



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

# ANALÝZA ZESILOVÁNÍ ŽELEZOBETONOVÝCH DESEK S OHLEDEM NA MEZNÍ STAV PROTLAČENÍ

ANALYSIS OF STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE SLABS AGAINST  
PUNCHING SHEAR

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ing. Jan Nováček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.**

**BRNO 2018**

**Klíčová slova:**

beton, protlačení, zesilování, nelineární analýza, dodatečná hlavice, dodatečná smyková výztuž.

**Keywords:**

concrete, punching shear, nonlinear analysis, additional column head, post-installed shear reinforcement.

© Jan Nováček, 2018

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Ústav betonových a zděných konstrukcí

# OBSAH

1 ÚVOD .....	5
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....	6
2.1 Historický vývoj a motivace .....	6
2.2 Únosnost v protlačení .....	7
3 ZPŮSOBY ZESILOVÁNÍ.....	7
4 ANALÝZA ZESILOVÁNÍ V PROTLAČENÍ NELINEÁRNÍMI MODELY ....	9
5 ZESÍLENÍ DODATEČNOU BETONOVOU HLAVICÍ A JEJÍ DLOUHODOBÝ MONITORING .....	13
6 TECHNOLOGIE DODATEČNÉHO ZESÍLENÍ ZÁKLADOVÉ KONSTRUKCE SMYKOVOU VÝZTUŽÍ .....	15
6.1 Technologický postup .....	18
6.2 Dlouhodobé měření .....	19
7 ZÁVĚR.....	20
7.1 Shrnutí práce .....	20
7.2 Doporučení pro další výzkum a vývoj .....	22
8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	22
CURRICULUM VITAE .....	25
ABSTRAKT .....	27
ABSTRACT .....	27



# 1 ÚVOD

V současném moderním stavitelství je kladen velký důraz na konstrukční systémy budov, které musí na jedné straně splnit vysoké nároky na univerzální řešení pro vnitřní prostory a zároveň být jednoduché na provádění i být ekonomicky efektivním řešením. Železobetonové stropní desky podepřené lokálně v místech sloupů tyto nároky splňují, a proto jsou častou volbou pro řešení základního nosného systému. Nespornou výhodou je otevřená a variabilní dispozice bez jakéhokoliv omezení na vodorovné vedení technologií. Spolehlivost celého systému pak závisí na detailu přenosu smyku z desek do sloupů. Pokud není tento detail řádně navržen, může dojít až k fatálním následkům v podobě kolapsu konstrukce. Porušení protlačením, jak je tento jev nazýván, nemá duktilní charakter (na rozdíl od ohybového porušení železobetonu), který je provázen vizuálními i zvukovými signály před samotným kolapsem konstrukce. Protlačení má charakter křehkého porušení, kdy dojde ke kolapsu náraz a bez průvodních jevů.

Řešení problematiky protlačení se netýká pouze stropních desek, ale mezi konstrukce náchylné na porušení v místě velké koncentrace smykové síly na malé ploše patří také základové desky, které jsou lokálně zatěžovány konstrukcemi nad nimi. V mostním stavitelství je protlačení zohledňováno například u pilotových základů a také u deskových mostů s bodovým podepřením na podpěrách. Ve větší míře se však s protlačením setkáváme u konstrukcí pozemních staveb.

Řada budov v současné době prochází obnovou často spojenou s novým způsobem využití, který obvykle přináší změnu, resp. nárůst zatížení. Proto je třeba věnovat zvýšenou pozornost posudkům na protlačení.

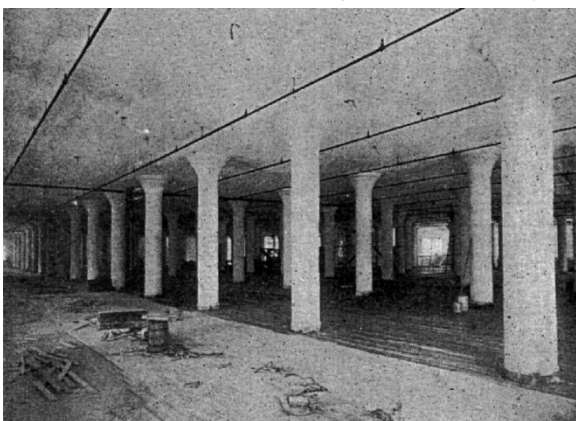
Disertační práce je tematicky zaměřena na způsoby zvýšení únosnosti betonových desek v protlačení vhodným návrhem sanačního opatření. Škála možných řešení vedoucí ke zvýšení únosnosti je velmi pestrá. V úvodní části práce je věnována pozornost současnému intenzivnímu světovému výzkumu v této oblasti. Vlastní výzkumná práce je zaměřena především na problematiku robustního zvýšení únosnosti v protlačení, které dosahuje až několikanásobku původní únosnosti. První část spočívá v podrobné analytické studii zesilování konstrukcí, která následně sloužila jako podklad pro návrh reálných opatření na skutečné konstrukci, kde byly předpoklady ověřeny na řadě měření. Další část je věnována zesilování konstrukcí přístupných z jedné strany jako jsou základové desky. V práci jsou zároveň dokumentovány i poznatky z provádění sanace doplněné o sumarizovaná doporučení pro vhodný a bezpečný návrh zesílení.

Tato práce si tedy bere za cíl vysvětlení sanace protlačení z více komplexního pohledu, který se nesoustředí pouze na jeden způsob zesílení, ale dává ucelený obraz o možnostech zesílení konstrukcí na protlačení.

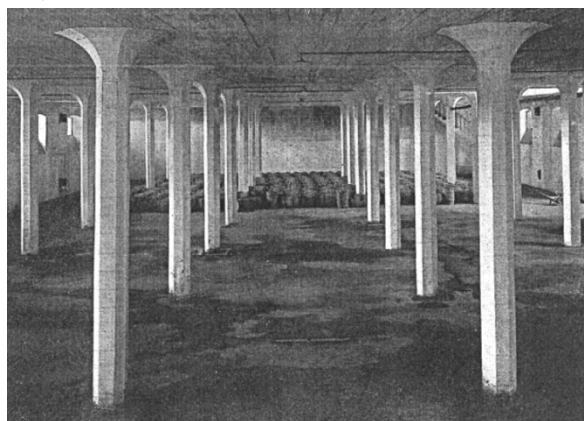
## 2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

### 2.1 HISTORICKÝ VÝVOJ A MOTIVACE

Počátky lokálně podepřených stropních konstrukcí se datují na začátek 20. století, kdy se objevily první železobetonové desky bez podporujících průvlaků, čímž se dosáhlo výrazné prostorové úspory. Jednou z významných osobností byl *Claude Allen Porter Turner* (1869-1955), který se jako jeden z prvních zasloužil o realizaci stropní desky podepřené pouze v místě napojení na železobetonové sloupy v USA, Obr. 1. Ve stejném období se v Evropě věnoval inovativním konstrukcím ze železobetonu *Robert Maillart* (1872-1940). Jeho konstrukce byly v porovnání s Turnerovými méně robustní a na tehdejší dobu se vyznačovaly velmi subtilním řešením, Obr. 2.



*Obr. 1 Pohled na konstrukci od C.A.P. Turner, součástí dobové reklamy [1]*



*Obr. 2 Skladiště společnosti Gerhard & Hey v Petrohradě, Robert Maillart [1]*

Porušení protlačením podpory skrz desku nemá duktilní charakter, jak je tomu například u ohybového porušení. Před samotným porušením tak nemusí docházet k průvodním jevům, které by ukazovaly na přetížení konstrukce. K protlačení desky tak může dojít naráz. V post-kritickém chování konstrukce dochází k přerozdělení sil v desce, což může zapříčinit řetězovou reakci a selhání sousedních detailů napojení sloupu na desku. Při kolapsu několika sousedních podpor tak může dojít ke zřícení konstrukce níže, čímž se přitíží konstrukce pod ní, Obr. 3. Pokud konstrukce neodolá tomuto zatížení, vznikne tak řetězové zřícení řady desek ve svislém směru. Obr. 4.



*Obr. 3 Havárie Pipers Row Car Park, Wolverhampton, Anglie, 1997 [2]*



*Obr. 4 Havárie polyfunkčního komplexu Trinity, Bratislava, 2012 [3]*

Velmi důležité je věnovat zvýšenou pozornost stávajícím konstrukcím. Tyto konstrukce byly navrženy podle soudobých standardů, které však nemusejí již odpovídat současnému stavu poznání. Často se také setkáváme se situací, kdy stávající budova má změnit svůj účel využití a s tím je zpravidla spojené zvýšení zatížení. Obvykle pak dochází k situaci, kdy je nevyhnutelné navrhnout sanaci konstrukce v protlačení, jelikož by jinak nebyl umožněn její bezpečný provoz.

## 2.2 ÚNOSNOST V PROTLAČENÍ

Stanovení únosnosti v protlačení železobetonových konstrukcí je momentálně prováděno v Evropě (pro členy CEN - *Comité Européen de Normalisation*) pomocí platné EN 1992-1-1 [4], resp. se zohledněním národních aplikačních dokumentů dílčích států. Přístup této normy k určení únosnosti v protlačení je na základě empirického vzorce reflektujícího statisticko-pravděpodobnostní modely.

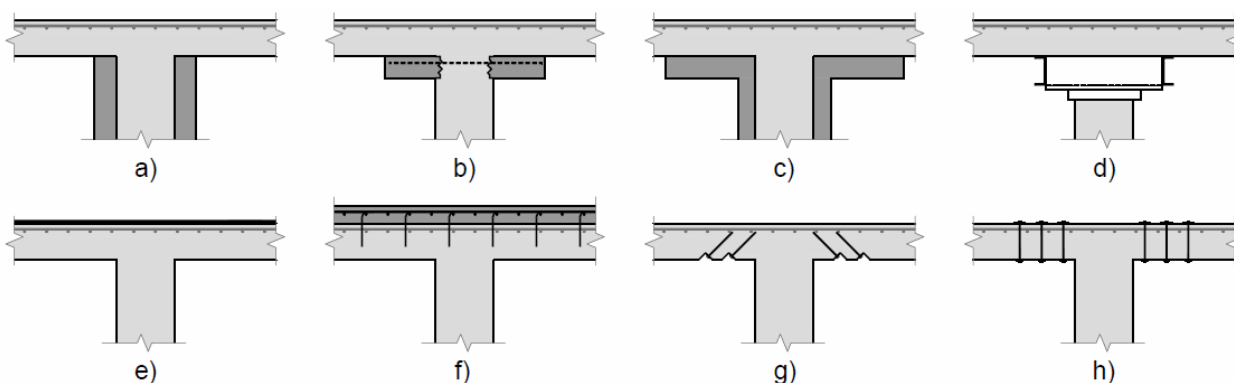
V současné době se do popředí dostává přístup stanovení únosnosti v protlačení pomocí přístupu s fyzikálně mechanickým základem nazývaným jako *Critical Shear Crack Theory* [5]. Následně byla tato teorie zakomponována do Model Code 2010 [6], který vydala mezinárodní federace *fib (Fédération internationale du béton)* a má za cíl reflektovat nejnovější poznatky pro navrhování betonových konstrukcí.

