78097/F1-BP-2018-Nanic-Denis-F1-BP-2018_Nanic-Denis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)
- [3] DYBEŁ, Piotr a Daniel WAŁACH. Evaluation of the Development of Bond Strength between Two Concrete Layers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **245**, 032056. ISSN 1757-8981, 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/245/3/032056
- [4] Fig. 5. Needle-like particles of cement (Ettringit) in the BREX... *ResearchGate* [online]. [vid. 2024-05-17]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Needle-like-particles-of-cement-Ettringit-in-the-BREX-surrounded-by-the-bentonite\\_fig5\\_272385714](https://www.researchgate.net/figure/Needle-like-particles-of-cement-Ettringit-in-the-BREX-surrounded-by-the-bentonite_fig5_272385714)
- [5] HUI-CAI, Xie, Li GENG-YING a Xiong GUANG-JING. Microstructure model of the interfacial zone between fresh and old concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* [online]. 2002, **17**(4), 64–68. ISSN 1993-0437. Dostupné z: doi:10.1007/BF02838421
- [6] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, ed. *Fib model code for concrete structures 2010*. Berlin: Ernst & Sohn, 2013. ISBN 978-3-433-03061-5.
- [7] HE, Yan, Xiong ZHANG, R. D. HOOTON a Xiaowei ZHANG. Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **151**, 582–590. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.049
- [8] [Vid. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.illichman.cz/main>
- [9] ČÍRTEK, Ladislav. *Betonové konstrukce II: konstrukce prutové a základové*. 1999. vyd. Brno: VUTIUM, nedatováno. ISBN 80-214-1543-6.
- [10] ČSN 73 1332. *Stanovení tuhnutí betonu*. B.m.: Praha: Český normalizační institut. 1986
- [11] HUŇKA, Ing Petr. *Betony pro masivní konstrukce – zásady, materiály*. nedatováno.
- [12] CROWTHER, Ian. Pracovní spáry a smršťovací pásy betonových konstrukcí [online]. 2022 [vid. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/102673>
- [13] PROF. ING. MILAN HOLICKÝ, DRSC., PH.D., Studio. Stanovení charakteristické pevnosti konstrukcí z betonu na základě zkoušek. *Časopis Stavebnictví* [online]. [vid. 2024-05-14]. Dostupné

z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-stanoveni-charakteristicke-pevnosti-konstrukci-z-betonu-na-zaklade-zkousek.html>

- [14] ČSN EN 1990 ed. 2 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2021
- [15] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část5: Pevnost v tahu ohybem zušebních těles. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2020
- [16] COUFAL, Robert. PARAMETRY BETONU – SPECIFIKACE, PŘEDPOKLADY A REALITA ■ FEATURES OF CONCRETE – SPECIFICATIONS, PRESUMPTIONS AND REALITY. nedatováno.

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Výsledky krychelné pevnosti betonu v tlaku.....	28
Tabulka 2: Hodnoty součinitele kn pro 5% kvantil [14] .....	29
Tabulka 3: Určení pevnostní třídy betonu .....	29
Tabulka 4: Výsledky laboratorních zkoušek .....	32
Tabulka 5: Určení pevnosti v tahu referenčních prvků.....	35
Tabulka 6: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků BS 1 .....	36
Tabulka 7: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků BS 2 .....	37
Tabulka 8: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků BS 3 .....	38
Tabulka 9: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků Z.....	39
Tabulka 10: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků H .....	40
Tabulka 11: Určení pevnosti v tahu skupiny vzorků D .....	41
Tabulka 12: Materiálové vlastnosti betonu ve výpočtovém programu.....	43
Tabulka 13: Parametry výpočtu.....	45
Tabulka 14: Materiálové vlastnosti pracovní spáry BS 1 .....	46
Tabulka 15: Materiálové vlastnosti pracovní spáry BS 2 .....	47
Tabulka 16: Materiálové vlastnosti pracovní spáry BS 3 .....	48
Tabulka 17: Materiálové vlastnosti pracovní spáry Z .....	48
Tabulka 18: Materiálové vlastnosti pracovní spáry H .....	49
Tabulka 19: Materiálové vlastnosti pracovní spáry D .....	50

