

*Jan L. Víték*

# ZKUŠENOSTI Z VÝSTAVBY BETONOVÝCH MOSTŮ V ČESKÉ REPUBLICE

## EXPERIENCE FROM CONSTRUCTION OF CONCRETE BRIDGES IN THE CZECH REPUBLIC

Na začátku 20. století betonové mosty nahradily mosty kamenné, které se vyznačovaly vysokou únosností a trvanlivostí. Železobetonové mosty, pro větší rozpětí zvláště obloukové, byly stavěny nejprve tradičními metodami, později metodami pokrokovými. Pokud byly použity kvalitní materiály, je kvalita těchto mostů dodnes velmi dobrá. Od 50. let se začala rozvíjet výstavba předpjatých betonových mostů. Extrémně rychlý vývoj této technologie výstavby vyústil v některé nedostatky, které byly pozorovány u předpjatých mostů v celosvětovém měřítku a jejichž důsledkem obvykle byla snížená životnost některých z nich. Další vývoj vedl ke zlepšení technologií, a proto lze očekávat, že nedávno postavené předpjaté konstrukce budou splňovat současné požadavky na únosnost, použitelnost i trvanlivost.

Concrete bridges replaced at the beginning of the 20th century stone bridges, which exhibited very good load carrying capacity as well as durability. Bridges made of reinforced concrete, arch bridges for larger span in particular, were built by traditional methods and later by advanced methods. In cases where high quality materials were used, the quality of those bridges is also very high till nowadays. Construction of prestressed concrete bridges in our country developed since the 1950s. Extremely rapid development of new construction technologies resulted in some deficiencies which were observed at prestressed bridges worldwide. A reduction of the service life of some prestressed bridges was a consequence of such development. Further development of technologies applied in prestressed bridges led to improvements and it can be expected that recently built prestressed structures will satisfy the requirements on safety, serviceability and durability.



1

**P**o staletí se stavěly mosty kamenné, které zaručovaly vysokou únosnost. Většinou šlo o mosty klenbové, resp. obloukové. Při minimální údržbě dosahovaly kamenné mosty životnosti větší než tisíc let, avšak jejich nevýhodou byla náročná výstavba a s rostoucími náklady na lidskou práci i vysoká pořizovací cena. Vznik betonu jako umělého kamene vedl k postupné náhradě přírodního kamene betonem. Nejprve se začaly stavět obloukové mosty z prostého a železobetonu, později i železobetonové trémové konstrukce. Zásadní rozdíl byl však v tom, že kamenné mosty jsou sestaveny z relativně malých prvků, zatímco betonové, resp. železobetonové konstrukce byly monolitické, tedy jednotlivé části byly velké kompaktní celky tvořící základní prvky mostu jako oblouk nebo mostovka. Bylo proto nutné podrobněji se zabývat statikou konstrukce a řešit i možnost její deformace, což vedlo ke vzniku dilatačních dílů oddělených spárami.

Prvním betonovým mostem postaveným v českých zemích je malý most

přes Rokytku v Praze-Libni dokončený v roce 1896. Má rozpětí 13,3 m, vzepětí 2,75 m a jeho jedna klenba je z prostého betonu. (obr. 2)

Odlišný charakter betonových a kamenných konstrukcí vedl ke změnám v konstrukčním systému. Zatímco kamenné mosty měly ve velké většině případů na obloucích násyp, na kterém pak byla umístěna mostovka, pro betonové mosty je typická konstrukce bez násypu s mostovkou podepřenou na obvykle tenkých stojkách, popř. na odlehčovacích klenbách, a mezi obloukem a mostovkou vzniká volný prostor. To vede k vylehčení konstrukce a k elegantnímu vzhledu betonových obloukových mostů, které jsou vysoce atraktivní dodnes.

Vývoj konstrukcí pokračoval, stavěly se zejména obloukové mosty s horní mostovkou, ale též řada oblouků se spodní mostovkou zavěšenou na obloucích pomocí železobetonových táhel. Výstavba železobetonových mostů probíhala na pevné skruži. Tak byl postaven i betonový oblouk mostu u Podolska přes Vltavu,

**1** Dálniční most u Oparna **2** Most přes Rokytku v Praze-Libni

**1** Highway bridge near Oparno  
**2** Bridge over the Rokytkva river in Prague-Libeň

2





kdy se otevřela přímá spolupráce se západními státy a i u nás začaly být používány nejvyspělejší technologie např. u předpínacích systémů. Též zejména významní investoři, jako je ŘSD ČR nebo dnes SŽDC, zvýšili své požadavky na kvalitu provádění veškerých stavebních prací. Současně cca od roku 1990 došlo celosvětově k rychlému vývoji v technologii betonu a nyní jsou k dispozici nové vysokohodnotné materiály. Dá se tedy očekávat, že v současné době stavěné konstrukce by měly splňovat požadavky na plánovanou životnost.