Na aktuální vědecké přístupy reaguje vývoj i EN 1992-1-1, kde se momentálně připravuje komplexní aktualizace často označována jako Eurokódy druhé generace. V části protlačení betonových desek se plánuje zavedení přístupu založeného na upravené verzi Model Code 2010 [7], [8].

Zesilování na protlačení je však většinou prováděno na starších konstrukcích, které nejsou navrženy podle současně platných předpisů. V práci je proto uvedena i posledně platná norma před Eurokódy ČSN (STN) 73 1201:1986 [9].

## 3 ZPŮSOBY ZESILOVÁNÍ

Stručný základní přehled používaných způsobů zesilování stropních desek v protlačení je uveden na Obr. 5.



Obr. 5 Obvyklé způsoby zesilování stropních desek na protlačení:

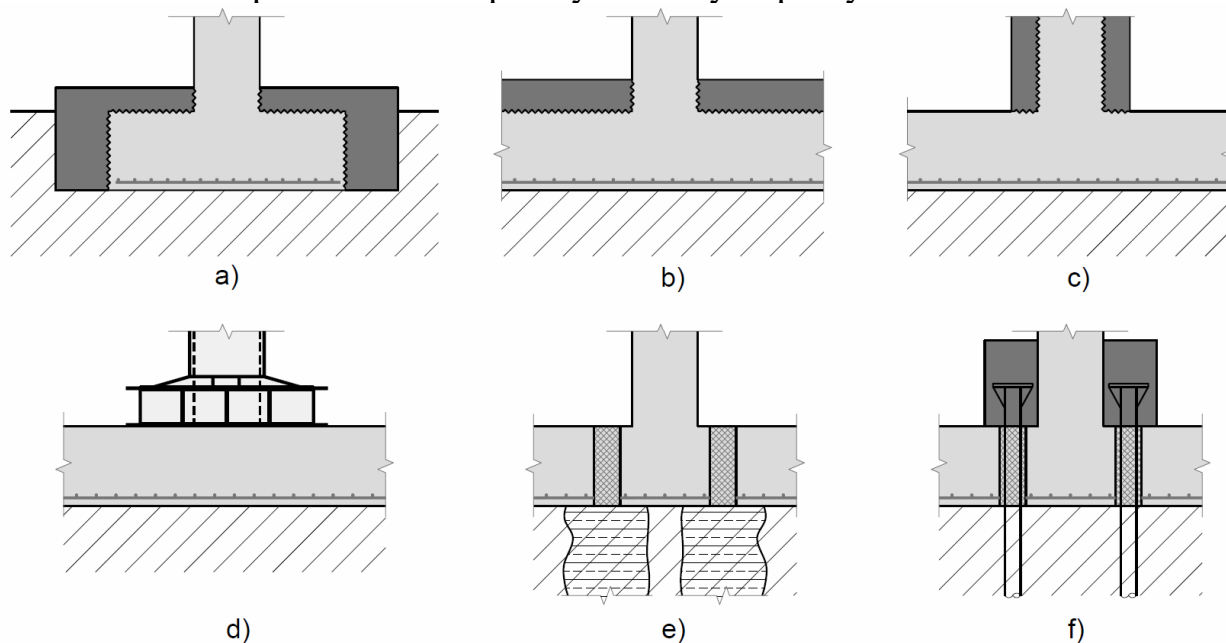
- a) obetonování sloupu, b) dodatečná hlavice, c) obetonování sloupu včetně dodatečné hlavice, d) ocelová hlavice [10], e) zesílení ohybové výztuže desky, f) nadbetonování spřažené desky, g) vlepená šikmá smyková výztuž kotvená ze spodního povrchu desky [11], h) smyková výztuž kotvená z obou povrchů

Zesilování kritického detailu na protlačení lze ze statického hlediska provést de facto čtyřmi různými principy, případně jejich kombinací:

1. Zvětšením obvodu podpory (Obr. 5 a, b, c, d).
2. Posílením podélné tažené výztuže desky (Obr. 5 e, f).
3. Zvětšením efektivní výšky kritického průřezu (Obr. 5 c, f).
4. Doplněním smykové výztuže okolo podpory (Obr. 5 g, h).

Za nepřímý způsob sanace protlačení desek je možné považovat i úpravu statického schématu konstrukce. Jedná se zpravidla o doplnění nových nosných konstrukcí, které sníží působící síly na protlačení.

Na Obr. 6 jsou naznačeny možné varianty zvýšení únosnosti v protlačení pro základové konstrukce, které analogicky odpovídají zesilování stropních desek. Obvyklým způsobům zesilování se vymyká sanace pomocí speciálního zakládání jako je trysková injektáž Obr. 6 e, anebo mikropiloty Obr. 6 f, u kterých se síla působící na protlačení částečně přenáší nově doplněnými nosnými prvky.



Obr. 6 Obvyklé způsoby zesilování základových desek a patek na protlačení:  
a) obetonování a nadbetonování patky, b) nadbetonování desky, c) obetonování sloupu, d) ocelová hlavice [12], e) trysková injektáž, f) podchycení mikropilotami

V rámci disertační práce je zpracována obsáhlá rešerše současného celosvětového výzkumu na téma zesilování betonových konstrukcí na protlačení. Jednotlivé experimentální kampaně jsou porovnány z pohledu zvýšení únosnosti, které jsou zpracovány podle typu sanace do *Tabulky 1*.



Tabulka 1 Porovnání účinnosti různých opatření pro zvýšení únosnosti v protlačení

Způsob zesílení	Maximální zvýšení únosnosti v protlačení
Dodatečná ocelová smyková výztuž nepředepnutá [13]	54 %
Dodatečná ocelová smyková výztuž HILTI HZA-P [11]	73 %
Dodatečná ocelová smyková výztuž předepnutá [14]	65 %
Dodatečná ocelová smyková výztuž (šrouby do betonu) [15]	65 %
Dodatečná GFRP smyková výztuž [16]	32 %
Dodatečná FRP tkanina jako smyková výztuž [17]	80 %
Ocelové plechy při horním povrchu [18]	39 %
GFRP výztuž v tažené oblasti kotvená na horním povrchu nepředepnutá [19]	95 % <sup>1</sup>
CFRP výztuž v tažené oblasti kotvená na horním povrchu nepředepnutá [20]	18 % (276 % <sup>2</sup> )
CFRP výztuž v tažené oblasti kotvená na horním povrchu nepředepnutá – technologie NSM [21]	14 %
CFRP lamely v tažené oblasti kotvené na horním povrchu nepředepnuté [22]	43 %
CFRP lamely v tažené oblasti kotvené na horním povrchu předepnuté [22]	-22 % <sup>3</sup>
CFRP výztuž v tažené oblasti kotvená na spodním povrchu předepnutá [23]	83 %
Ocelová dodatečná hlavice – Aschwanden Rino Exo [12]	90 %
Ocelová dodatečná hlavice [24]	45 %
Betonová dodatečná hlavice	- <sup>4</sup>

<sup>1</sup> výsledky získané na malých vzorcích s nízkým stupněm vyztužení

<sup>2</sup> zesílení residuální únosnosti v postkritickém působení

<sup>3</sup> došlo ke snížení únosnosti v protlačení

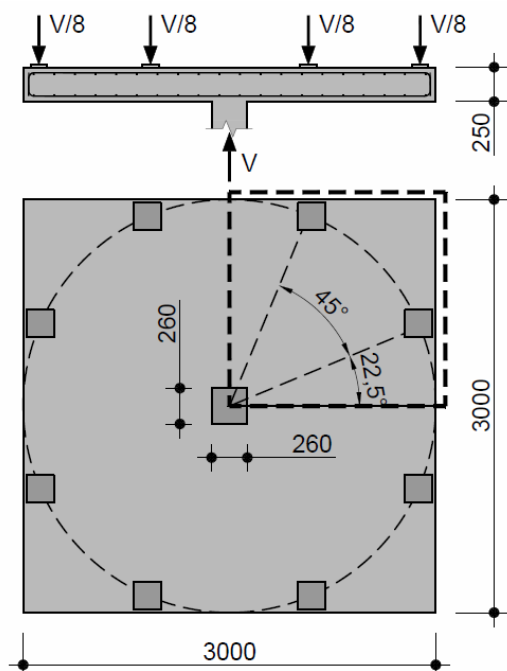
<sup>4</sup> nejsou v současné době publikovány žádné výsledky ze zesilování dodatečnou betonovou hlavicí

#### 4 ANALÝZA ZESILOVÁNÍ V PROTLAČENÍ NELINEÁRNÍMI MODELÝ

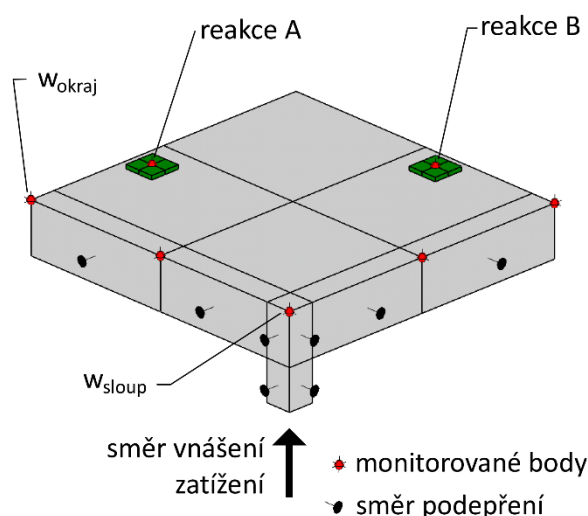
Byl hledán a verifikován vhodný způsob modelování konstrukcí na protlačení. Fenomén protlačení je velmi obtížně vystižitelný řešením lineární úlohy, proto bylo přistoupeno k nelineárnímu řešení. Pro modelování pomocí konečných prvků, v anglické literatuře *Finite Element Method* (FEM), byl použit software ATENA 3D 5.0 [25], který umožňuje zohlednit geometrickou i materiálovou nelinearitu a pracuje s principem lomové mechaniky.