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozhraní betonových vrstev [2] .....	9
Obrázek 2: Chemický spoj vyztuženého a čerstvého betonu [1] .....	10
Obrázek 3: Krystaly ettringitu v betonové směsi [4] .....	11
Obrázek 4: Drsnost povrchu, l-délka úseku, $R_m$ -průměrná odchylka, y-absolutní odchylka [6] .....	12
Obrázek 5: Zdrsněný základový pás pneumatickým kladivem, vlastní zpracování .....	13
Obrázek 6: Typy spár a prostupů v betonové konstrukci [8] .....	14
Obrázek 7: Schéma betonáže odstávky pracovního záběru masivní betonové konstrukce [11] .....	17
Obrázek 8: Příhradová analogie toku tlakového a tahového napětí na prostém nosníku od zatížení [12] .....	18
Obrázek 9: Betonovaná pracovní spára stropní desky [12] .....	18
Obrázek 10: Pracovní spára základového pasu [12] .....	19
Obrázek 11: Pracovní spára v základové desce s vodonepropustnými vlastnostmi [12]	20
Obrázek 12: Betonování spár mezi prefabrikovanými prvky .....	21
Obrázek 13: Uložení a zabetonování prefabrikovaného sloupu do základové patky .....	22
Obrázek 14: Filigránová stěna .....	23
Obrázek 15: Instalované bednění a betonáž první poloviny každého vzorku s pracovní spárou .....	24
Obrázek 16: Betonáž druhé poloviny každého vzorku s pracovní spárou .....	25
Obrázek 17: Křehelná pevnost v tlaku .....	30
Obrázek 18: Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa dvěma břemeny [15] .....	31
Obrázek 19: Pevnost v tahu za ohybu vzorků v MPa .....	33
Obrázek 20: Průběh zatížení referenčních vzorků .....	34
Obrázek 21: Průběh zatížení skupiny vzorků BS1 .....	35
Obrázek 22: Průběh zatížení skupiny vzorků BS 2 .....	37
Obrázek 23: Průběh zatížení skupiny vzorků BS 3 .....	38
Obrázek 24: Průběh zatížení skupiny vzorků Z .....	39
Obrázek 25: Průběh zatížení skupiny vzorků H .....	40
Obrázek 26: Průběh zatížení skupiny vzorků .....	41
Obrázek 27: Porovnání pevnosti v tahu zkoušených skupin .....	42
Obrázek 28: Výsledky výpočtového modelu REF .....	45

Obrázek 29: Průběh zatížení modelu REF.....	45
Obrázek 30: Výsledky výpočtového modelu BS 1 .....	46
Obrázek 31: Průběh zatížení modelu BS 1 .....	47
Obrázek 32: Výsledky výpočtového modelu BS 2 .....	47
Obrázek 33: Průběh zatížení modelu BS 2 .....	47
Obrázek 34: Výsledky výpočtového modelu BS 3 .....	48
Obrázek 35: Průběh zatížení modelu BS 3 .....	48
Obrázek 36: Výsledky výpočtového modelu Z .....	49
Obrázek 37: Průběh zatížení modelu Z.....	49
Obrázek 38: Výsledky výpočtového modelu H.....	49
Obrázek 39: Průběh zatížení modelu H.....	50
Obrázek 40: Výsledky výpočtového modelu D.....	50
Obrázek 41: Průběh zatížení modelu D .....	50
Obrázek 42: Porovnání pevnosti v tahu zkoušenou a numerickou metodou.....	51



# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza chování spoje dvou betonů různého stáří

### PŘÍLOHA 1

Autor: Bc. Ian Crowther

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Akademický rok: 2023/2024



# Obsah

1	Provádění vzorků .....	9
1.1	Přípravavené formy s instalovaným přerušením vzorků .....	9
1.2	Zabetonovaná první etapa jednotlivých vzorků (t = 0 dní).....	10
1.3	Zabetonovaná druhá etapa vzorků (t = 7 dní).....	11
2	Přehled vzorků .....	12
2.1	Vzorek Vzorek se svislou spárou s využitím tahokovu (BS 1) .....	12
2.2	Vzorek s vyboulenou pracovní spárou s využitím tahokovu (BS 2) .....	13
2.3	Vzorek s šikmou pracovní spárou pod úhlem 45° B-systém (BS 3) .....	14
2.4	Vzorek s pracovní spárou ve tvaru zámku (Z).....	15
2.5	Vzorek s šikmou spárou tvořenou bednicí překližkou (H) .....	16
2.6	Vzorek s šikmou spárou mechanicky zdrsňenou (D) .....	17
3	Průběh zkoušky stanovení pevnosti v tahu ohybem .....	19
3.1	Referenční skupina vzorků .....	19
3.2	Skupina BS 1 .....	21
3.3	Skupina BS 2 .....	22
3.4	Skupina BS3 .....	26
3.5	Skupina Z.....	29
3.6	Skupina H .....	31
3.7	Skupina D .....	35

