

# Povodňová ochrana pražského metra – projekt a stavební řešení

**Článek popisuje vývoj projektu a postup při stavbě povodňové ochrany pražského metra v období od povodně v roce 2002 do současnosti. Pro posílení nosných konstrukcí metra byla realizována trvalá stavební opatření a také speciální úpravy, umožňující snížení hydrostatických účinků na konstrukční díly při povodňové situaci. V textu je popsáno technické řešení povodňové ochrany stanic Vltavská, Křižíkova, Malostranská a Florenc s využitím několika originálních a zcela nových řešení a postupů. Projekt povodňové ochrany metra zpracovala společnost METROPROJEKT Praha, a. s.**

## Ochrana metra proti zaplavení před povodní v roce 2002

Do roku 2002 bylo metro proti zaplavení z povrchu chráněno do úrovně hladiny ve Vltavě odpovídající stoleté povodni. Samotná návrhová úroveň hladiny tzv. stoleté povodně se v historii výstavby pražského metra postupem doby zvyšovala. Například v profilu nejstarší stanice v záplavové zóně Florenc byla návrhová úroveň stoleté povodně od roku 1970 dvakrát navýšována. Do konce 90. let minulého století byla tato úroveň navýšena o 0,8 m.

## Průběh povodně v srpnu 2002

Při povodni v srpnu 2002 překročila hladina v okolí některých stanic uvažovanou stoletou úroveň o více než 2 metry. Došlo k zaplavení vstupních prostor metra a poté již nebylo možné zabránit vniknutí vody do stanic. Současně došlo k šíření povodňové vlny tunely metra. Celkem tak bylo zaplaveno primárně 6 stanic,

dalších 11 pak následně přes traťové tunely a přestupní chodby, takže počet zaplavených stanic dosáhl 17. Třežba povodňová vlna staticky nenarušila nosné konstrukce, způsobila rozsáhlé škody na stavební i technologické části metra.

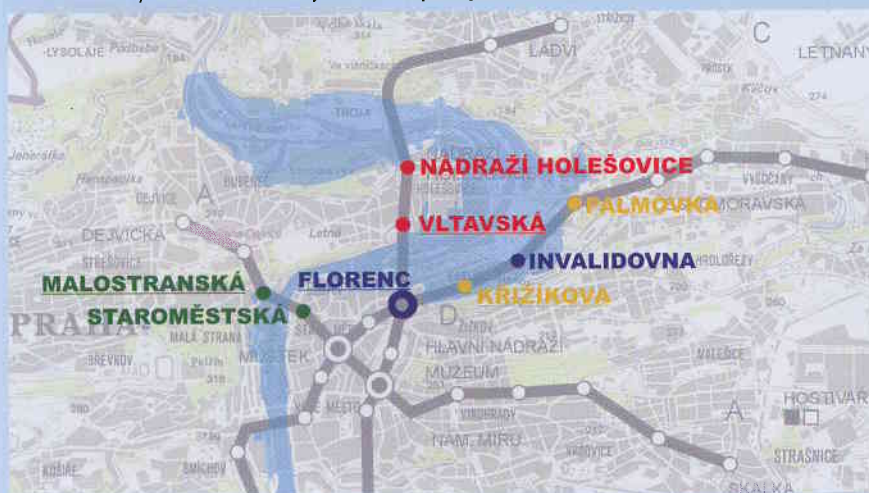
**Zadané parametry nové povodňové ochrany**  
Katastrofální účinek povodně vyvolal potřebu vybudovat koncepčně novou povodňovou ochranu pražského metra. V následujícím období proto orgány města rozhodly o definování nové výšky hrází v profilu jednotlivých stanic, vycházející z úrovně zaplavení v roce 2002 s navýšením o další bezpečnostní rezervu 0,6 m. Tato úroveň je dále uvažována jako návrhová  $Q_{n2002+0,6\text{ m}}$ . Ochrana metra je dle zadání řešena nezávisle na systému protipovodňové ochrany hlavního města Prahy a chrání metro i v okamžiku přelítí hradítek podél Vltavy. Prvotním úkolem projektu je zabránit vniknutí povodňové vlny do prostor

metra z povrchu, a v případě jeho zaplavení pak zamezit šíření vody do dalších prostorů metra a zajistit odolnost nosných konstrukcí proti působení hydrostatických i hydrodynamických účinků povodňové vlny. Výšce realizovaných hradítek musí ve všech případech odpovídat statická odolnost konstrukcí metra.