Každý analytický model by měl být validován na skutečných experimentech pro ověření vhodnosti a výstižnosti použitého modelu. Pro účely této práce byl zvolen opačný přístup, ve kterém se vycházelo z proběhlých zkoušek protlačení desek bez smykové výztuže na EPFL, Laussane, Švýcarsko [11], [26].

Analytický model reprezentoval jeden kvadrant zkoušeného vzorku, Obr. 7. Okrajové podmínky byly voleny s ohledem na symetrii konstrukce, aby bylo zajištěno vystižení její spojitosti v navazujících kvadrantech. Ve svislém směru byl model podepřen na horním povrchu a zatížení bylo vnášeno skrze sloup na spodním povrchu. Zatížení bylo vnášeno v souladu s experimenty, kde byl hydraulický lis uprostřed desky, která byla ukotvena přes ocelové tyče do podlahy.



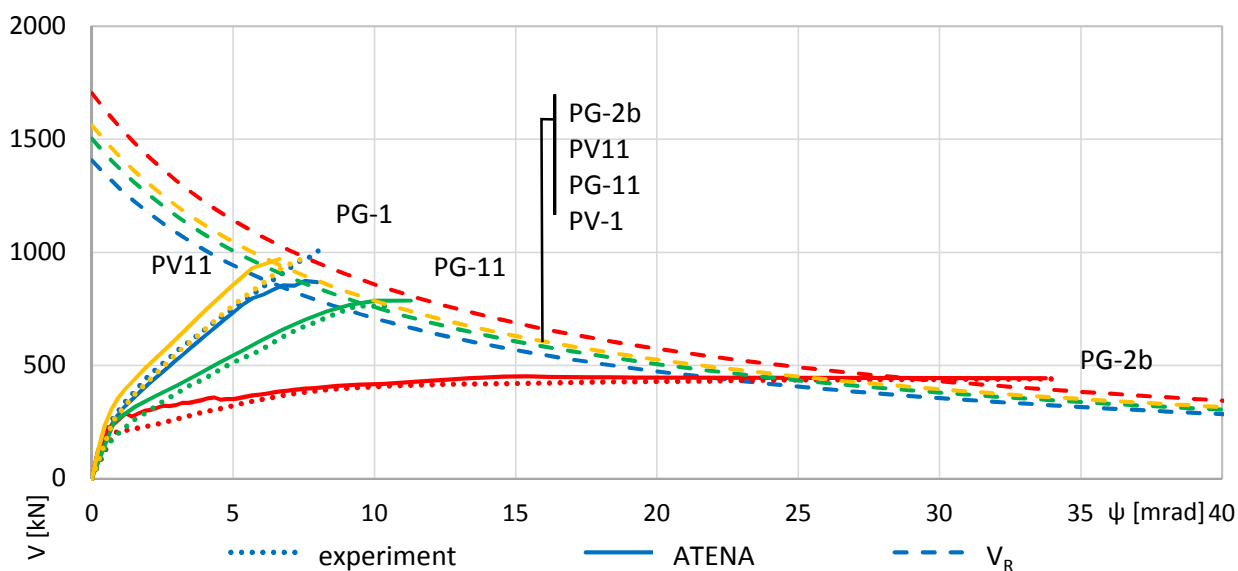
Obr. 7 Geometrie provedených experimentů s vyznačenou vytknutou částí pro nelineární modely



Obr. 8 Schéma modelu pro nelineární analýzu protlačení

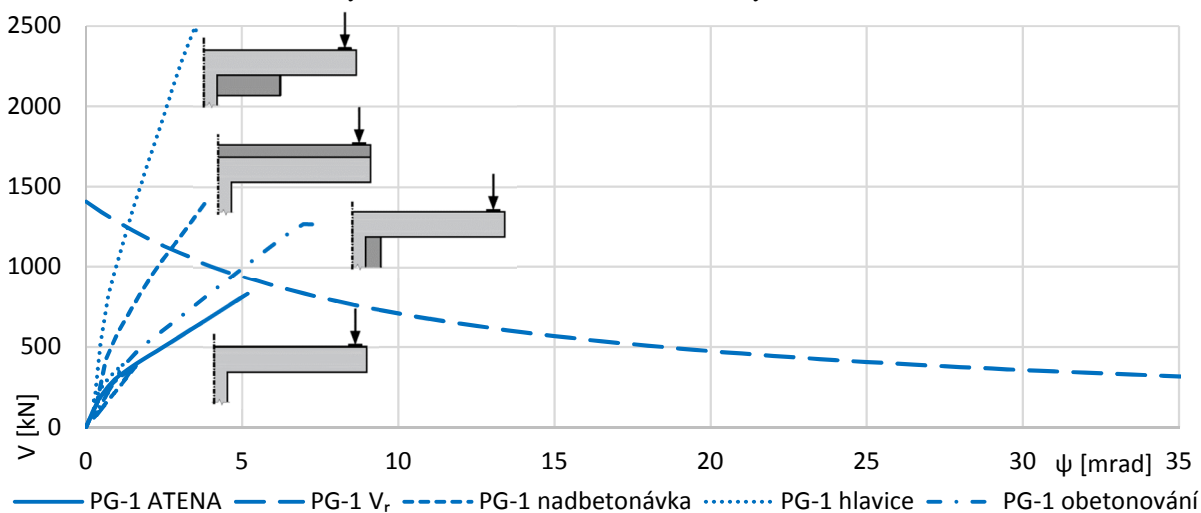
V práci jsou řešeny tři reprezentativní vzorky, které se odlišují stupněm vyztužení podélnou výztuží desky. Záměrně jsou vybrány experimenty s výrazně odlišným stupněm vyztužení, ale zároveň s hodnotami vyskytujícími se v reálné praxi. Jedná se o vzorky PG-1 ( $\rho_l = 1,5 \%$ ), PG-2b ( $\rho_l = 0,25 \%$ ) a PG-11 ( $\rho_l = 0,75 \%$ ).

Porovnání konečných hodnot pootočení desky a absolutní únosnosti získaných experimentálně a z analytických modelů vyznívá pozitivně, jelikož hodnoty mezi sebou dobře korespondují. Důležitějším poznatkem je však průběh závislosti pootočení desky na vnášené síle během zatěžování. Data získané z NLFEM (*Non-Linear Finite Element Model*) modelů jsou porovnány se záznamem ze zkoušek na vzorcích v [11]. Pro všechny zkoumané vzorky, s různým stupněm vyztužení ohybovou výztuží, je trasa křivek vzájemně velmi přibližovaná. Na základě těchto výsledků je možné považovat použitý způsob modelování protlačení za vhodný, jelikož dobře vystihují reálné experimentální zkoušky.

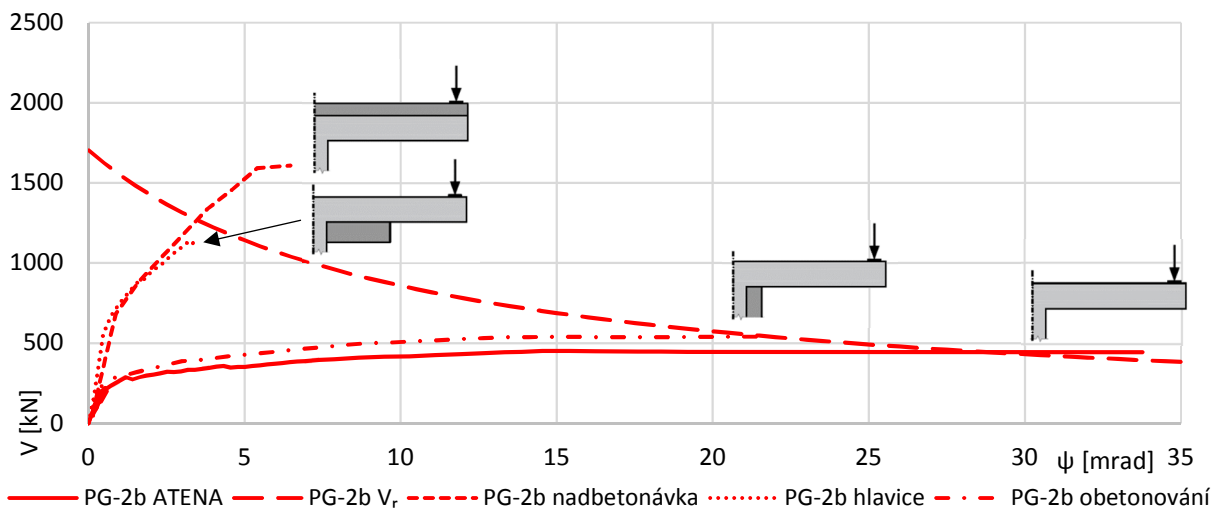


Obr. 9 Porovnání křivek zatížení – pootočení jednotlivých experimentů s analytickými modely a křivky selhání dle CSCT

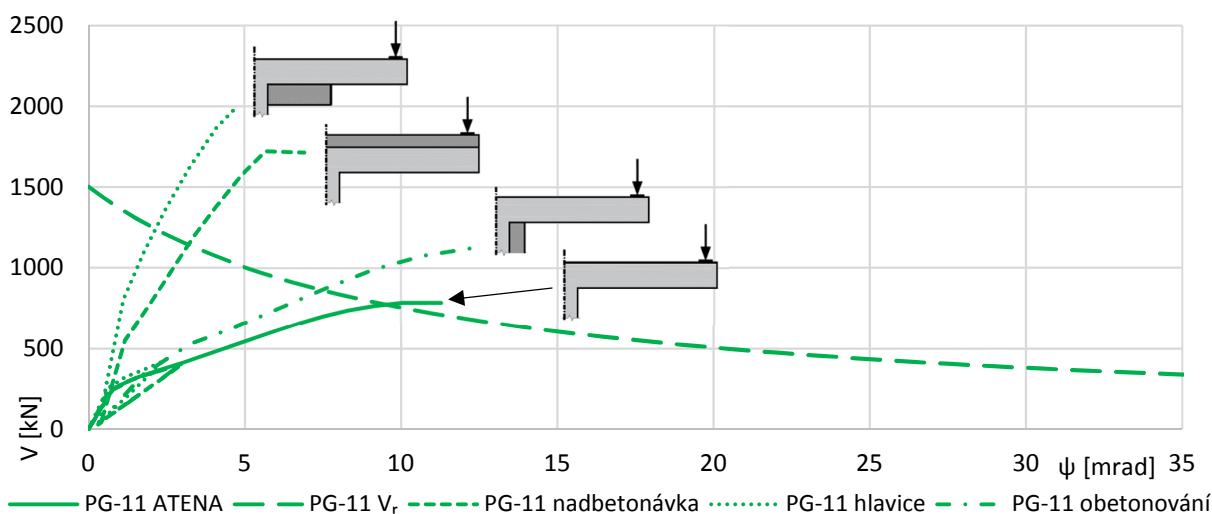
Dále jsou v práci řešeny tři způsoby robustního zesílení betonových desek. Jedná se o sanaci formou dodatečné hlavice na spodním povrchu desky, obetonování sloupu a nadbetonování vyztužené vrstvy nad stávající konstrukci. Pro všechny tyto způsoby jsou provedeny podrobné analytické modely, které se mimo jiné zabývají vlivem reologických jevů, povrchovou úpravou styčných částí, vlivem spřahující výztuže a také délkou stávající výztuže v desce na výslednou únosnost sanované konstrukce. Na následujících obrázcích je porovnávána změna charakteru chování desky při zatížení do její únosnosti podle typu sanace a stupně vyztužení desky (pro  $\rho_l = 1,5\%$  Obr. 10, pro  $\rho_l = 0,25\%$  Obr. 11 a pro  $\rho_l = 0,75\%$  Obr. 12).