# 1 Provádění vzorků

## 1.1 Přípravavené formy s instalovaným přerušáním vzorků



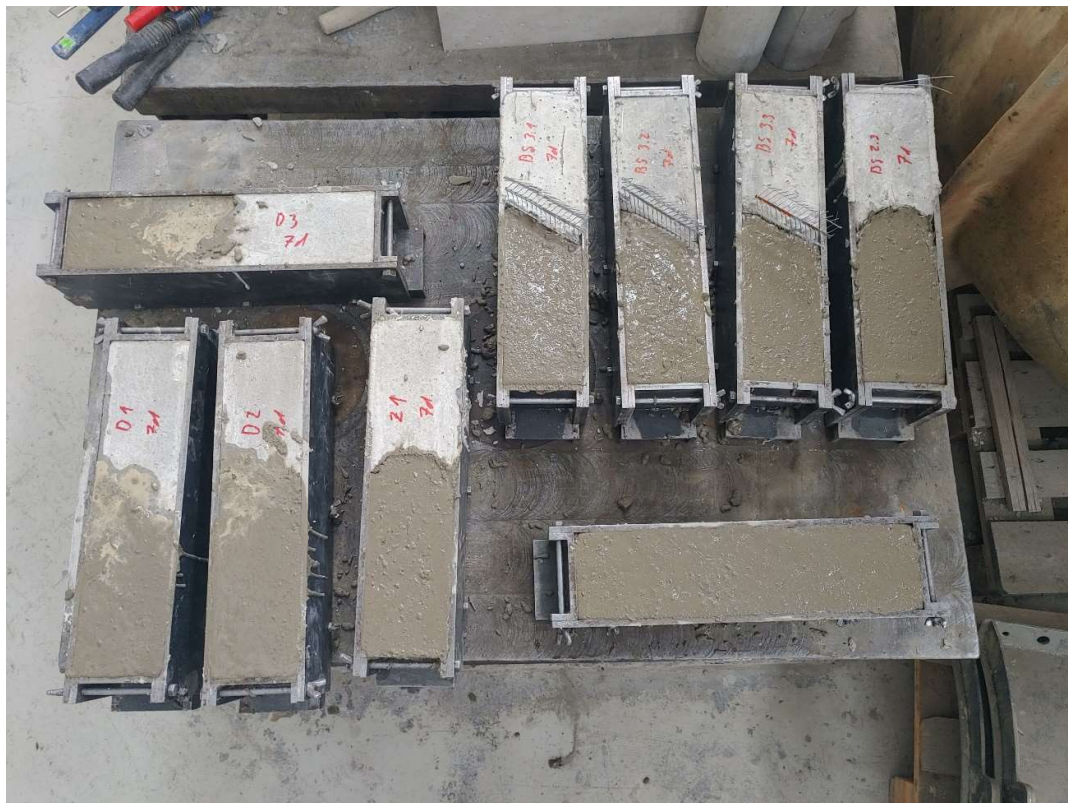
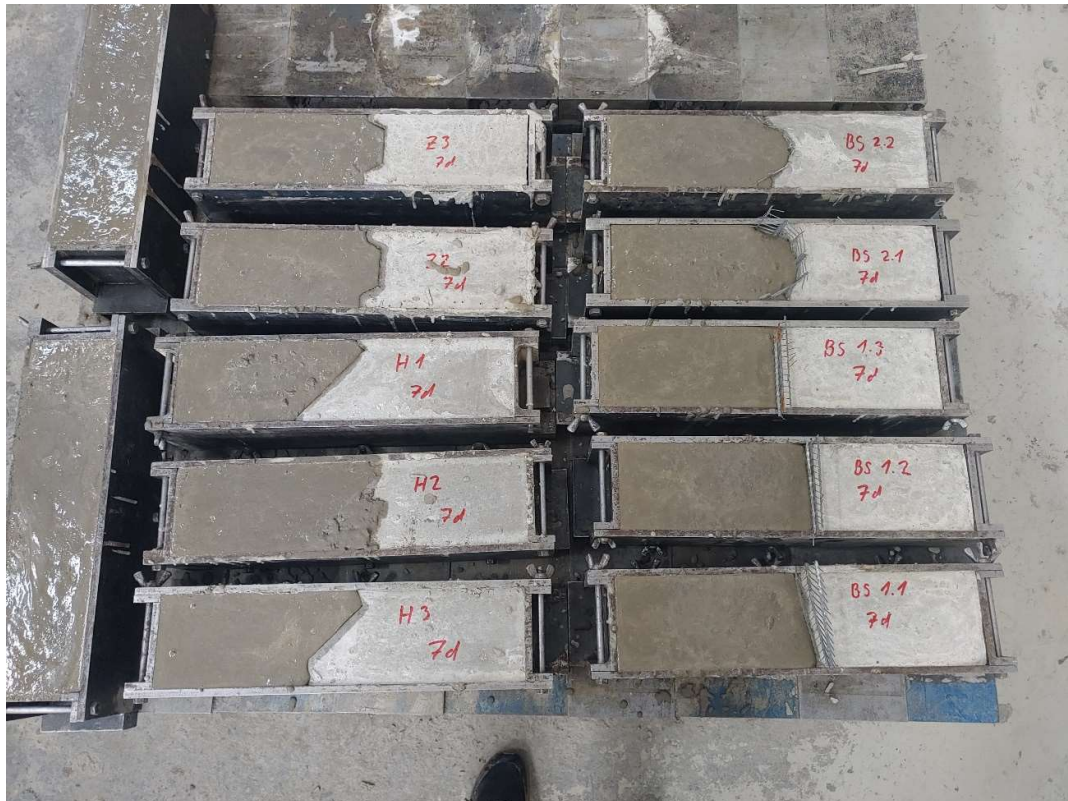