### Železobetonové mosty

Beton se prosadil jako náhrada kamene zejména díky své nízké ceně a možnosti téměř neomezeného tvarování konstrukce. Pro větší rozpětí bylo možné navrhovat vzhledem k charakteru železobetonu prakticky jen obloukové konstrukce. Již v době před 1. světovou válkou se postavilo několik mostů o rozpětí do 50 m. Jako příklady lze uvést mosty v Nymburce (1912) (obr. 3), Hlávkův most v Praze (1912 až 1913) a Mánesův most v Praze (1914). Oblouky se spodní mostovkou může reprezentovat most v Hořepníku o délce 25 m, který navrhl prof. Bechyně v roce 1912 (obr. 4).

Po 1. světové válce vývoj pokračoval a bylo postaveno mnoho obloukových železobetonových konstrukcí. Jen v Praze byly v poměrně v krátké době postaveny tři mosty přes Vltavu (Trojský a Libeňský (1928) a Jiráskův (1933)). Všechny byly navrženy Ing. Františkem Menclem, který měl jako pracovník pražského magistrátu mosty v Praze na starosti. Trojský most byl pokrokovou konstrukcí s tříkloubovými železobetonovými oblouky o rozpětí maximálně 47 m a mostovkou podepřenou tenkými stojkami. Jeho šířka byla pouze 16 m, a proto nebyl dostatečný pro zvyšující se požadavky provozu a byl v 80. letech demontován a nahrazen novou konstrukcí.

Most Libeňský (obr. 5) má též tříkloubové oblouky o rozpětí maximálně cca 43 m. Byl postaven v tehdy okrajové části města, která byla v té době převážně průmyslová a na-



ktej má dodnes rekordní rozpětí betonového oblouku v ČR – 150 m. Teprve rozvoj technologie předpjatého betonu v druhé polovině 20. století umožnil pokrokovější postupy výstavby i u železobetonových oblouků.

Trámové železobetonové konstrukce byly vhodné pro menší rozpětí a i ty byly později nahrazeny konstrukcemi předpjatými.

Předpjatý beton se ve Francii a v Německu začal rozvíjet již před válkou, avšak u nás se první konstrukce stavěly až v 50. letech 20. století. V době socialistické republiky byl vývoj nové technologie předpjatého betonu velmi náročný. Chyběly zkušenosti a velmi omezený kontakt se západními vyspě-

lymi státy neumožňoval rychlý přenos informací o nových technologiích. Přesto se podařilo velice úspěšně vyvinout vlastní technologie pro výstavbu mostů podobně jako v zahraničí. Kvalita našich betonových konstrukcí zejména v oblasti návrhu byla jistě srovnatelná se zahraničím. Bylo celkem samozřejmé, že rozvoj tehdy nové technologie se nevyhnul některým vývojovým stadiím, která byla později považována za nevhodná a která vedla např. k menší trvanlivosti některých předpjatých konstrukcí. Dnes též víme, že kvalita provádění v období socialistického státu nebyla na dostatečné úrovni, což také vedlo k nižší životnosti betonových mostů. Situace se změnila po roce 1990,

cházel se tam i holešovický přístav. Vzhledem k poválečné situaci (stavba začala v roce 1924) nebyl dostatek prostředků a bylo rozhodnuto postavit most s minimálními náklady. Proto se Ing. František Mencl uchýlil ke koncepci starších kamenných mostů a navrhl most s oblouky z prostého betonu s nadnásypem. Protože most byl stavěn v místě teprve budoucího koryta řeky Vltavy, k výrobě betonu mostu byl využit vykopaný netříděný materiál. Vysoký tlak na snižování nákladů zároveň vedl k minimalizaci obsahu cementu v betonu. Zatímco např. u staršího Mánesova mostu byl beton pro oblouky míchán v poměru 1 : 4, v případě Libeňského mostu byl poměr cementu a kameniva 1 : 5 až 1 : 6. To odpovídá množství 250 až 200 kg cementu na 1 m<sup>3</sup> betonu (u pilířů bylo cementu ještě méně – poměr 1 : 8 až 1 : 12) [1]. Návrh konstrukce mostu s nadnásypem vyústil v esteticky nepříznivé velké plochy poprsních zdí nad pilíři. Proto Ing. František Mencl přizval arch. Pavla Janáka, který navrhl profilování stěny nad pilíři ve tvaru pětiúhelníka, mohutné zábradlí a betonové sloupy veřejného osvětlení. Napojení rámových konstrukcí na oblouky, které nevypadalo esteticky, bylo zakryto mohutnými schodišti. Nekvalitní provedení mostu vedlo k jeho postupné degradaci až do současného stavu, kdy je jeho zatížitelnost minimální. Je ale nutné podotknout, že i přes uvedené nedostatky je most používán již přes 90 let.