Obr. 10 Porovnání zesílení pro PG-1 ( $\rho_l = 1,5\%$ ) na odezvě zatížení – pootočení



Obr. 11 Porovnání zesílení pro PG-2b ( $\rho_l = 0,25 \%$ ) na odezvě zatížení – pootočení



Obr. 12 Porovnání zesílení pro PG-11 ( $\rho_l = 0,75 \%$ ) na odezvě zatížení – pootočení

Z analytické studie vyplynulo několik doporučení pro návrh sanace protlačení i vlastní realizaci zesílení:

- Efektivita zvýšení únosnosti v protlačení závisí především na stávajícím ohybovém vyztužení desky. Pro slabě vyztužené desky je možné dosáhnout více než trojnásobného zvýšení únosnosti.
- Nadbetonávka desky je univerzální řešení pro zesílení v protlačení, jelikož zároveň posílí vyztužení stávající desky, a tedy málo závisí na jejím stávajícím vyztužení. Avšak může omezit prostor nad konstrukcí.
- Betonová hlavice je velmi robustní řešení v případě, kdy je potřeba výrazně navýšit únosnost konstrukce. Při volbě vhodného rozměru hlavice je možné dosáhnout 2,5 – 3násobku únosnosti samotné desky bez nutnosti posílení ohybové vyztuže desky.
- Obetonování sloupu zvýší únosnost v protlačení pouze nepatrně v porovnání s ostatními variantami. Obdobných hodnot zesílení lze dosáhnout např. dodatečnou smykovou výztuží (viz *Tabulka 1*) při výrazně menší ekonomické

náročnosti. Avšak pokud je primárně obetonování použito pro zesílení sloupu, je možné využít synergického vlivu na posílení únosnosti v protlačení.

- Dodatečné hlavice a obetonování sloupu u desek s malým množstvím horní ohybové výztuže je nutné podrobněji analyzovat a to především, jestli nedojde k porušení ohybem dříve než protlačení. Je nutno uvážit, zdali není potřeba doplnit horní výztuž (např. pomocí FRP).
- Povrch mezi stávající deskou a přibetonovanou hlavici je vhodné zdrsňit pro zajištění vyšší únosnosti v protlačení.
- Stávající betonovou desku je nutné spráhnout s novou hlavici např. vlepením betonářské výztuže na dostatečnou kotevní délku. Bez provedení tohoto detailu dosahuje únosnost po sanaci výrazně nižších hodnot.
- Dodatečnou hlavici je nutné propojit se stávajícím sloupem vlepením výztuže při horním povrchu, která zajišťuje přenos tahů vznikajících během přitěžování.
- Při návrhu je velmi důležité uvážení délky stávající horní výztuže desky, která bude zasahovat mimo novou hlavici. Podélná výztuž zde musí být dostatečně zakotvena. V opačném případě velmi výrazně klesá únosnost sanace.

## **5 ZESÍLENÍ DODATEČNOU BETONOVOU HLAVICÍ A JEJÍ DLOUHODOBÝ MONITORING**

Nabyté poznatky zesilování v protlačení byly aplikovány na sanaci monolitické betonové konstrukce z roku výstavby 2009, u které došlo ke změně požadavků na využití stropní desky. Původní užité zatížení uvažovalo s využitím jako garáže (jednalo se o vnitřní stropní desku s několika patry konstrukcí nad), ale nově deska měla tvořit střešní konstrukci pro zelenou střechu s významným stálým zatížením a zároveň i větším užitným zatížením. Jako efektivní způsob sanace byla zvolena dodatečná betonová hlavice umístěná u volného konce stěny a byla zároveň doplněna o rozšíření stěny z důvodu snížení rozpětí konstrukce.

Do armokoše betonové hlavice bylo osazeno měření před její betonáží. Na úrovni spodní výztuže byly do vzájemně kolmých směrů instalovány strunové tenzometry, které umožňovaly i měření teploty konstrukce. Na tři vybrané pruty spráhovací výztuže byly osazeny odporové tenzometry. Závitová tyč byla opatřena na koncích podložkami pro její řádné zakotvení. Hlavice byla vybetonována v květnu 2016 a měření probíhalo až do května 2018. Pohled na armokoš navržené sanace je vidět na Obr. 13 a finální úprava konstrukce je na Obr. 14.

Ve stávající konstrukci byla odebrána řada vzorků pro stanovení pevnosti betonu v tlaku a zároveň byly odebrány i vzorky betonové směsi použité pro betonáž hlavice. Konstrukce byla v průběhu monitoringu vystavena řadě různých zatěžovacích stavů včetně pojezdu demoličním bagrem o hmotnosti 59,4 t (deska byla v té době dočasně podepřena montážními stojkami). Následně bylo ve dvou etapách aplikováno stálé zatížení.

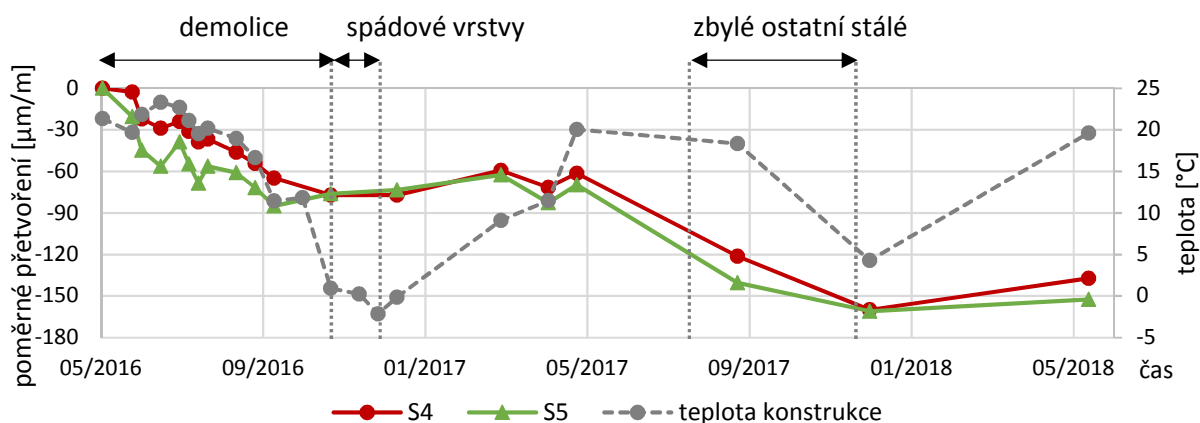


Obr. 13 Pohled na armokoš hlavice a prodloužení stěny



Obr. 14 Celkový pohled na dokončenou konstrukci

Ačkoliv byly nainstalovány i odporové tenzometry na dodatečné výztuži hlavice, tak odečtená data z nich v průběhu času vykazovala řadu anomálních hodnot, takže byly z vyhodnocení vyloučeny. Naopak strunové tenzometry se projevily jako vhodnější nástroj pro dlouhodobé sledování. Na Obr. 15 je patrný v úvodu nárůst přetvoření, který je přisouzen vývoji smrštění v betonu a následně je především viditelný nárůst deformace ve druhé fázi stálého zatížení, kdy se zatížení desky zvýšilo o  $8,43 \text{ kN/m}^2$ . Teoretická hodnota přírůstku přetvoření stanovená na nelineárním globálním modelu konstrukce je  $-87 \text{ } \mu\text{m/m}$  pro tenzometr S4 a  $-57 \text{ } \mu\text{m/m}$  pro tenzometr S5, což odpovídá 99 % naměřeného přetvoření u S4 a 65 % přetvoření pro S5. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o měření na reálné konstrukci, a ne v laboratorních podmínkách, je dosažené analytické přiblížení ke skutečně naměřeným hodnotám považováno za velmi dobré.



Obr. 15 Naměřená data pro strunové tenzometry na dodatečné hlavici

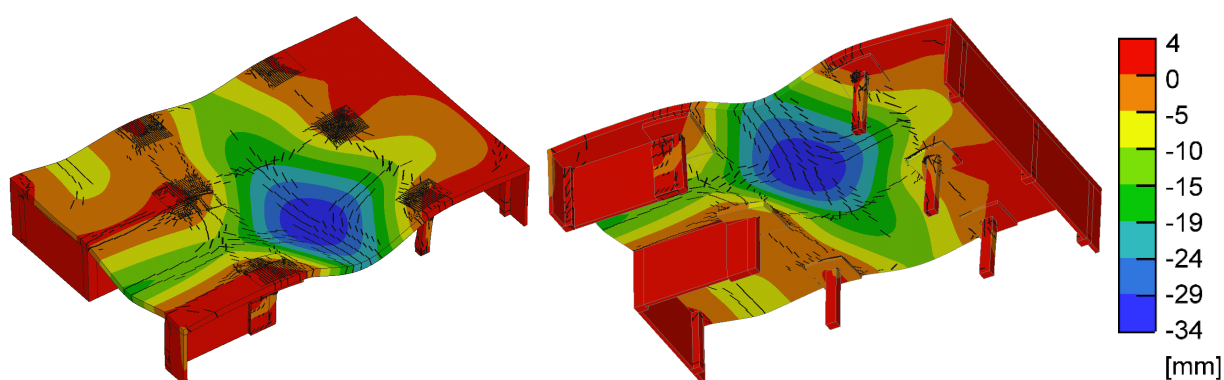
Globálním model konstrukce je využit k názornému ukázání změny chování stropní desky před a po sanaci. Vyhodnocení je provedeno podle přístupu EN 1992-2 [27] pro projektovanou pevnost betonu C30/37. Konstrukce je zesílena pouze dodatečnou hlavici bez sanace ohybu desky. Výsledky z analýzy jsou uvedeny v Tabulce 2, kde



je patrné především výrazné zvýšení hodnoty zatížení při porušení, ale nejpodstatnějším benefitem sanace je změna typu porušení z křehkého protlačení na duktilní ohybové. Na Obr. 16 jsou ukázány deformace a rozvoj trhlin na sanované konstrukci před jejím porušením.