## 1.2 Zabetonovaná první etapa jednotlivých vzorků (t = 0 dní)



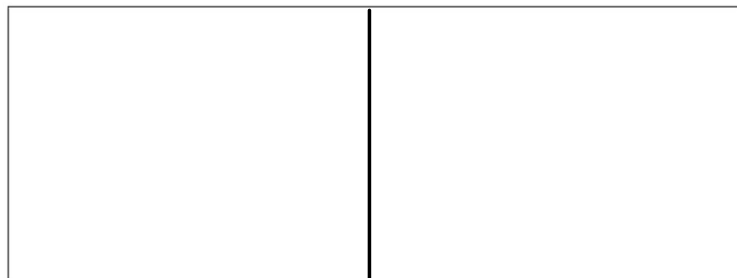


### 1.3 Zabetonovaná druhá etapa vzorků (t = 7 dní)



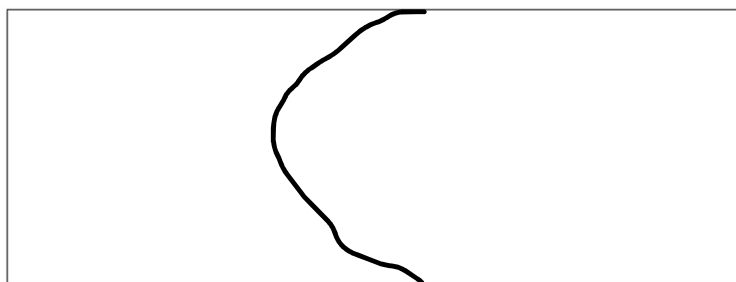
## 2 Přehled vzorků

### 2.1 Vzorek Vzorek se svislou spárou s využitím tahokovu (BS 1)

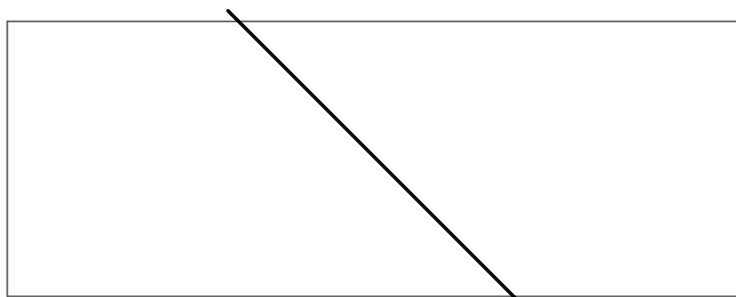




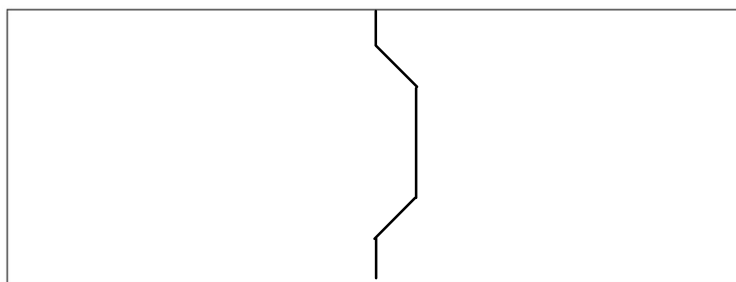
## 2.2 Vzorek s vyboulenou pracovní spárou s využitím tahokovu (BS 2)



