

# NÁVRH, POPIS A VYHODNOCENÍ ÚNAVOVÉ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY PŘEDEM PŘEDPJATÉHO PANELU SPIROLL

*Miklas Petr, \**

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
petr.miklas@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Príspevek se zabývá návrhem, popisem, a především vyhodnocením provedené únavové zatěžovací zkoušky. Motivací k realizaci takovéto zkoušky je ověření platnosti a použitelnosti autorem navržené metody přímého využití Wöhlerových křivek, která umožňuje stanovení počtu cyklů do porušení betonové konstrukce. Únavová zatěžovací zkouška byla provedena na předem předpjatém dutinovém panelu SPIROLL pomocí čtyřbodového ohybu. Návrh zkoušky byl proveden podle autorem navržené metody dle uvedené metodiky tak, aby po dokončení zkoušky mohl být předpoklad porovnán se skutečností. Během zkoušky byla měřena poměrná přetvoření pomocí tenzometrů a průhyb konstrukce po celou dobu zatěžování panelu. Následně byl vyhodnocen jak průhyb, tak především napětí v průřezu vzniklá během zatěžování. Ta byla porovnána s předpokládanými hodnotami stanovenými výpočtem včetně skutečného počtu cyklů do porušení konstrukce. Zkouška byla ukončena kolapsem konstrukčního prvku.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Únava betonu • Únavová zatěžovací zkouška • Vyhodnocení únavové zatěžovací zkoušky • Wöhlerovy křivky

## ABSTRACT

The paper deals with the design, description and above all evaluation of the fatigue load test. The motivation for the implementation of such a test is to verify the functionality and feasibility of the author's proposed method of direct use of Wöhler curves, which allows the determination of the number of cycles to failure of the concrete structure. The fatigue loading test was performed on a pre-stressed SPIROLL cavity panel using a four-point bending test. The design of the test was carried out according to this methodology so that the assumption could be compared with reality after the test was completed. During the test, the relative deflections were measured using strain gauges and the deflection of the structure throughout the panel loading period. Subsequently, both the deflection and, in particular, the stresses in the cross-section developed during loading were evaluated and

compared with the predicted values determined by the calculation, including the actual number of cycles to failure of the structure. The test was terminated by the collapse of the structure.

## KEYWORDS

Fatigue of concrete • Fatigue load test • Evaluation of fatigue loading test • Wöhler curves

## 1. ÚVOD

Príspevek je zaměřen na návrh, popis a především vyhodnocení únavové zatěžovací zkoušky předem předpjatého panelu SPIROLL. Účelem realizace této únavové zatěžovací zkoušky je ověření funkčnosti autorem navržené metody přímého využití Wöhlerových křivek pro stanovení počtu cyklů do porušení betonových konstrukcí.

V první části článku je popsána úprava zkoušeného panelu SPIROLL, uspořádání zkoušky a návrh jejího průběhu.

Hlavní částí příspěvku je podrobné vyhodnocení provedené únavové zatěžovací zkoušky. Vyhodnocení je provedeno pomocí metody přímého využití Wöhlerových křivek. Je porovnán stanovený počet cyklů do porušení konstrukce dle autorem navržené metodiky se skutečným počtem cyklů až do kolapsu konstrukce. Dále byl porovnán skutečný průhyb konstrukce s výpočtovou hodnotou průhybu. V závěru je v příspěvku vyhodnoceno napětí v konstrukci během realizované únavové zatěžovací zkoušky.

## 2. ÚNAVOVÁ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA PŘEDPJATÉHO PANELU SPIROLL

Kapitola se zabývá popisem a vyhodnocením provedené únavové zatěžovací zkoušky předem předpjatého panelu SPIROLL. Tato zkouška byla realizována v roce 2023 za podpory grantového projektu SGS23/036/OHK1/1T/11 jehož řešitelem byl autor.

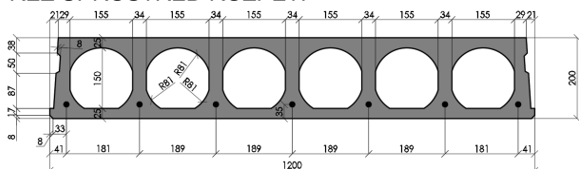
### 2.1. Nastavení únavové zatěžovací zkoušky předpjatého panelu SPIROLL

\* Školitel: doc. Ing. Iva Broukalová, Ph.D.