Tabulka 2 Porovnání účinku zatížení a únosnosti konstrukce dle EN 1992-2

Varianta	Návrhový účinek [kN/m <sup>2</sup> ]	Zatížení při porušení [kN/m <sup>2</sup> ]	Globální součinitel bezpečnosti [-]	Únosnost dle EN 1992-2 [kN/m <sup>2</sup> ]	Využití [-]	Typ porušení
Původní konstrukce	16,24	27,40	1,27	21,57	0,75	protlačení
Zesílená konstrukce	32,81	46,95	1,27	36,97	0,88	ohybové



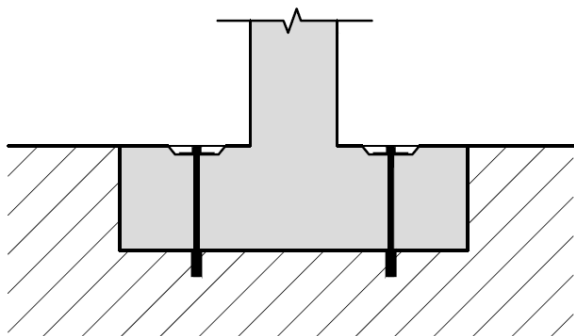
Obr. 16 Deformace zesílené konstrukce (50x převýšeno) v kroku před porušením (vlevo horní pohled, vpravo spodní pohled), trhliny zobrazeny od 0,05 mm

## 6 TECHNOLOGIE DODATEČNÉHO ZESÍLENÍ ZÁKLADOVÉ KONSTRUKCE SMYKOVOU VÝZTUŽÍ

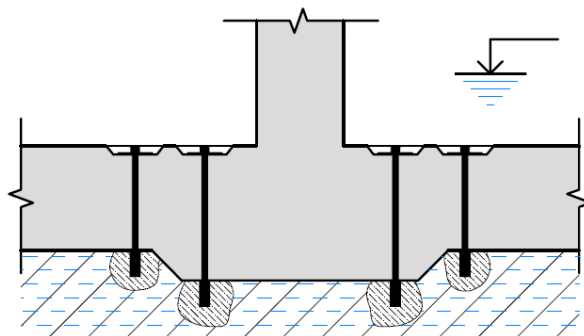
V rámci disertační práce je podrobně popsána nově vyvinutá technologie pro zesilování konstrukcí pomocí dodatečné smykové ocelové výztuže, která je instalována pouze z jedné strany. Proto je tento způsob zesílení výhodný především u základových konstrukcí, kde je jeden povrch zcela nepřístupný, Obr. 17 a Obr. 18.

Hlavní benefit technologie je kombinované kotvení ocelové tyče pomocí vlepení a mechanické rozpěrné kotvy, díky čemuž je možné dosahovat lepší účinnost v kotvení oproti samotnému vlepení. Během vývoje sanace byl vyzkoušen a optimalizován postup provádění pod hladinou podzemní vody tak, aby výsledná sanace zajistila zatěsnění vrtu.

Uvedený způsob zesílení je chráněn užitným vzorem č. 2016-33038 s názvem *Základová deska nebo patka zesílená proti protlačení*, jehož původcem je autor společně se svým školitelem doc. Ing. Milošem Zichem, Ph.D.

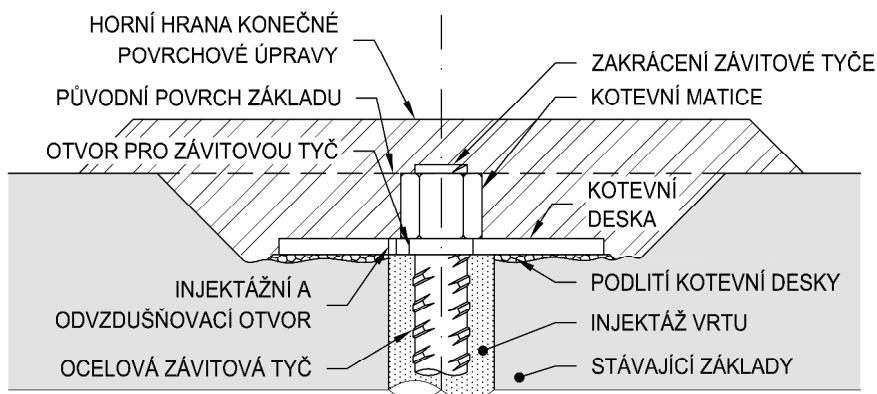


Obr. 17 Schéma technologie sanace protlačení pro základovou patku mimo podzemní vodu

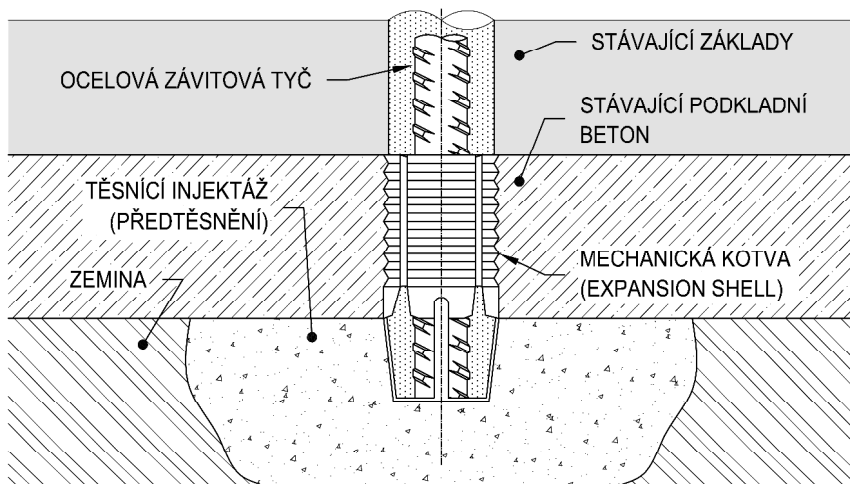


Obr. 18 Schéma technologie sanace protlačení pro základovou desku pod hladinou podzemní vody

Obecný detail kotvení závitové tyče na horním povrchu je uvedený na Obr. 19, kde se jedná o kotevní desku doplněnou o matici na závitové tyči a celé kotvení je zapuštěno v krycí vrstvě betonu. Pro kotvení na spodním povrchu je použit tzv. *expansion shell*, který se našroubuje na závitovou tyč a následně je ve vrtu aktivovaný mechanicky rozepřením o stěny Obr. 20. Pro aktivaci celé sanace jsou jednotlivé tyče předepnuté a zakotveny na horním povrchu.



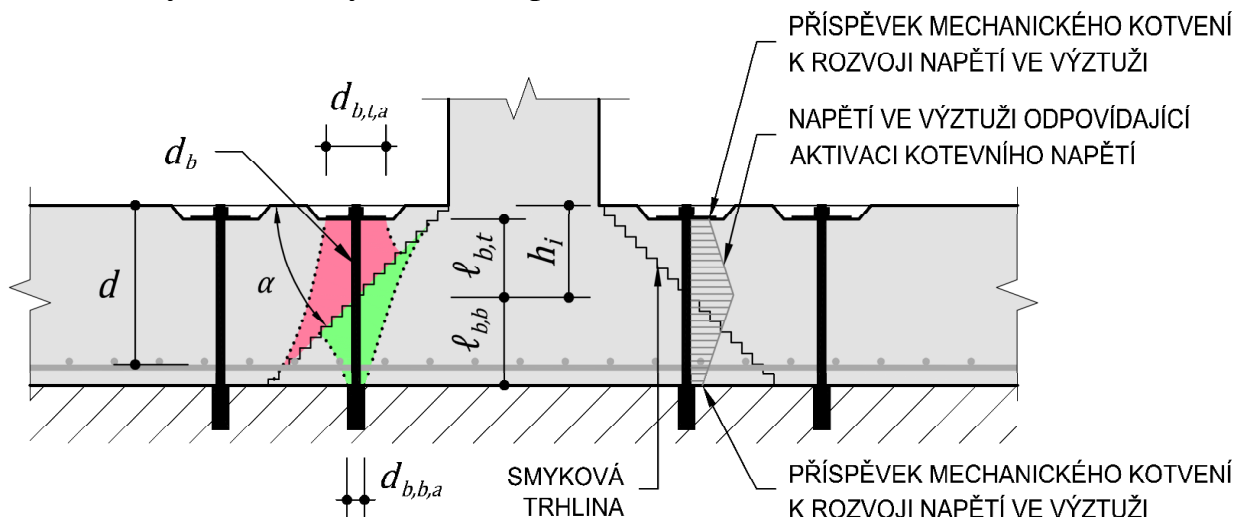
Obr. 19 Obecný detail kotvení na přístupném povrchu pro technologii zesílení základové konstrukce dodatečnou smykovou výztuží



Obr. 20 Obecný detail kotvení na nepřístupném povrchu pro technologii zesílení základové konstrukce dodatečnou smykovou výztuží

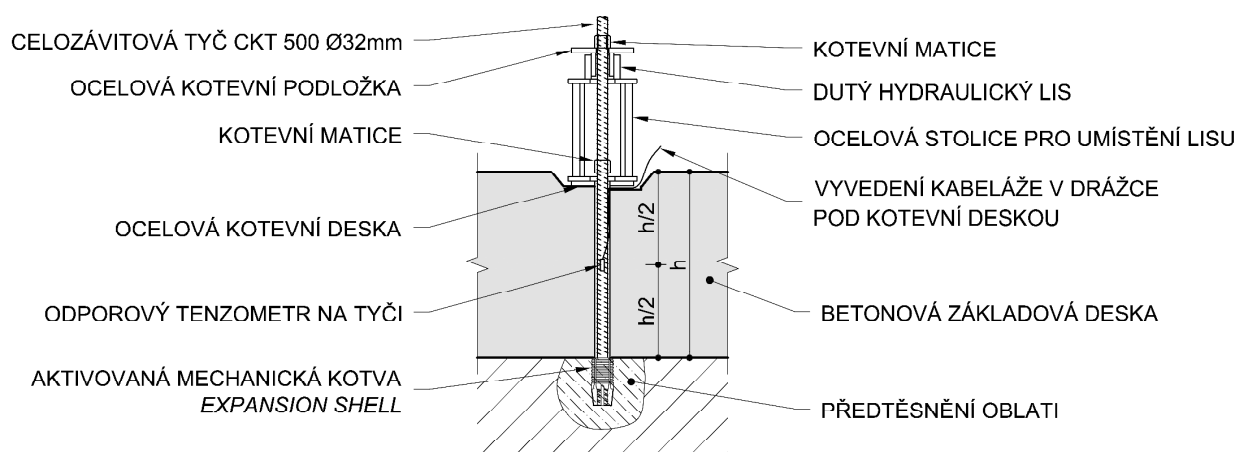


Výpočet únosnosti sanované konstrukce je založen na mechanickém modelu vycházejícím z Model Code 2010. Oproti jiným normám je velmi podrobně stanovený příspěvek dodatečné ocelové výztuže, který vychází z možných způsobů porušení. Je zahrnutý vliv vytržení betonových kuželů na obou koncích kotvení (Obr. 21 vlevo), porušení vlivem ztráty soudržnosti a v neposlední řadě i aktivovaným napětím při rozevírání smykové trhliny (Obr. 21 vpravo).