## Souhrn realizovaných opatření do roku 2005

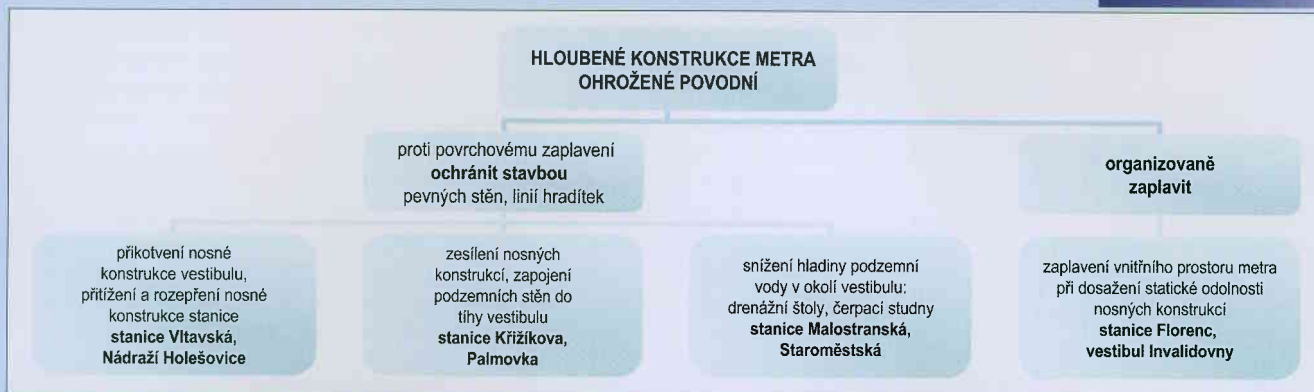
V současné době je povodňová ochrana pražského metra dokončena. Proti povrchovému zaplavení vstupů do metra jsou na úrovni terénu postaveny pevné stěny a připraveny nové linie pro vybudování hrází z mobilních hradítek. Při zahrazení povodňové vlny v okolí stanic metra dojde ke zvýšení hydrostatického tlaku na plášť stanice. Jednotlivé dilatační díly hloubených konstrukcí jsou s ohledem na místní hydrogeologické poměry ohroženy vyplaváním vlivem vztlaku, případně prolomením při působení hydrostatického tlaku. Pro zajištění odolnosti nosných konstrukcí při povodni jsou proto realizována stavební opatření, která spočívají v zesílení hloubených konstrukcí, jejich trvalém přikotvení, rozepření nebo přitížení. Pro snížení hydrostatických účinků na vybrané konstrukční díly jsou zřízeny čerpací studny a drenážní štolky. Podkladem pro návrh povodňové ochrany byl detailní rozbor průběhu a účinků povodně v roce 2002, stavebně-technické průzkumy skutečného stavu konstrukcí, hydrogeologické průzkumy okolního prostředí a projekty skutečného provedení. Realizovaná stavební opatření zůstávají ve většině případů cestujícím skryta, případně

Obr. 1: Situace pražského metra s vyznačením vybraných stanic zařazených do povodňové ochrany



Obr. 3: Stanice metra Vltavská – provádění sloupů tryskové injektáže, vytvářejících základ pro zakotvení prvků mobilní ochrany





Obr. 2: Diagram zajištění hloubených konstrukcí metra ohrožených povodní

jsou zakomponována do architektonického řešení stanic. Práce na povodňové ochraně byly provedeny bez přerušení provozu metra. Při překročení návrhové výšky ochrany ( $Q_{r2002+0,6m}$ ) budou vstupní prostory vestibulů a stanic v povodňové zóně samovolně zaplaveny. Proti šíření povodňové vlny tunely metra jsou do povodňové ochrany zapojeny tlakové uzávěry a další bariéry ochranného systému. Přestupní stanice Florenc a vestibul stanice Invalidovna jsou v současné době chráněny pouze na nižší úroveň, ověřenou statickým výpočtem. V krátkodobém výhledu by byl při překročení této výšky během povodně vnitřní prostor těchto objektů metra organizovaně zaplaven. S realizací kompletních ochranných opatření do jednotné návrhové výšky se uvažuje ve střednědobém výhledu.