### 2.3 Vzorek s šikmou pracovní spárou pod úhlem 45° B-systém (BS 3)

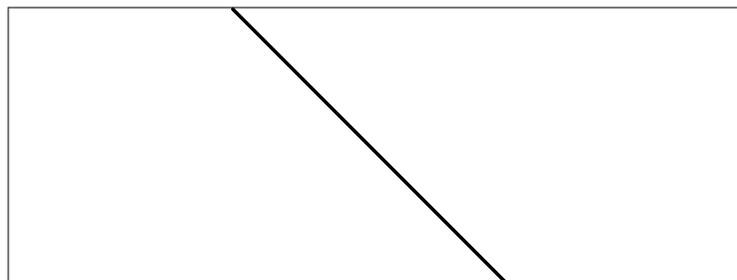


## 2.4 Vzorek s pracovní spárou ve tvaru zámku (Z)



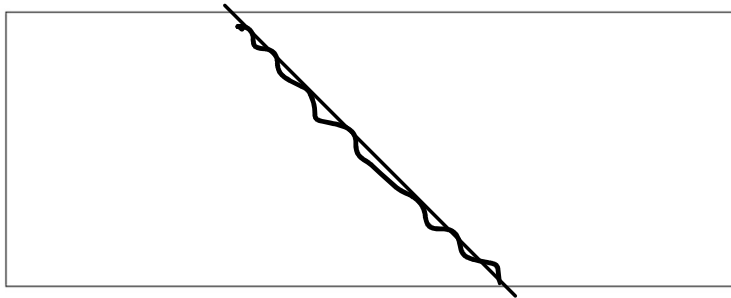


## 2.5 Vzorek s šikmou spárou tvořenou bednicí překližkou (H)





2.6 Vzorek