Most Jiráskův byl dokončen pouhých pět let po Libeňském mostě. Přitom konstrukce jeho oblouků (maximální rozpětí 51 m) s tenkými stojkami byla již velmi pokroková, most je velmi elegantní a úspěšně slouží silnému provozu dodnes. Jiráskův most byl navržen podobně jako Libeňský na šířku 21 m.

V roce 1928 byly dokončeny další významné mosty s velkým rozpětím. Silniční most přes Vltavu v Kralupech má rozpětí hlavního pole 80 m (obr. 6) a sdružený most (převádí silniční provoz a Křižíkovu železnici) přes Lužnici v Bechyni má rozpětí 90 m [2]. Oba mosty jsou ve velmi dobrém stavu. V posledních letech byly opravovány,

avšak šlo pouze o povrchové opravy betonu, a nikoli o zásahy do nosného systému konstrukcí.

Most ve Štěchovicích byl dokončen v roce 1939. Rozpětí oblouku s mezilehlou mostovkou je cca 114 m. Pevnost betonu oblouku dosahovala mimořádné kvality až 68 MPa, přestože v té době nebyly k dispozici žádné chemické přísady typu plastifikátorů. Kvalita betonu byla dosažena pouze vhodnými materiály, volbou poměru složek a řádným hutněním na stavbě. V době 2. světové války Němci uvažovali o zbourání mostu a vysoká kvalita betonu byla jedním z faktorů, který podpořil jeho zachování.

**3** Most přes Labe v Nymburce **4** Most v Hořepníku **5** Libeňský most přes Vltavu v Praze **6** Most v Kralupech  
**3** Bridge over Labe river in Nymburk  
**4** Bridge in Hořepník **5** Libeňský Bridge over the Vltava river in Prague **6** Bridge in Kralupy



5



6



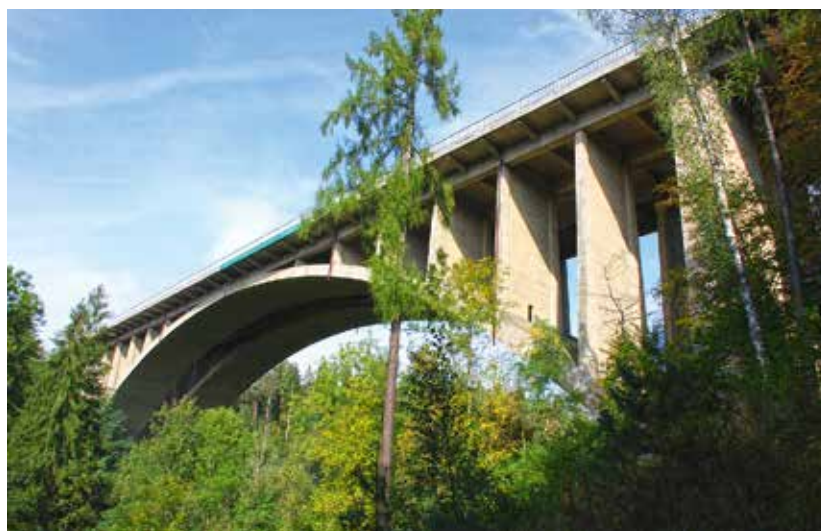
počátku provozu dálnice do Brna, je kvalita oblouků natolik dobrá, že budou využity i po druhé rekonstrukci, která je ve stadiu projektování a která předpokládá rozšíření mostu na tři jízdní pruhy v každém směru.

V poválečném období bylo postaveno ještě několik zajímavých železobetonových konstrukcí. Velmi elegantní je obloukový Štefánikův most v Praze (obr. 9), který se vyznačuje štíhlostí oblouků i stojek a slouží hustému pražskému provozu od roku 1951. Další oblouky byly postaveny ve Zbraslavi (rozpětí 86 m, 1964), kde byla použita technologie samonosné skruže z betonářské výztuže oblouku, a u Lokte (rozpětí 126 m, 1975), který byl později rozšířen na čtyři jízdní pruhy.