#### Technické řešení povodňové ochrany vybraných stanic

Jednotlivé typy stavebních opatření dodatečně zajišťujících ohrožené konstrukce metra jsou popsány v diagramu na obr. 2. Na dalších stanicích, které jsou rovněž potenciálně ohroženy povodní, byla provedena obdobná opatření, případně jejich kombinace.

#### Stanice Vltavská

Proti povrchovému zaplavení je chráněn vestibul, původně stavěný ve svahované jámě. Na úrovni terénu jsou postaveny linie pevných stěn a mobilních hradítek do výšky max. 1,8 m. Zábrany jsou založeny na podporách vytvořených z pilířů tryskové injektáže (obr. 3), vetknutých do skalního podloží břidlic. Snížení hladiny podzemní vody v chráněném prostoru okolo vestibulu pomocí čerpacích studní bylo provozovatelem zamítnuto z důvodu bezpečnosti obsluhy čerpadel v uzavřeném prostoru. Okolí vestibulu tvoří dle HG průřezu propustné navážky, ve statickém výpočtu bylo uvažováno s plnými hydrostatickými účinky od návrhové povodně. Pro zajištění stability vestibulu proti vyplavání bylo provedeno trvalé přikotvení jeho základové desky, uložené v hloubce 5,0 m pod úroveň povrchu (obr. 4). Tím je zároveň zmenšeno rozpětí desky proti

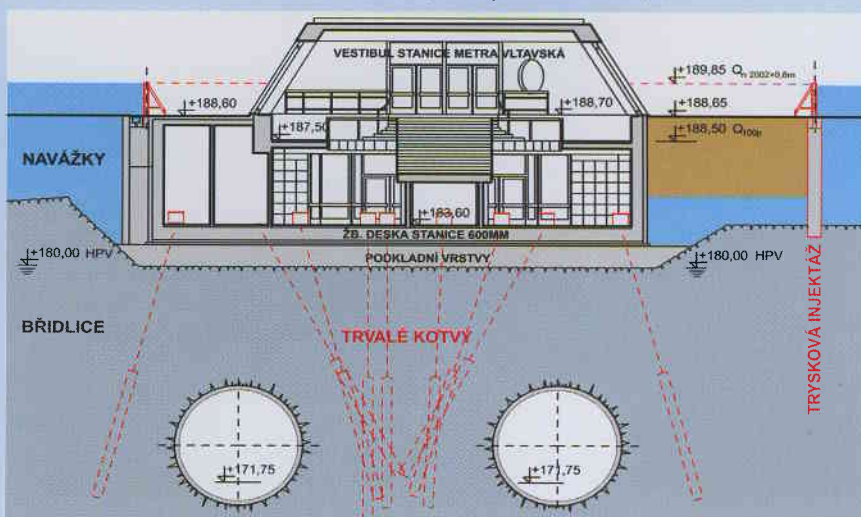
působení hydrostatického tlaku. Půdorysný rastr kotev je přizpůsoben provozním požadavkům. Kotvy s únosností 500 (800) kN jsou zakončeny zhlavím s ocelovou kotevní deskou 300x300x50 mm. Prostupy kotev deskou a izolačním souvrstvím jsou vodotěsně zainjektovány. Práce na příkovení vestibulu realizovala společnost Zakládání staveb, a. s., (obr. 5). Na podlaze vestibulu ve veřejné části jsou hlavy kotev zakryty lavičkami (obr. 6). Odklopná vrchní část laviček umožňuje snadný přístup ke zhlaví a kontrolu jejich předpětí. Lavičky jsou zakomponovány do architektonického ztvárnění vestibulu. Současně se stavebními opatřeními povodňové ochrany byly v rámci průzkumných prací do základové desky stanice v hloubce cca 19,0 m pod úroveň terénu osazeny trvalé prvky pro sledování hydrostatických tlaků. Prvek tvoří hermeticky osazené, tlakově odolné zhlaví z nerezové oceli, které bylo před provrtáním izolačního souvrství základové desky odzkoušeno tlakovou zkouškou. Po provrtání izolačního souvrství došlo dle předpokladu k výronu tlakové podzemní vody do technických prostor metra (obr. 7). Na zhlaví bylo následně přirubou osazeno vlastní měřicí zařízení (obr. 8). Dle výsledku krátkodobého manometrického měření na dvou prvcích je patrné, že v podzákladí