s šikmou spárou mechanicky zdrsněnou (D)







### 3 Průběh zkoušky stanovení pevnosti v tahu ohybem

#### 3.1 Referenční skupina vzorků







### 3.2 Skupina BS 1





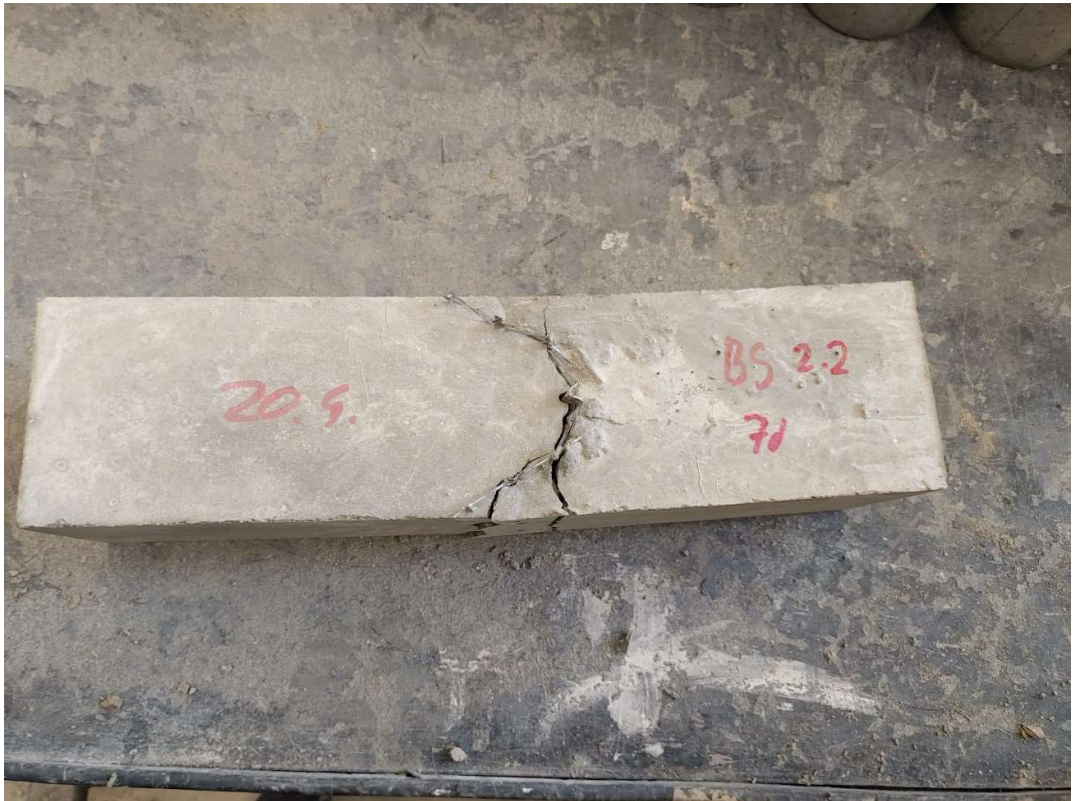
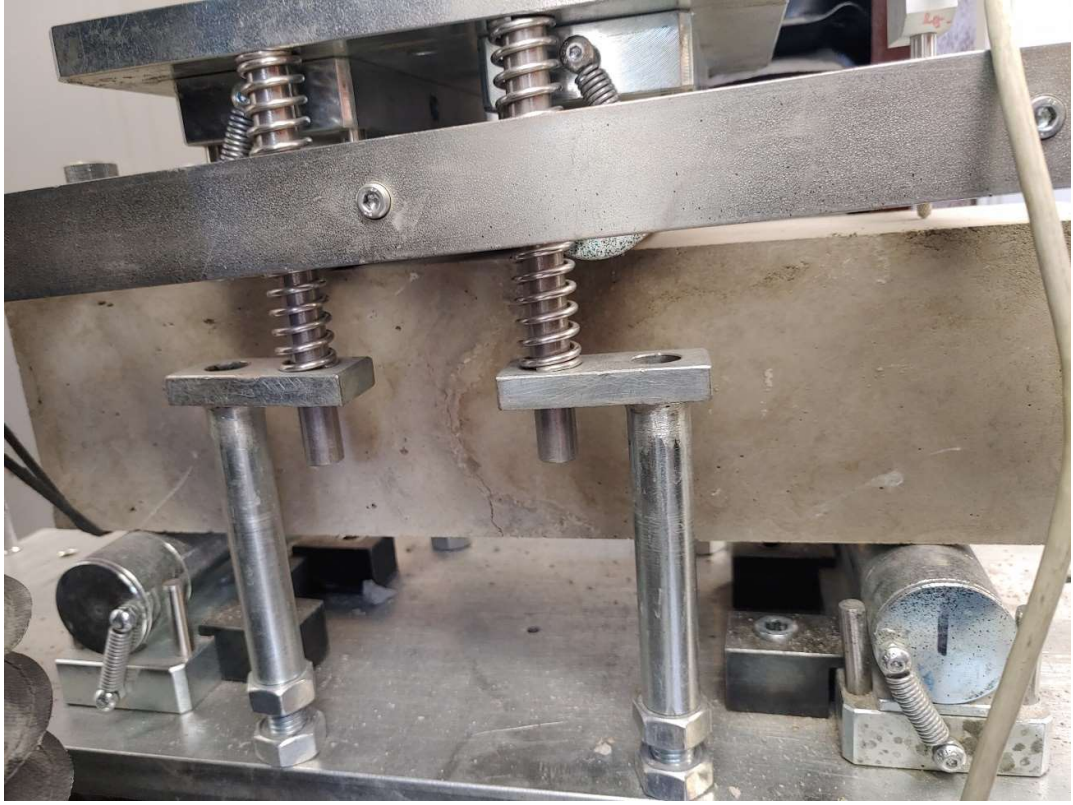
### 3.3 Skupina BS 2