Obr. 21 Geometrické charakteristiky pro výpočet sanace dodatečnou smykovou výztuží a základní principy porušení

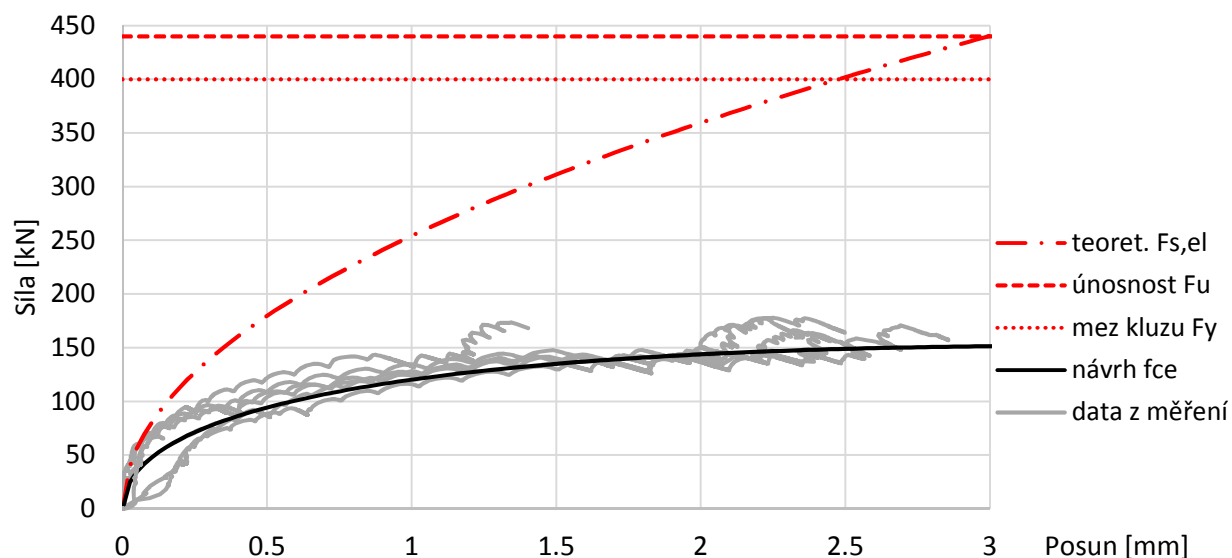
Pro optimalizaci pracovního postupu a také pro získání dat popisujících kombinovaného chování kotvení byla provedena celá řada tahových zkoušek zakotvené výztuže v podmínkách skutečné konstrukce pod hladinou podzemní vody. Sestava použitá při zkouškách je uvedena na Obr. 22. Vzhledem k velké tloušťce desky vždy docházelo ke ztrátě soudržnosti a nedošlo nikdy k porušení konstrukce.



Obr. 22 Schéma sestavy pro zkoušku progresivního chování kotvení

Během zkoušek byla porovnána únosnost tyčí kotvených pouze vlepením pryskyřicí a únosnost kombinovaného kotvení (doplněné o mechanickou kotvu). Bylo prokázáno, že použití *expansion shellu* až dvojnásobně zvyšuje únosnost oproti samotnému vlepení. Zároveň tak bylo možné stanovit příspěvek mechanické kotvy.

Na základě provedených tahových zkoušek doplněné o měření svislého posunu tyče se stanovila funkce pro aktivované napětí při rozevírání smykové trhliny, Obr. 23.



Obr. 23 Návrh funkce pro progresivní rozevírání trhlin na základě zkoušek

## 6.1 TECHNOLOGICKÝ POSTUP

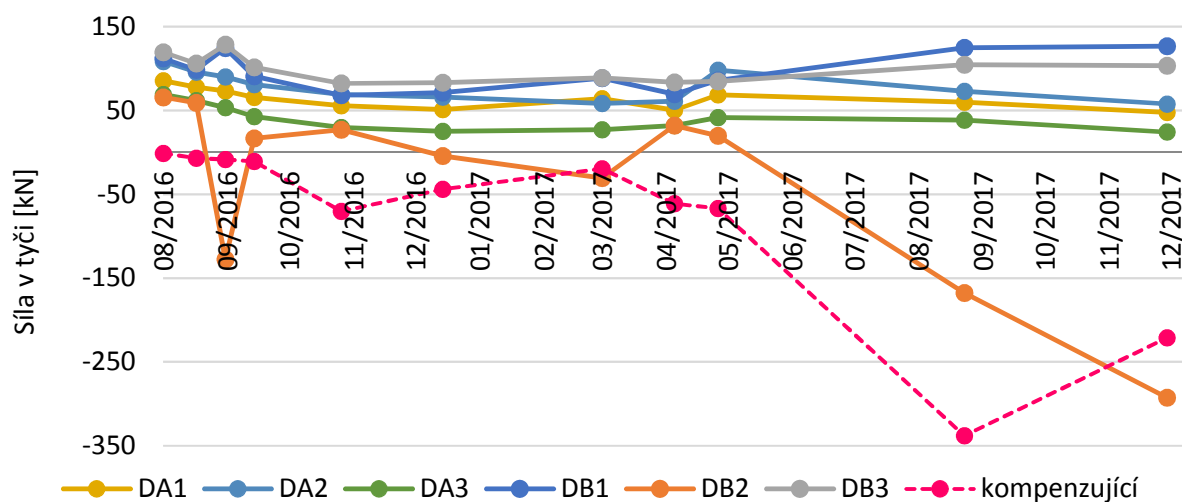
Celý optimalizovaný technologický postup se dá rozdělit do 10 základních kroků. V následujících odstavcích jsou podrobně popsány dílčí kroky provádění pro případ zesilování konstrukce pod hladinou podzemní vody:

- 1) Identifikuje se stávající výztuž při horním povrchu, vyznačí se poloha sanace dle výpočtu a vytvoří se kapsy pro kotevní desky odstraněním krytí výztuže.
- 2) Proveďte se vrt malého profilu (do  $\varnothing 20$  mm) skrz celou výšku desky. Během vrtání je zjištěna skutečná tloušťka základové desky. Vrt je ve vrcholu utěsněn např. korkovým špuntem. Provedou se ostatní vrty u sanovaného místa.
- 3) Osadí se injektážní pakr do vytvořeného vrtu a injektuje se oblast pod základovou deskou napěňovací směsí. U prvních vrtů je nutné optimalizovat množství injektáže, aby bylo zabezpečeno dostatečné utěsnění oblasti.
- 4) Vyvrtá se jádrový vrt o velikosti odpovídající osazenému *expansion shellu* na závitové tyči. Tento vrt je přesně v místě původního vrtu malého profilu. Injektážní pakr je tak převrtán jádrovým vrtem.
- 5) Po vyjmutí jádra vrtu se osadí závitové tyče (délka dle tloušťky základové desky a napínacího zařízení) s *expansion shellem* do provedeného vrtu a mechanicky se aktivuje.
- 6) Pomocí hadičky vložené do vrtu se injektuje spodní část vrtu, minimálně nad *expansion shell*.
- 7) Po vytvrnutí injektážní směsi je na horní povrch osazena roznášecí deska a podlita např. cementovou zálivkou. Zároveň je osazena na tyči i matice.

- 8) Předepnou se závitové tyče pomocí dutého hydraulického válce na stanovenou hodnotu dle výpočtu a místních zkoušek. Během předpínání je nutné měřit napínací sílu a posun na tyči. Tyče jsou zakotveny pomocí matice na roznášecí podložce.
- 9) Dosud nevyplněný prostor mezi vrtem a závitovou tyčí je zainjektován skrz injektážní otvor v roznášecí desce, alternativně je možné injektovat přes šikmý vrt v kotevní oblasti. V každém případě musí mít roznášecí deska odvodušňovací otvor.
- 10) Zkrátí se závitové tyče a upraví se horní povrch vhodnou zálivkou. Případně jinou požadovanou skladbou podlahy.

## 6.2 DLOUHODOBÉ MĚŘENÍ

U několika instalovaných tyčí bylo prováděno dlouhodobé měření na odporových tenzometrech. Pro odseparování vlivu teploty byla umístěna do samostatného vrtu závitová tyč délky 200 mm, na které je také osazena dvojice odporových tenzometrů. Vrt byl následně zainjektován jako v případě aktivovaných tyčí. Tato kompenzační závitová tyč byla situována v bezprostřední blízkosti k ostatním tyčím. Na Obr. 24 jsou uvedena odečtená data v průběhu měření přepočtená na sílu v tyči. V případě posledních dvou uskutečněných měření bylo zjištěno poškození kabeláže u kompenzujícího prvku. Vzhledem k anomálním odečteným hodnotám byla tato měření vyloučena z vyhodnocení.



Obr. 24 Dlouhodobý průběh síly v závitových tyčích použitých pro sanaci

Ukázalo se, že měření v podmínkách stavby, kde nejsou zaručeny dlouhodobé stálé podmínky, je více náchylné na nepřesnost měření. Je nutné také podotknout, že únosnost je zajišťována závitovou tyčí a vlastní předepnutí je určitý benefit použitého postupu (podrobný popis výpočtu je součástí disertační práce). Především na žádné z pozorovaných tyčí s kvalitním podlitím kotevní desky nedošlo k vymizení vneseného zatížení.