Konstrukčním prvkem, který by podroben cyklickému zatěžování byl prefabrikovaný předpjatý panel SPIROLL.

Panel byl standardní šířky 1200 mm se šesti dutinami. Výška panelu byla 200 mm. Dutiny byly ve vzdálenosti do 1000 mm od čel panelu zabetonovány, aby nedošlo k porušení smykem. Příčný řez panelem uprostřed rozpětí je zobrazen na obr. 1.

ŘEZ UPROSTŘED ROZPĚTÍ



Obrázek 1: Řez panelem SPIROLL uprostřed rozpětí

Panel je vyroben z betonu C 40/50 a předepnut sedmi sedmidrátovými lany jmenovitého průměru 12,5 mm. Průřezová plocha jednoho lana je 93 mm<sup>2</sup>. Celková plocha lan byla 651 mm<sup>2</sup>. Lana byla zhotovena z oceli ST – 1570/1770 – 12,5 Relax 2. Výrobce panelu byla PREFA PRAHA a.s. [2]. Vstupní data pro statický výpočet byla převzata z technického listu výrobce [3] a statického výpočtu dodaného výrobcem panelu [4].

Pro realizaci únavové zatěžovací zkoušky bylo zvoleno Výzkumné a testovací centrum materiálů SVÚM a.s. v Čelákovicích u Prahy. [1] Zkouška byla provedena v tamní dynamické zkušebně pod vedením pana Ing. Armina Delonga. Na základě statického výpočtu s únavovým posouzením bylo navrženo jak schéma, tak postup zatěžování panelu. Návrh únavové zatěžovací zkoušky a její průběh byl důkladně konzultován se zkušební laboratoří ve SVÚM a.s.

Pro namáhání konstrukce bylo zvoleno zatěžování čtyřbodovým ohybem. Tento způsob byl navržen z důvodu dosažení maximálního ohybového momentu na co největší části průřezu.

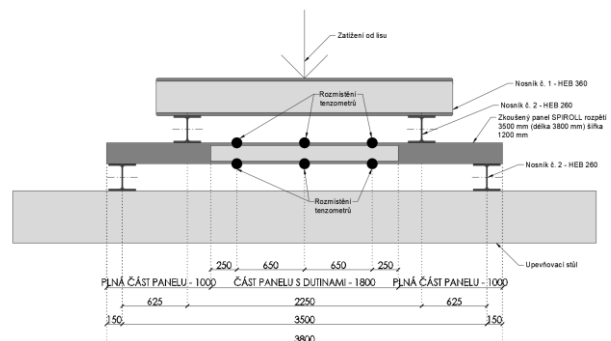
Celková délka panelu činila 3800 mm, rozpětí podpor bylo 3 500 mm. Dutiny byly do vzdálenosti 850 mm od podpor zabetonovány. Zatěžovací síly byly vnašeny symetricky ve vzdálenosti 625 mm od osy podpor. Důvodem částečného zabetonování dutin bylo vyloučení porušení panelu smykem.

Na panel osazeno celkem deset tenzometrů. Jednalo se o tenzometry LY11-120-6. Výrobce tenzometrů byla německá firma HBK - Hottinger Brüel & Kjaer GmbH z Darmstadtu. Všechny tenzometry byly umístěny mezi dvě síly působící na panel. Na horní i dolní povrch panelu bylo umístěno pět tenzometrů.

Zatěžovací síla byla do panelu distribuována pomocí soustavy HEB profilů. Jednalo se o profily HEB 360 a HEB 260. Jeden profil HEB 360 byl umístěn přímo pod lisem a další dva profily HEB 260 přenášely zatížení do panelu. Potřebná délka podélného HEB profilu byla minimálně 2800 mm. Délka příčných profilů musela být minimálně 1300 mm. Na spodní pásnici profilů HEB 260 (na styku s betonem panelu) byly nalepeny gumové pásky pro dosažení rovnoměrného roznosu

zatížení. Do podélného profilu byla navařena diafragmata (plechy) v místě působíště síly od hydraulického válce a v místě příčných profilů. Podélný profil HEB a příčné profily byly vzájemně svařeny. Jako podpora byly navrženy profily HEB 260 ukotvené k upínací desce lisu. Délka podporových profilů byla 1500 mm. Rozměry upínací desky byly 1874 x 5600 mm.