stanice dochází ke změnám tlaku vody. Příčinou je kolísání HPV ve skalním podloží břidlic a pravděpodobně také vliv drenážního účinku při průsaccích podzemní vody do vnitřního prostoru metra. Maximální naměřené hodnoty tlaku odpovídají současně měřené hladině podzemní vody v puklinovém skalním podloží břidlic a nemají přímou hydraulickou spojitost s vyšším horizontem HPV v antropogenních navážkách. Na základě těchto sledování lze předpokládat, že na dno stanice metra Vltavská v hloubce 19,0 m nebude při povodni s největší pravděpodobností působit hydrostatický tlak odpovídající výšce povodňové vlny. Výplňové betony v prostoru mezi dokončenou konstrukcí a původní svahovanou jámou byly při stavbě stanice provedeny vodotěsně a uložení stanice ve skalním podloží břidlic prakticky výrazně nenarušilo celkovou propustnost prostředí. Základová deska byla přesto kontrolně staticky posouzena na plné hydrostatické účinky od návrhové povodně, kterým vyhověla.

#### Stanice Křižíkova

Po celém obvodu vestibulu stanice metra Křižíkova je provedena výměna původní lehké prosklené obvodové konstrukce v celé výšce od podlahy ke střeše za železobetonové zdi tl. 300 mm, které

Obr. 4: Stanice metra Vltavská – příčný řez vestibulem. Trvalé přikotvení vestibulu.





Obr. 5: Stanice Vltavská, osazené pramencové kotvy před napnutím



Obr. 6: Stanice Vltavská, lavičky na podlaze vestibulu zakrývají zhlaví kotev



Obr. 7: Stanice Vltavská – základová deska, instalace měřicího zařízení po provrtání izolačního souvrství (Foto: Kloknerův ústav ČVUT)



Obr. 8: Stanice Vltavská – základová deska, zařízení pro měření tlaku na základovou desku (Foto: Kloknerův ústav ČVUT)



Obr. 10: Stanice Malostranská, ražba drenážní štol podél vnější stěny vestibulu

jsou kotveny do stávající nosné železobetonové podzemní části a do nadzemní nosné ocelové konstrukce vestibulu. Pro zajištění konstrukčního dílu vestibulu proti vztlaku jsou nově postaveny železobetonové prahy zakotvené do původních podzemních stěn. Statické zapojení podzemních stěn pro zajištění celkové odolnosti konstrukce proti vztlaku je znázorněno na obr. 9. V rámci povodňové ochrany byla provedena dostavba a rozšíření nadzemní části vestibulu, a to v celém půdorysu podzemní části. Otvory a vstupy do vestibulu jsou chráněny pomocí mobilních hradítek do výšky 3,0 m. Architektonické řešení je navrženo v duchu řešení původního. Nové obvodové stěny jsou obloženy kombinací kamenného obkladu a obkladu z neprůhledného skla.