V průběhu postupného přibližování k výslednému návrhu technologie se ukázalo jako nejzásadnější nalezení vhodné sekvence po sobě následujících technologických kroků, které ovlivňují výslednou účinnost zesílení konstrukce.

Mezi hlavní benefity vyvinuté technologie je možné řadit

- možnost zesílení konstrukce přístupné pouze z jednoho povrchu,
- prokázaný pracovní postup zajišťující aplikaci na konstrukcích pod hladinou podzemní vody,
- použití běžně dostupných výrobků bez nutnosti využití nestandardní technologie,
- výsledné zesílení bez vlivu na analytický model konstrukce,
- eliminace šikmého vrtání.

I tato technologie však má své omezení, které především spočívá v realizaci vrtu skrz celou výšku betonové konstrukce. U přístupného povrchu je možné nedestruktivně identifikovat polohu výztuže (např. detekčním scannerem, profometrem apod.), ale u nepřístupného povrchu prakticky není možné určit polohu stávající výztuže a tím pádem se vyhnout jejímu převrtání při realizaci vrtů. Je tedy nutné, aby konstrukce měla dostatečnou rezervu ve své ohybové únosnosti.

## 7 ZÁVĚR

Problematika protlačení betonových konstrukcí může být vnímána jako relativně úzká oblast statiky nosných konstrukcí, ale jak je mimo jiné prezentováno v disertační práci, tak se v poslední době ukazuje jako zcela zásadní správný návrh detailů lokálně podepřených konstrukcí. Jedná se totiž o klíčový detail konstrukce, na kterém závisí celá její stabilita a bezpečnost. O to důležitějším tématem je vhodný a bezpečný návrh sanace, resp. zesílení tohoto kritického napojení.

### 7.1 SHRNU TÍ PRÁCE

Součástí práce je v úvodní kapitole uveden přehled již neplatného, současně platného i návrhu budoucího normového přístupu k protlačení nejenom v evropských geografických podmínkách. Ke škále způsobů zesílení v protlačení je zpracována přehledná tabulka, ze které je možné vyčíst efektivitu jednotlivých způsobů ověřených na proběhlých experimentálních kampaních. Tento přehled může sloužit jako základní indicie pro vhodný návrh sanace vzhledem k potřebné míře navýšení únosnosti.

První hlavní oblast práce je věnována podrobné studii robustního zesilování konstrukce pomocí dodatečných betonových hlavic, nadbetonování desky a obetonování sloupů. Analytická studie je zpracována na komplexních materiálově a geometricky nelineárních modelech. Detailněji je následně rozpracována studie dodatečné betonové hlavice, do které jsou zahrnuty reologické jevy, vliv úpravy styčného povrchu i spřažení hlavice se stávající deskou. Velmi podstatným přínosem je porovnání analyzovaných variant z pohledu jednotlivých norem, kde se např. ukazuje slabé místo EN 1992-1-1 ve formě nadhodnocení únosnosti v protlačení pro slabě vyztužené desky. Zároveň je nutné poznamenat, že návrh druhé generace tohoto standardu z roku 2016 i nejnovější verze z roku 2018 vykazuje v analytické studii menší míru bezpečnosti v porovnání s Model Code 2010, resp. *Critical Shear Crack Theory*, ze které principiálně vychází. V práci byl také ukázán nejednoznačný výklad návrhů normy EN 1992-1-1 (ve verzi z roku 2016 i 2018) u betonových hlavic, resp.

konstrukcí s proměnnou tloušťkou, který by měl být ještě podroben analýze před uvedením do praxe.

Soubor nabytých teoretických poznatků je sumarizován do obecných doporučení pro návrh sanace protlačení a byl aplikován na návrhu dodatečné betonové hlavice na reálné konstrukci. Před prováděním hlavice bylo experimentálně ověřeno kotvení dodatečné výztuže na spřažení prvků pro zajištění splnění předpokladů návrhu. Hlavice byla instrumentována odporovými a strunovými tenzometry, na kterých probíhalo po dobu dvou let dlouhodobé měření. Během této doby byla hlavice vystavena širokému spektru zatěžovacích stavů. Pro porovnání naměřených hodnot byl vypracován nelineární model většího rozsahu z důvodu vystižení globálního působení sanace. Hodnoty naměřené na strunových tenzometrech dobře korespondovaly s analyticky stanovenými. Pro odporové tenzometry se v průběhu času ukázala nestabilita odečítaných výsledků a jejich problematická interpretace.

Druhá část práce je věnována zesilování základových konstrukcí, které mají své hlavní specifikum v přístupnosti pouze z jedné strany. Inovativní technologie sanace pomocí aktivované dodatečné smykové výztuže tvořené ocelovou závitovou tyčí kotvenou kombinací vlepení a mechanické kotvy je podrobně popsána v této kapitole. Pozornost je věnována především samotnému postupnému vývoji technologie, který jde ruku v ruce s technologickým postupem. Velký důraz byl kladen na použití u konstrukcí pod hladinou podzemní vody. Správný pracovní postup je podložen řadou realizovaných vzorků a zároveň je zachycen na fotografické dokumentaci. U provedených zkoušek zesílení na reálné konstrukci základové desky bylo následně prováděno dlouhodobé měření, které potvrdilo udržení vnesené síly při aktivaci kotvení na vzorcích s řádně provedenými detaily kotvení. Zároveň byla prokázána stálost řešení na konstrukci pod hladinou podzemní vody.

Na základě řady zkoušek progresivního chování kombinovaného kotvení byla odvozena návrhová funkce aktivace kotvení. Pro prezentovanou novou technologii zesílení základových konstrukcí jsou stanoveny výpočetní postupy pro návrh sanace. Na reprezentativním příkladu je technologie porovnána se současně dostupným komerčním řešením. Prezentovaná technologie je chráněna užitným vzorem č. 2016-33038 s názvem *Základová deska nebo patka zesílená proti protlačení*. Původcem tohoto užitného vzoru je autor práce společně se svým školitelem.

V neposlední řadě jsou v práci uvedeny poznámky k přepočtům protlačení dle normy EN 1992-1-1, která uvádí mírně zavádějící výsledky únosnosti se smykovou výztuží. K tomu je ukázán na analytické studii výškové budovy s ustupujícími podlažími vliv nerovnoměrné deformace, resp. nerovnoměrného sednutí konstrukce na příspěvek síly na protlačení z globálního modelu. Zanedbání tohoto globálního efektu může vést k výraznému podcenění působící síly na protlačení a tím pádem i nebezpečnému návrhu konstrukce.

Stanovené cíle disertační práce byly kromě analytických studií uchopeny i z pohledu praktické aplikace různých způsobů zesílení konstrukcí, na kterých bylo prokázáno jejich skutečné chování v souladu s teoretickými předpoklady.

## 7.2 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM A VÝVOJ

Pro další budoucí vývoj se autorovi jeví jako velmi přínosné porovnání měření in situ s laboratorními výsledky na obdobných konstrukcích jak pro dodatečné betonové hlavice, tak i pro sanaci základové desky dodatečnými smykovými trny. Zároveň by bylo velmi praktické najít řešení pro jednoduchý způsob odečtu hodnot ze zabudovaných měřících čidel přímo v konstrukci, jelikož prováděné měření bylo komplikované co do počtu nutných přístrojů k realizaci odečtení, tak i ve vztahu k závislosti na síťovém napojení na elektrickou energii pro provoz jednotlivých přístrojů měřící sestavy.

Oba analyzované způsoby zesílení by bylo vhodné doplnit o experimentální kampaň na vzorcích, které by bylo možné otestovat až do jejich mezní únosnosti. U dodatečné betonové hlavice je třeba věnovat pozornost vhodnému vystižení reálného působení v konstrukci a tím pádem i vhodného návrhu experimentu. Pro aktivovanou smykovou výztuž by bylo žádoucí věnovat pozornost vlivu aktivace výztuže na absolutní únosnost v protlačení. Při prokázání významného příspěvku předepnutí na únosnost by se tato technologie stala ještě efektivnějším způsobem zesilování základových konstrukcí.

Jako významný aspekt, který stojí stranou hlavního proudu obecného výzkumu, je udržitelnost a stálost sanace z dlouhodobého hlediska. Je tak vhodné do realizovaných konstrukcích umísťovat senzory (např. strunové a odporové tenzometry), na kterých je možné dokumentovat chování konstrukce a porovnat je s předpoklady.

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KIERDORF, Alexander. Early Mushroom Slab Construction in Switzerland, Russia and the U.S.A. – A Study in Parallel Technological Development. In: *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*. 2006, s. 1793-1807. ISSN 978-0701702069.
- [2] WOOD, Jonathan G M. Pipers Row Car Park, *Wolverhampton: Quantitative Study of the Causes of the Partial Collapse on 20th March 1997*. 1977. Dostupné také z: <http://www.hse.gov.uk/research/misc/pipersrowpt1.pdf>
- [3] HALVONÍK, Jaroslav a Ľudovít FILLO. Pretlačenie – príčiny havárie v komplexe Trinity. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební*. 2014, **14**(1), 25-32. ISSN 1213-1962.
- [4] CEN. EN 1992-1-1. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels, Belgium, 2004, 225 s.
- [5] MUTTONI, Aurelio. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. *ACI Structural Journal*. 2008, **105**, N, 440-450. Dostupné z: <http://infoscience.epfl.ch/record/116123>
- [6] FIB – INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. *fib - Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- [7] MUTTONI, Aurelio, Miguel FERNÁNDEZ RUIZ a João T. SIMÕES. The theoretical principles of the critical shear crack theory for punching shear