Schéma únavové zatěžovací zkoušky je zobrazeno na obr. 2.



Obrázek 2: Schéma únavové zatěžovací zkoušky panelu SPIROLL

## 2.2. Způsob zatěžování

Pro cyklické zatěžování panelu SPIROLL byl zvolen lis umožňující vyvinutí síly až 500 kN, což bylo pro panel SPIROLL dostatečné. Jednalo se o hydraulický válec AH500 – 250 INOVA. Výrobce hydraulického válce byla firma Inova Praha s.r.o. Fotografie hydraulického válce s panelem, na kterém byla prováděna únavová zatěžovací zkouška je zobrazena na obr. 3.



Obrázek 3: Fotografie zachycující upnutý panel v lisu před zahájením únavové zatěžovací zkoušky

Před zahájením samotné únavové zatěžovací zkoušky bylo nutné navrhnout její průběh a přizpůsobit jej časovým a finančním možnostem experimentu. Finanční prostředky umožnily provedení únavové zatěžovací zkoušky během jednoho týdne. Tomu musel být přizpůsoben i počet cyklů do porušení konstrukce. Nejprve byl proveden výpočet potřebné síly v lisu pro navržení optimálního průběhu únavové

zatěžovací zkoušky. Pro zajištění porušení únavovým zatížením byl proveden přepočít panelu v programu IDEA StatiCa. Posouzeny byly dva průřezy, a to průřez uprostřed rozpětí (s dutinami) a průřez v ose uložení (plný průřez). Plný průřez byl ověřen především z důvodu ověření smykové únosnosti. V programu IDEA StatiCa byl posouzen průřez i na únavu. Zatížení (ohybový moment) bylo nastaveno tak, aby využití únavy bylo přesně na 100 %. Tím byl zjištěn normový únavový limit průřezu. Výsledný limitní ohybový moment  $M_{Ed}$  vyšel 91,8 kNm. Tomuto ohybovému momentu odpovídá síla v hydraulickém válci 277,50 kN. Do ohybového momentu je započítána vlastní tíha panelu, tíha roznašecích profilů a síla v hydraulickém válci.

Vzhledem k výsledkům posouzení bylo rozhodnuto, že velikost síly v hydraulickém válci na začátku únavové zatěžovací zkoušky bude 225 kN. Tato hodnota byla stanovena výpočtem pomocí metody přímého využití Wöhlerových křivek. Dle provedeného výpočtu by tato hodnota neměla být hraniční a zároveň by neměla být příliš nízká, aby byla úplně bezvýznamná. V horních vláknech byl zjištěn stálý mírný přítlak tak, aby v těchto vláknech nedocházelo k tahovému namáhání betonu například od předpětí. Tímto výpočtem byl navržen průběh únavové zatěžovací zkoušky v závislosti na počtu cyklů do porušení konstrukce pro jednotlivé úrovně zatížení.

Předpokládaná maximální hodnota napětí v horních vláknech v tlaku při kolapsu konstrukce je přibližně 12 MPa (síla v lisu 306 kN). Tato hodnota odpovídá totiž kumulativnímu poškození panelu dle Palmgren-Minerova pravidla  $D = 1$ .

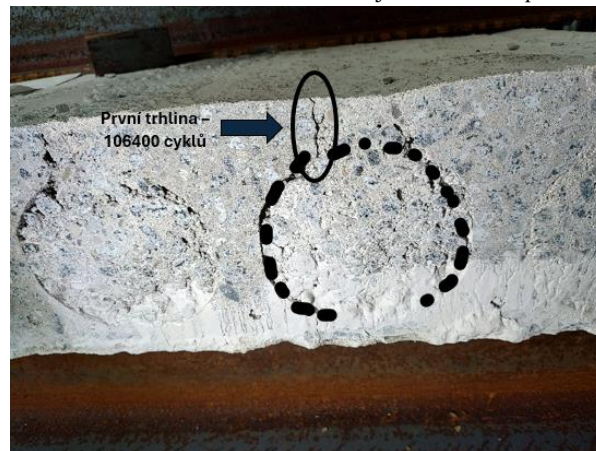
Frekvence zatěžování byla na počátku navržena 5 Hz. Tato frekvence byla navržena odborníky ze SVÚM a.s. v závislosti na předpokládaném průhybu konstrukce, který byl stanoven autorem statického výpočtu. Zatěžování bylo rozvrženo do pěti dní dle finančního rozpočtu. Bylo navrženo, že každý den proběhne 99000 cyklů. Z provedeného výpočtu je patrné, že předpokládaný kolaps konstrukce dle kumulativního poškození dle Palmgren-Minerova pravidla byl očekáván na začátku cyklování se silou v hydraulickém válci 306 kN (přibližně po 2000 cyklech této úrovně zatížení). Při posouzení normovými metodami byl předpoklad kolapsu konstrukce při 277,5 kN.