#### Stanice Malostranská

Provedené technické řešení zamezuje povrchovému zaplavení metra a současně snižuje HPV v bezprostřední blízkosti vestibulu na úroveň, ověřenou statickým výpočtem tak, aby nedošlo k poškození nosné konstrukce. Parková plocha atria bude na povrchu během povodně uzavřena ze všech stran; ze tří stran pomocí nových linií ochranných hrází z mobilních hradítek, ze západní strany tvoří bariéru objekt Valdštejnské jízdárny. Mobilní hradítka jsou založena na pilířích z tryskové injektáže. V zahrazeném území jsou v podzemí podél vnější stěny vestibulu provedeny odvodňovací štolky, zaústěné do čerpacích šachet (obr. 10). Tento drenážní systém je znázorněn na obr. 11. Horizontální ochranný trubní drén DN 250 je vedený ve štolce ve sklonu 1 % směrem k čerpací šachtě. Zbýlý prostor štolky kolem potrubí je zaplněn štěrkopískovým obsypem pro zajištění filtrační stability odvodňovaného prostředí. Při povodni budou průsaky podzemní vody odvedeny drenážním potrubím ve štolách do šachet, odkud bude voda čerpadly odvedena za linii hradítek do vzdušné Vltavy. Tím se sníží HPV v prostoru atria a bude omezen hydrostatický tlak na vestibul stanice. V projektu byly respektovány požadavky na zajištění stability podzákladí Valdštejnské jízdárny. Proudění podzemní vody v uzavřeném prostoru atria bylo ověřeno HG průzkumem a matematickým modelem.

#### Stanice Florenc

Přestupní stanice je tvořena původní stanicí Florenc C (dokončená v roce 1974) a stanicí Florenc B (dokončená v roce 1985). Obě stanice spolu tvoří jeden neoddělitelný celek, který musí být chráněn jednotně. Stanici Florenc C tvoří hloubený podzemní objekt pažený podzemními stěnami. Stanice byla stavěna shora dolů. Před výkopy byl proveden horní strop z předpjatých mostních nosníků. K rozepření podzemních stěn byly využity ocelové mezistropy. Po dosažení základové spáry cca 12 m pod terémem byla provedena železobetonová deska, která rovněž rozpirá podzemní stěny. Základovou desku stanice Florenc C tvoří jeden dilatační díl délky 221,0 m. Stavební řešení stanice neumožňuje

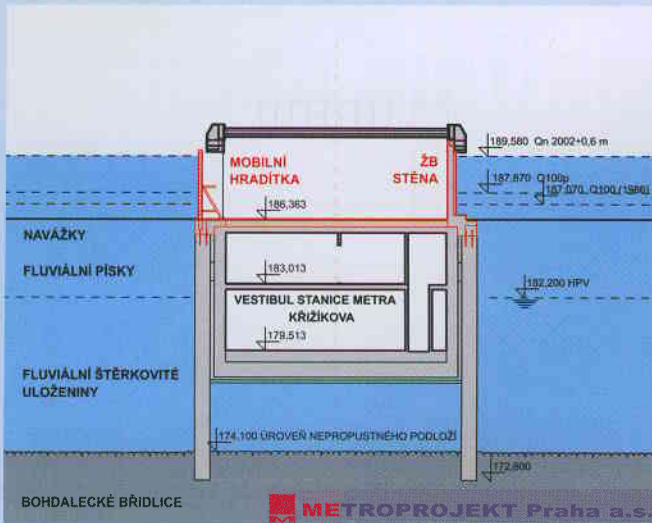
její přetížení při návrhové povodni. Původní statické řešení uvažovalo s hladinou stoleté vody na úrovni o 2,38 m nižší, než je dnešní návrhová povodeň. Proti povrchovému zaplavení je stanice v krátkodobém výhledu chráněna mobilními hradítky na staticky ověřenou výšku Q100p. Při překročení této úrovně bude vnitřní prostor stanice organizovaně zaplaven povodňovou vlnou přepadem přes hradítka (obr. 12). Zaplavením vnitřního prostoru stanice Florenc dojde k vyrovnání tlaků a zabrání se tím poškození stanice. Je prokázáno, že škody způsobené nuceným organizovaným zaplavením by byly řádově nižší a podstatně rychleji odstranitelné nežli škody způsobené případnou destrukcí nosných konstrukcí.