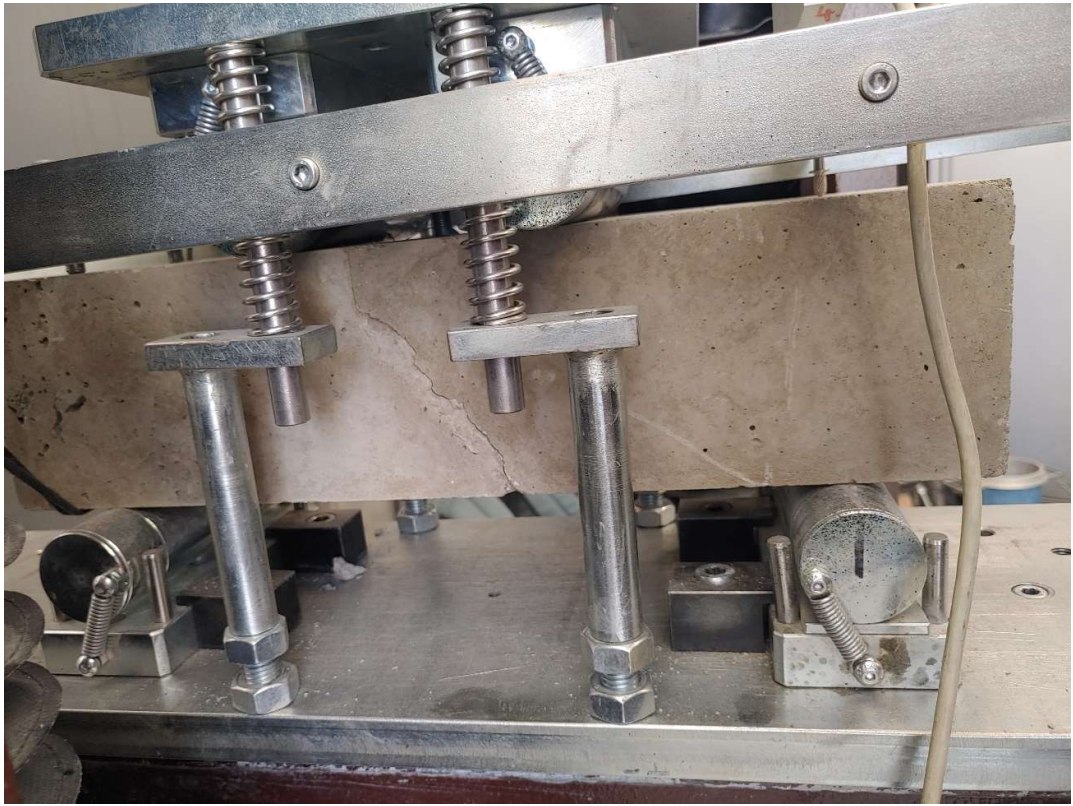




### 3.4 Skupina BS3



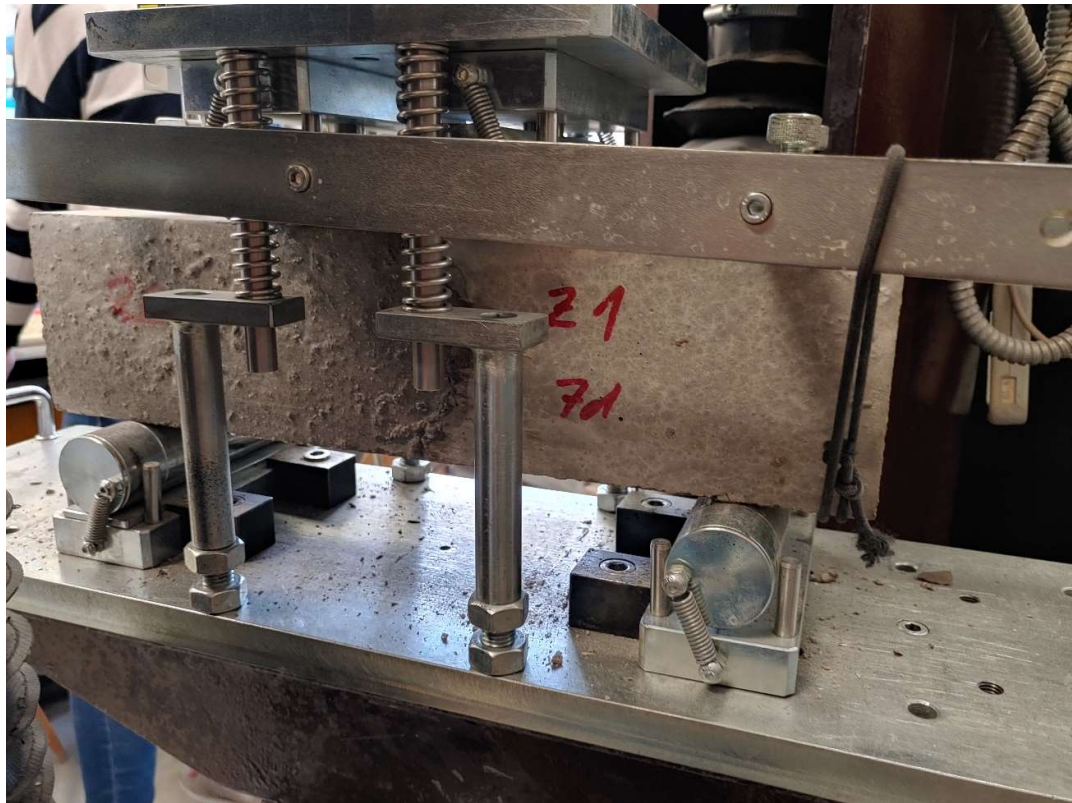