### 2.3. Průběh zkoušky

K zahájení únavové zatěžovací zkoušky došlo v úterý 28.11.2023. Tento den bylo realizováno dle předpokladu všech 99000 cyklů do úrovně zatížení 245 kN bez problému.

Druhý den zkouška pokračovala. K první trhlině došlo po 106400 cyklech, což odpovídá síle v hydraulickém válci 250 kN. Jednalo se o podélnou trhlinu vedoucí od čela panelu směrem do jeho středu při horním povrchu. Tato trhlinka je zachycena na fotografii na obr. 4. Důvodem vzniku této trhlinky je rozdílné stříání betonu panelu a dobetonovaných dutin. Další tenké trhlinky, tentokrát příčné, vznikly při dolním povrchu mezi aplikovanou silou z hydraulického válce a podporou. Ke vzniku těchto trhlin došlo po dosažení 153000

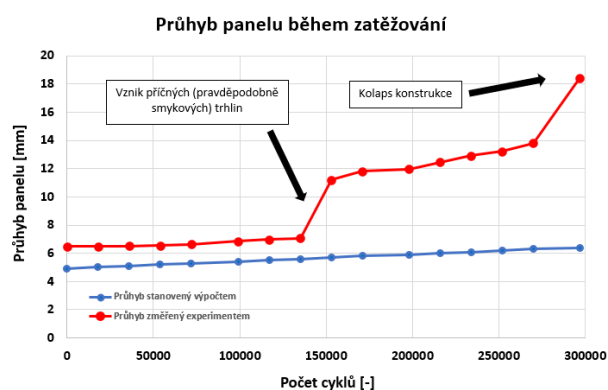
cyklů (síla v hydraulickém válci 260 kN). Tyto trhlinky vznikly pravděpodobně důsledkem cyklického smykového namáhání. V této fázi byla snížena frekvence zatěžování z 5 Hz na 3 Hz a následně na 2 Hz z důvodů stálého zajištění mírného přítlaku.



Obrázek 4: Fotografie první trhliny na nosniku po 106400 cyklech

Třetí den zkouška pokračovala bez přerušení až skoro do dokončení všech dalších 99000 cyklů. Ovšem těsně před koncem, po 296106 cyklech (maximální síla v hydraulickém válci 295 kN), došlo k destrukci panelu SPIROLL.

Na obr. 5 je zobrazen graf znázorňující průběh průhybu panelu během zatěžování. V grafu jsou uvedeny dvě křivky. Modrá křivka znázorňuje průhyb stanovený výpočtem v programu SCIA Engineer a červená křivka znázorňuje skutečný průhyb konstrukce během zatěžování v závislosti na již aplikovaném počtu cyklů na konstrukci.



Obrázek 5: Graf znázorňující porovnání vypočteného a skutečného průhybu konstrukce během zatěžování

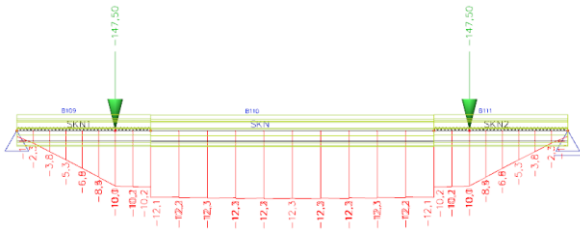
Z grafu je jasné vidět, že při dosažení již zmiňovaných 153000 cyklů (síla v hydraulickém válci 260 kN) došlo ke vzniku příčných trhlin a tím ke snížení tuhosti a ke zvýšení průhybu panelu. Z důvodu zvýšení průhybu musela být snížena frekvence zatěžování panelu. Celkově je z grafu průhybu patrné, že vypočtený průhyb je i v prvních 140000 cyklech při plné tuhosti nižší, což je pravděpodobně dáno

nedokonalým probetonováním dutin panelu v krajních částech.