Ve střednědobém výhledu se uvažuje s plnohodnotnou ochranou do výšky návrhové povodně, která vyžaduje rozsáhlé a nákladné stavební úpravy přestupní stanice. Zajištění základové desky proti vztlaku od návrhové povodně bylo částečně provedeno při rozsáhlém hydrogeologickém a stavebně-technickém průzkumu stanice Florenc C, dokončeném v říjnu 2005. V základové desce stanice jsou hermeticky zabudovány odlehčovací prvky, skrz které byly provedeny vystrojené HG vrty (obr. 13). Při povodňové situaci bude provedeno cílené snižování hydrostatického tlaku pod základovou deskou samovolným přetokem přes uzavěry odlehčovacích prvků z nerezové oceli (obr. 14). Filtrační stabilita v podzákladí stanice při proudění podzemní vody během povodňové situace je zajištěna obsypem vrstvy z plaveného písku zrnitosti 2–4 mm a hydraulicky testovanou výstrojí. Tlaková podzemní voda bude z podzákladí stanice odvedena gravitačně do stávající dostatečně kapacitní nefekální jímky metra a odtud přečerpána do vzdušné Vltavy. Odlehčovací prvky jsou zachyceny na obr. 15. Použitý systém pro snižování hydrostatických účinků pomocí dodatečně vestavěných odlehčovacích prvků je originálním řešením, které nebylo v naší stavební praxi doposud realizováno. Funkce odlehčovacích prvků byla ověřena podrobným hydrogeologickým průzkumem v prostoru pod stanicí a teoreticky také matematickým modelem proudění při povodňové situaci.

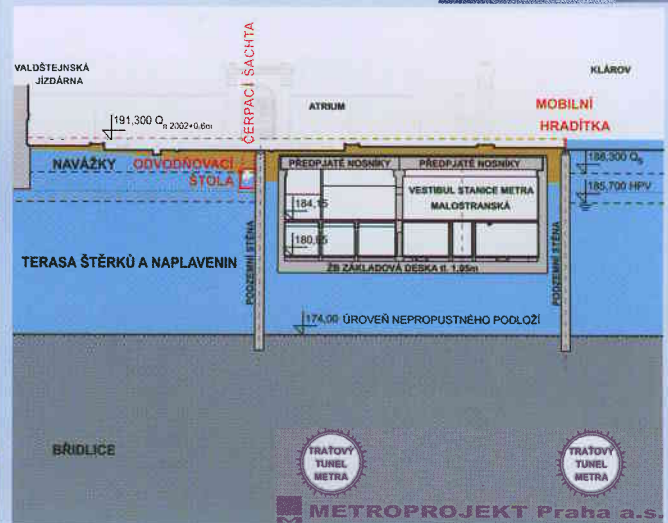
Modelové řešení navrhuje doplnit počet odlehčovacích prvků tak, aby došlo k rovnoměrné redukci hydrostatického tlaku pod celou plochou základové desky. Definitivní ochrana přestupní stanice bude dokončena stavbou zábran do výšky návrhové povodně po zabezpečení zbylých konstrukčních dílů stanice Florenc C a po provedení nástavby na vestibulu Florenc B.

#### Shrnutí poznatků z návrhu povodňové ochrany metra

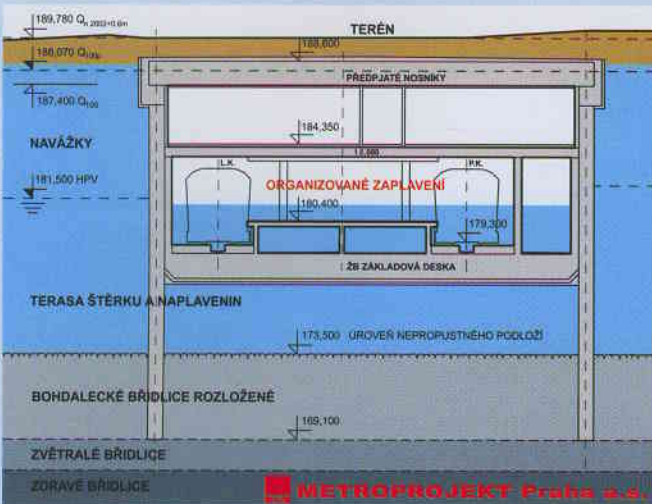
Současně s návrhem hrazení povodňové vlny je nutné dbát na statické posouzení chráněného objektu. Navržená opatření jsou funkční pouze do výše návrhové povodně. Při překročení této úrovně je nutné počítat se zaplavením vnitřního prostoru