### 3.5 Skupina Z



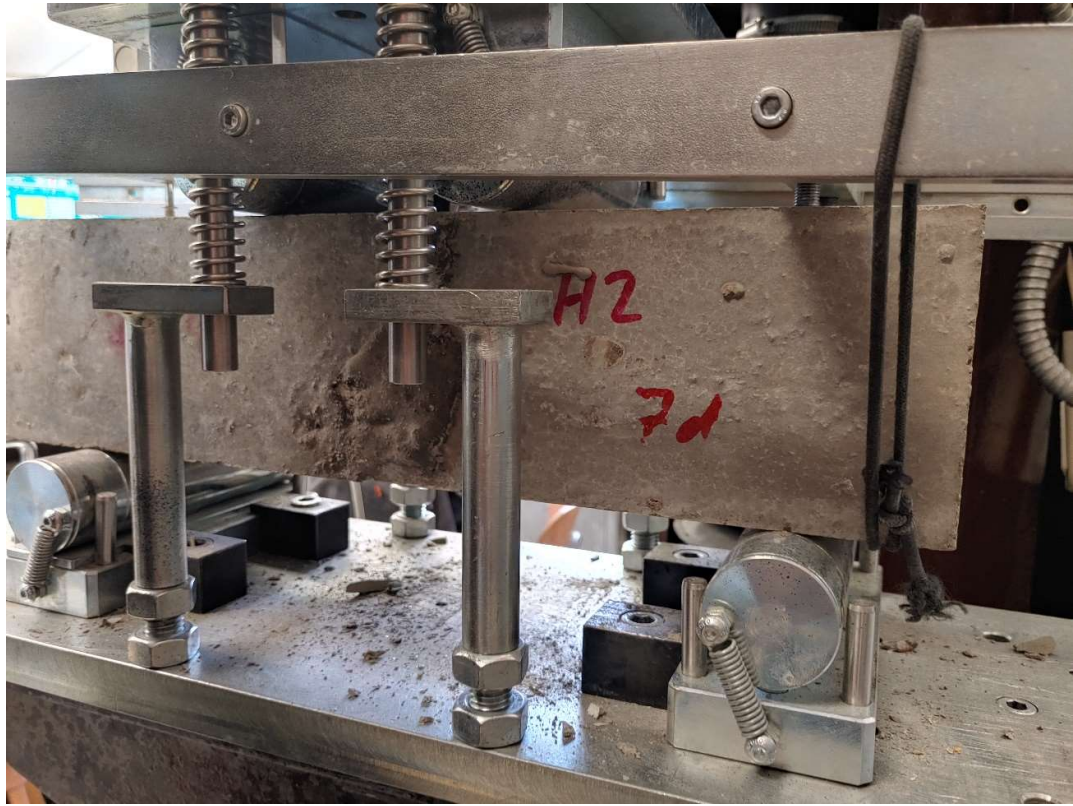




### 3.6 Skupina H













### 3.7 Skupina D