Ke kolapsu konstrukce došlo při maximální hodnotě síly v hydraulickém válci 295 kN.

#### 2.4. Vyhodnocení zkoušky

Předpokládaný kolaps konstrukce měl nastat dle provedeného výpočtu počtu cyklů do porušení konstrukce pomocí přímého využití Wöhlerových křivek a následně po naakumulování poškození dle Palmgren-Minerova pravidla při maximální síle v hydraulickém válci 306 kN, což odpovídá hodnotě napětí v tlaku přibližně 12 MPa. Výpočtový průběh napětí v horních vláknech před kolapsem konstrukce je zobrazen na obr. 6. Skoková změna napětí je patrná v místě styku částí bez dutin a s dutinami. Maximální napětí v tlaku v horních vláknech nosníku dosahovalo před kolapsem konstrukce hodnoty 12,3 MPa.



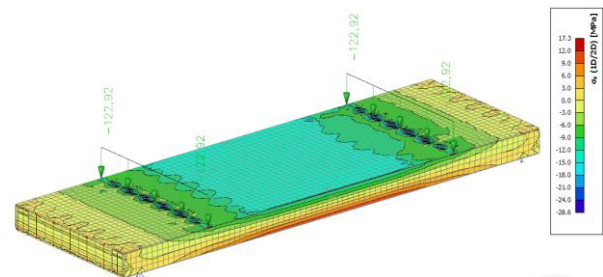
Obrázek 6: Průběh maximálního napětí v horních vláknech v tlaku po délce nosníku před kolapsem konstrukce

Rozdíl výpočtem stanovené předpokládané maximální síly v hydraulickém válci a experimentem činí přibližně 4 %. Kumulativní poškození dle Palmgren-Minerova pravidla bylo při kolapsu konstrukce –  $D = 0,43$ . Odchylka 4 % v silách v hydraulickém válci mezi výpočtem a experimentem je velmi malá. Ovšem při stanovení kumulativního poškození dle Palmgren-Minerova pravidla je patrné, že vyšší síly způsobí významně vyšší poškození. Ke kolapsu konstrukce došlo oproti předpokladu, kdy  $D = 1$  bylo při síle v lisu 306 kN, již při síle v lisu 295 kN, kdy bylo kumulativní poškození pouze  $D = 0,43$ . Na obr. 7 je fotografie po kolapsu konstrukce. Vodorovná trhlinka, která vede rovnoběžně s horním povrchem ve vzdálenosti 4 – 5 cm mezi oběma silami, vznikla pravděpodobně vlivem únavového zatěžování v důsledku kombinace ohybu a smyku (vliv tzv. smykové štíhlosti). Zároveň dle obr. 6 je právě v tomto místě dosaženo maximálního napětí při horním povrchu vlivem skokové změny tuhosti průřezu. Před kolapsem konstrukce vzniklo v panelu několik podélných trhlin při horním povrchu u obou podpor. Jejich vznik je zapříčiněn pravděpodobně nedokonalou soudržností mezi betonem panelu a betonem probetonovaných dutin, jelikož se jedná o betony různého stáří.



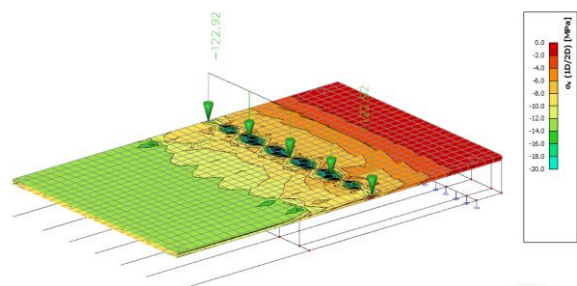
Obrázek 7: Fotografie panelu po dokončení únavové zatěžovací zkoušky (při kolapsu konstrukce) – Pohled v místě síly od hydraulického válce do pole

V závěru vyhodnocení byl vytvořen 3D deskový model panelu pro ověření průběhu napětí v panelu před kolapsem. V programu SCIA Engineer byl vytvořen 3D deskostěnový model, který byl následně zatížen silou do lisu (cyklického zatížení) těsně před kolapsem konstrukce. Na obr. 8 je zobrazen 3D průběh napětí od cyklického zatížení v panelu před kolapsem konstrukce.