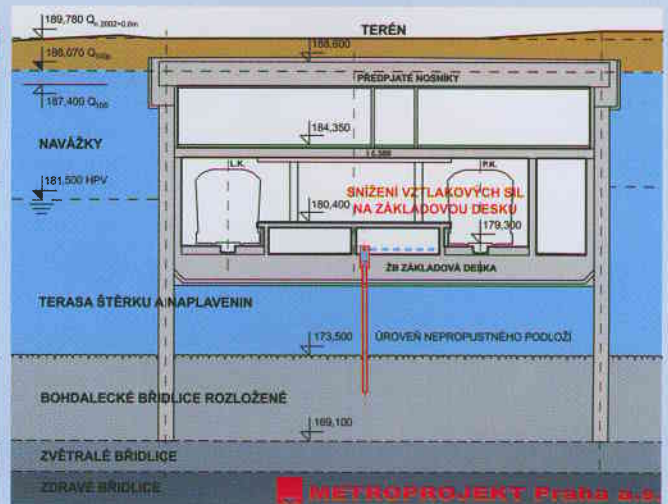
Obr. 9: Stanice metra Křižikova – příčný řez vestibulem. Statické zapojení podzemních stěn pro zajištění celkové odolnosti konstrukce proti vzltlaku.



Obr. 11: Stanice metra Malostranská – příčný řez vestibulem. Drenážní systém podél vestibulu.



Obr. 12: Stanice metra Florenc C – příčný řez nástupištěm. Zajištění konstrukce zaplavením v krátkodobém výhledu.



Obr. 14: Stanice metra Florenc C – příčný řez nástupištěm. Zajištění základové desky odlehčovacími prvky.



Obr. 13: Stanice Florenc C – pohled z nástupiště. Provádění HG vrtu pro čerpací zkoušku skrz hermeticky osazené zhlaví odlehčovacího prvku s odvedením průsaků do bočního potrubí.



Obr. 15: Stanice Florenc C. Vystrojené tlakově odolné zhlaví odlehčovacího prvku, zabudované do základové desky.

objektů. V článku popsána řešení zajištění nosných konstrukcí jsou obecně platná pro ohrožené stavby v záplavové zóně.

Uvedenou metodu dodatečné vestavby prvků do stavební konstrukce pro trvalé měření hydrostatických tlaků na plášti lze aplikovat i v dalších případech u staveb s masivním železobetonovým ostěním.

Odvodňovací systémy pro snižování vysoké hladiny podzemní vody lze použít také v území chráněném systematickými hradítky podél vodního toku. Popsaný originální způsob snižování hydrostatických účinků pomocí odlehčovacích prvků je alternativou k realizaci konvenčních stavebních opatření a lze ho vhodně využít také u staveb umístěných v chráněném území a ohrožených zvýšenou HPV.

Ing. Martin Jakoubek,  
METROPROJEKT Praha, a. s.

Obrázky a foto: METROPROJEKT Praha, a. s.,  
a Libor Štěrba

## Anti-flood protection of the Prague underground – the project and constructional layout

The following article describes development of the project and the procedure used during the construction of anti-flood protection of the Prague underground in the period after the floods in 2002 until today. Permanent constructional measures and special adjustments were carried out to strengthen the bearing structures of the underground, enabling reduction of hydrostatic effects on structural elements during flood emergencies. The text deals with technical solution of the anti-flood protection of the stations Vltavská, Křižikova, Malostranská and Florenc using several original and completely new solutions and procedures. The project of anti-flood protection of the underground was elaborated by the METROPROJEKT Praha, Co.