- failures and derivation of consistent closed-form design expressions. *Structural Concrete*. DOI: 10.1002/suco.201700088. ISSN 14644177.
- [8] MUTTONI, Aurelio a Miguel Fernández RUIZ. *Provisions for shear and punching shear based on MC2010 and CSCT, closed form solutions*. Presentation from CEN/TC250/SC2/WG1/TG4 meeting in Lisbon, 2016.
- [9] ČSN 73 1201. *Navrhování betonových konstrukcí*. Praha: Vydavatelstvím ÚNM, 1986.
- [10] KENEL, Albin a Thomas KELLER. *Punching shear strengthening Expertise: External steel shear heads for retroactive enhancement of punching shear strength in existing flat slabs* [online]. Lyss: F.J. Aschwanden AG [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: [http://aschwanden.com/download/products/rino/rino\\_gutachten\\_interna.pdf](http://aschwanden.com/download/products/rino/rino_gutachten_interna.pdf)
- [11] FERNÁNDEZ RUIZ, Miguel, Aurelio MUTTONI a Jakob KUNZ. Strengthening of flat slabs against punching shear using post-installed shear reinforcement. *ACI Structural Journal*. *ACI Structural Journal*, 2010, **107** N, 434-442. Dostupné také z: <http://infoscience.epfl.ch/record/150356>
- [12] ASCHWANDEN. RINO Exo: *Prestressed steel heads for the retroactive strengthening of existing concrete structures* [online]. Lyss: F.J. Aschwanden, 2015 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: [http://aschwanden.com/download/publications/1511\\_quality\\_rino\\_exo\\_e.pdf](http://aschwanden.com/download/publications/1511_quality_rino_exo_e.pdf)
- [13] INÁCIO, Micael M.G., A. PINHO RAMOS a Duarte M.V. FARIA. Strengthening of flat slabs with transverse reinforcement by introduction of steel bolts using different anchorage approaches. *Engineering Structures*. 2012, **44**, 63-77. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.043](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.043).
- [14] GHALI, A., M.A. SARGIOUS a A. HUIZER. Vertical Prestressing of Flat Plates Around Columns. *Special Publication*. 1974, **42**. DOI: 10.14359/17314.
- [15] WÖRLE, Patrick. Enhanced shear punching capacity by the use of post installed concrete screws. *Engineering Structures*. 2014, (60), 41-51. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.12.015. ISSN 0141-0296.
- [16] LAWLER, Nicholas a Maria Anna POLAK. Development of FRP Shear Bolts for Punching Shear Retrofit of Reinforced Concrete Slabs. *Journal of Composites for Construction*. American Society of Civil Engineers, 2010/11/01, **15**(4), 591-601. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000188.
- [17] SISSAKIS, Kyriakos a Shamim A. SHEIKH. Strengthening Concrete Slabs for Punching Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates. *Structural Journal*. 2007, **104**(1). DOI: 10.14359/18432.
- [18] ELBAKRY, Hazem M.F. a Said M. ALLAM. Punching strengthening of two-way slabs using external steel plates. *Alexandria Engineering Journal*. 2015, **54**(4), 1207-1218. DOI: 10.1016/j.aej.2015.09.005. ISSN 11100168.
- [19] CHEN, Cheng-Chih a Chung-Yan LI. Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Glass Fiber-Reinforced Polymer Laminates. *Structural Journal*. 2005, **102**(4). DOI: 10.14359/14557.

- [20] ABBAS, Husain, Aref A. ABADEL, Tarek ALMUSALLAM a Yousef AL-SALLOUM. Effect of CFRP and TRM Strengthening of RC Slabs on Punching Shear Strength. *Latin American Journal of Solids and Structures*. scielo, 2015, **12**, 1616-1640. ISSN 16797825.
- [21] MORENO, Carlos, Débora FERREIRA, Abdelkrim BENNANI, Ana SARMENTO a Michel NOVERRAZ. fib Symposium 2015: Concrete – Innovation and Design. *Punching shear strengthening of flat slabs: CFRP and shear reinforcement*. Copenhagen, 2015.
- [22] ABDULLAH, A., C.G. BAILEY a Z.J. WU. Tests investigating the punching shear of a column-slab connection strengthened with non-prestressed or prestressed FRP plates. *Construction and Building Materials*. 2013, **48**, 1134-1144. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.012. ISSN 09500618.
- [23] KOPPITZ, Robert, Albin KENEL a Thomas KELLER. Punching shear strengthening of flat slabs using prestressed carbon fiber-reinforced polymer straps. *Engineering Structures*. 2014, **76**, 283-294. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.07.017. ISSN 01410296.
- [24] WIDIANTO. *Rehabilitation of Reinforced Concrete Slab-column Connections for Two-way Shear*. 2006. PhD Thesis. The University of Texas at Austin.
- [25] ČERVENKA, Vladimír, Libor JENDELE a Jan ČERVENKA. *ATENA Program Documentation: Part 1 Theory* [online]. Červenka Consulting , 2016, [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: [http://cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA\\_Theory.pdf](http://cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf)
- [26] GUANDALINI, Stefano, Olivier BURDET a Aurelio MUTTONI. Punching tests of slabs with low reinforcement ratios. *ACI Structural Journal*. 2009, **106**, N, 87-95.
- [27] CEN. EN 1991-1-1. *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Brussels, Belgium, 2002.



## CURRICULUM VITAE

Jméno: Jan  
Příjmení: Nováček  
E-mail: jan.novacek@vutbr.cz

### Vzdělání

- 2008 – dosud**      **Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební**
- 2014 – dosud      Doktorské studium, obor: Konstrukce a dopravní stavby  
Disertační práce: Analýza železobetonových desek s ohledem  
na mezní stav protlačení  
*Ohlašovatel roku 2016 – ocenění rektora pro vynálezy  
s největším komerčním potenciálem*  
*Juniorstav – mezinárodní konference doktorského studia  
(ocenění 2018 – 1.místo; 2017 – 3.místo; 2016 – 2.místo)*
- 2012 – 2014      Magisterské studium, obor: Konstrukce a dopravní stavby  
Diplomová práce: Lávka pro pěší přes řeku Moravu  
*1. místo Česká dopravní stavba 2013 – Student  
vyhlašovatel TOP EXPO*  
*Cena společnosti Eurovia za nejlepší diplomovou práci 2014*  
*Vynikající diplomová práce 2014,*  
*vyhlašovatel Česká betonářská společnost*  
*2012 – 2013 studentská pedagogicko-vědecká síla  
(Ústavu betonových a zděných konstrukcí)*
- 2008 – 2012      Bakalářské studium, obor: Konstrukce a dopravní stavby  
*2012 - účast v mezinárodním kole Studentské vědecké  
a odborné činnosti*
- 2000 – 2008**      **Gymnázium Tišnov**

### Publikace

Do současnosti je autorem nebo spoluautorem:

- 6 článků evidovaných ve světově uznávané databázi SCOPUS,
- 9 příspěvků na tuzemských a zahraničních odborných konferencích,
- 6 příspěvků na doktorských konferencích,
- 1 užitného vzoru.

### Praxe

- 02/2014 – dosud      Stráský, Hustý a partneři s.r.o. – projektant  
10/2013 – 01/2014      Mott MacDonald CZ, s.r.o. – junior bridge designer  
05/2010 – 09/2012      Arch. Design, s.r.o. – pomocný projektant

Následující seznam zahrnuje díla z autorovy projekční praxe ve firmě Stráský, Hustý a partneři s.r.o. (2014-2018). Jsou uvedeny pouze zrealizovaná inženýrská díla, projekty pro nižší projekční stupeň (studie, dokumentace pro stavební řízení, projektová dokumentace pro zadání stavby aj.) a v současné době prováděné konstrukce zde nejsou uvedeny.

### **Polyfunkční komplex, Bratislava, Slovensko (2014-2018)**

Návrh detailů sanace na protlačení stropních desek a základové desky:

- 259 detailů sanace stropních desek dodatečnými závitovými tyčemi,
- 76 zesílení dodatečnou betonovou hlavicí,
- 23 zesílení nadbetonávkou stropní desky,
- 22 detailů sanace základové desky dodatečnou smykovou výztuží,
- 5 detailů sanace dodatečnými mikropilotami,
- řada konstrukcí pro snížení účinků na protlačení železobetonových desek.

### **Administrativní budova Smart Office Ostrava, Ostrava (2017)**

Návrh detailů sanace protlačení stropních desek. Návrh a analýza zatěžovací zkoušky pro ověření únosnosti detailu napojení železobetonové desky na průběžné ocelové sloupy.

### **Administrativní budova Aspira, Praha (2017)**

Návrh předpětí monolitické stropní desky na účinky uchycení membránové ocelové střešní konstrukce tvaru parabolického paraboloidu.

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá protlačení železobetonových konstrukcí se zaměřením na jejich dodatečné zesilování. V úvodní části je provedena komplexní rešerše možných způsobů zesílení a jejich efektivity na navýšení absolutní únosnosti. Dále jsou sestaveny materiálově nelineární modely pro robustní způsoby zesílení pomocí dodatečné betonové hlavice, nadbetonování desky a obetonování sloupu. Výsledky z analýzy modelů jsou porovnány z pohledu různých normových přístupů včetně návrhu nové generace Eurokódů, které se v současné době připravují. Detailněji je analyzována dodatečná betonová hlavice s ohledem na různé faktory ovlivňující výslednou únosnost. Nabyté poznatky jsou aplikovány na návrhu sanace reálné konstrukce, na které je prováděno dlouhodobé měření pro verifikaci předpokladů se skutečným chováním hlavice. V druhé části práce je pozornost soustředěna na zesilování základových konstrukcí přístupných pouze z jednoho povrchu. Je zde prezentována nově vyvinutá technologie zvýšení únosnosti pomocí dodatečné smykové výztuže kotvené kombinací chemické a mechanické kotvy. Na základě provedených zkoušek je sestaven výpočetní postup pro stanovení únosnosti zesílení a také je podrobně popsán technologický postup včetně aplikace na konstrukci pod hladinou podzemní vody. Nová technologie byla aplikována na zesílení základové desky, kde probíhalo dlouhodobé měření aktivované smykové výztuže.

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the topic of the punching shear of the reinforced concrete structures with a focus on an additional strengthening. The introduction of the thesis is devoted to the research of various types of strengthening against the punching and their efficiency on an increase of load-bearing capacity. Material nonlinear models are formed for strengthening by an additional concrete head, a slab concrete overlay and a column concrete jacketing. The results from the nonlinear analysis are compared with various standards, including the new generation of Eurocodes. Detailed analysis of an additional concrete head is performed regarding governing inputs, which influence load-bearing capacity. Theoretical assumptions were applied to the design of the additional concrete head, where long-term measurement has been performed for the comparison with the analytical assumptions and the material nonlinear model. The second part of the thesis deals with the strengthening of foundation structures, which are accessible only from one surface. There is presented newly developed technology for strengthening by the additional shear reinforcement with the combination of bonding and mechanical anchorage. The assessment of proposed technology is defined for the strengthening against punching shear based on tested samples. The detailed technological procedure is described, including the procedure for the application on the structures below ground water level. Long-term measurement of the shear reinforcement was carried out for the strengthened foundation slab.