Obrázek 8: Obrázek 75: 3D průběh napětí v panelu těsně před kolapsem konstrukce

Z obr. 8 je patrné, že maximálního napětí je dosaženo v místě přímo pod působící silou. Zde se jedná ovšem pouze o tlakové napětí v místě plného průřezu. Výraznější skok napětí je patrný na styku částí s dutinami a plného průřezu s dobetonovanými dutinami. Detailnější pohled na průběh napětí v panelu je zobrazen na obr. 9. Zobrazena je pouze polovina panelu, druhá polovina je identická. V obr. 9 je znázorněn průběh napětí pouze v horní části průřezu.



Obrázek 9: 3D průběh napětí v horní desce panelu těsně před kolapsem konstrukce

Z obr. 9 je patrné, že tlakové napětí při horním povrchu se výrazně mění v místě styku části bez dutin a s dutinami. Ve střední části je napětí obdobné jako v obr. 6, tedy přibližně 12,3 MPa. Místo, kde dolšsko ke kolapsu konstrukce (styk části s dutinami a části s dobetonovanými dutinami) lze očekávat z důvodu výrazné změny tuhosti konstrukce.

### 3. ZÁVĚR

Za podpory grantového projektu byla provedena únavová zatěžovací zkouška předem předpjatého panelu SPIROLL. Autor článku zkoušku navrhl a provedl. Účelem provedení únavové zatěžovací zkoušky bylo ověření funkčnosti navržené metody přímého využití Wöhlerových křivek. Panel byl vyroben ve firmě Prefa Praha, a.s. Zkouška byla provedena ve Výzkumném a testovacím centru materiálů SVÚM a.s.

Z provedené únavové zatěžovací zkoušky vyplývá, že stanovení skutečné únavové odolnosti konstrukce je velmi náročné, a že do výpočtu vstupuje řada parametrů, které lze jen velmi těžko surčitostí stanovit. Jedná se především o skutečnou únavovou odolnost konstrukce a v praxi o stanovení skutečného únavového zatížení konstrukce. Vzhledem k odchylce ve velikosti síly v hydraulickém válci stanovené výpočtem metodou přímého využití Wöhlerových křivek a skutečností, která činila 4 % lze říci, že tato metoda je funkční a lze ji využít pro stanovení počtu cyklů do porušení betonových konstrukcí únavovým (cyklickým) zatížením. Dále lze na základě výsledku zkoušky konstatovat, že konstrukce, u kterých po délce dochází ke skokové změně tuhosti průřezu, jsou vůči únavovému zatížení výrazně náchylnější než konstrukce konstantního nebo lineárně se měnícího průřezu po celé délce. Často pak dochází k poruše nebo kolapsu konstrukce právě v místě změny tuhosti i přesto, že v daném místě nejsou maximální hodnoty vnitřních sil a napětí. Závěrem lze také říci, že konstrukce, jež jsou dodatečně dobetonovávány (například dobetonování dutin panelu) jsou také náchylnější vůči cyklickému zatěžování, což potvrzuje vznik podélných trhlin v panelu v místě styku betonů různého stáří.

### PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za podpory SGS 2023 a SGS 2024; článek je navázán na projekt SGS25/038/OHK1/1T/11 Konstrukce z moderních cementových kompozitů a jejich optimalizace. Dále je poděkování věnováno doc. Ing. Ivě Broukalové, Ph.D. a doc. Ing. Marku Foglarovi, Ph.D. za jejich odborné vedení a užitečné rady při zpracování tohoto článku.

### Reference

- [1] SVÚM, a.s., *Výzkumné a testovací centrum materiálů*
- [2] Prefa Praha, a.s., *Prefabrikovaný předpjatý panel PSP200*
- [3] *Technický list: Předpjatý dutinový panel PARTEK tl. 200 mm, PREFA PRAHA a.s.*

- [4] *Posouzení předpjatého dutinového panelu PARTEK PDP 200/0/7, KBS – inženýrská projektová kancelář s.r.o., 2008*