7

V předválečné době byla zahájena stavba již zmíněného největšího silničního mostu u nás – mostu přes Vltavu u Podolska (obr. 7). Most byl navržen Ing. Ladislavem Pacholíkem, na výpočtech pracoval Ing. Jan Blažek a zajímavé je, že se na návrhu nepodílel žádný architekt. Most dosahoval tehdy největšího rozpětí v Evropě (150 m) a jeho návrh získal několik ocenění (např. „Le beau pont de l'Europe“ v Paříži v roce 1937). Jeho šířka 8,5 m je na dnešní poměry malá, avšak most dosahuje vysoké kvality a jeho konstrukce je únosná i pro současný provoz.

Koncem 30. let se rozbíhala výstavba dálnice z Prahy do Brna. Prvními objekty, které se začaly stavět, byly mosty. Protože směrové a výškové požadavky na vedení trasy dálnice před válkou a v 70. letech, kdy se reálně stavěla, byly jiné, musely se některé dříve postavené mosty opustit (např. most u Borovska) a jiné rekonstruovat, např. most Šmejškalka (obr. 8) nebo most u Píště. Kvalita obloukových mostů však byla relativně vysoká. U mostu Šmejškalka, který je provozován od



8



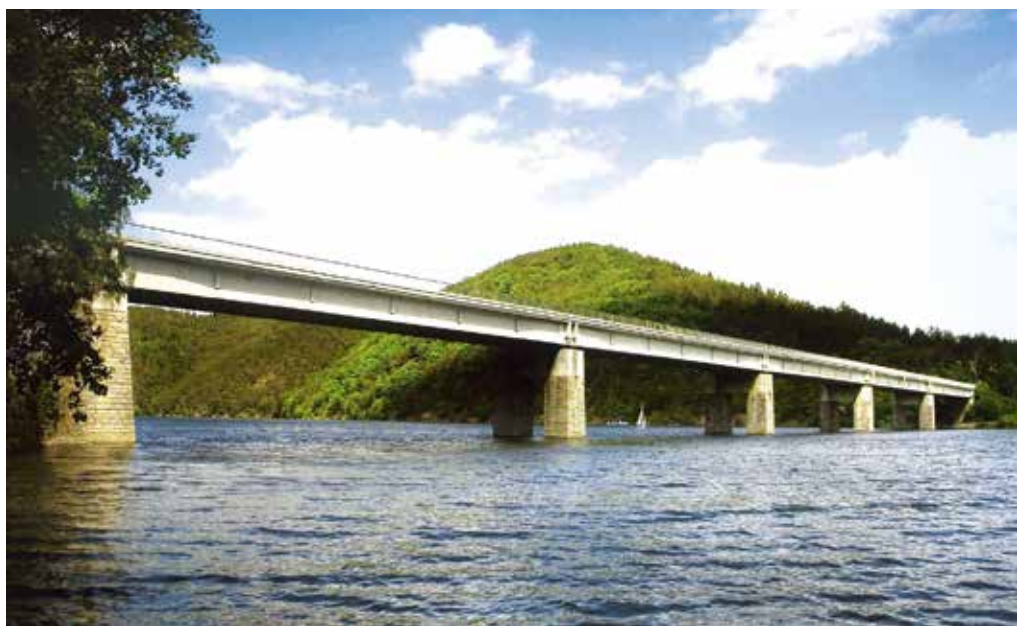
9

7 Most přes Vltavu u Podolska 8 Most přes údolí Šmejškalky 9 Štefánikův most v Praze 10 Most v Cholině z předpjatých prefabrikovaných nosníků  
7 Bridge over the Vltava river at Podolsko  
8 Bridge over Šmejškalka valley 9 Štefánik's Bridge in Prague 10 Bridge made of precast beams at Cholin

Moderní technologií betonáže letmo byl postaven dálniční most u Oparna (rozpětí oblouku 135 m, 2010) (obr. 1). Velké obloukové betonové mosty byly využity i na železnici. Viadukt Loučky byl postaven v roce 1952 s obloukem o rozpětí 110 m nebo dlouhý železniční most v Braníku s rozpětím oblouků 53 m pocházející z roku 1955.

Trámové a rámové mosty ze železobetonu bývaly použity pro malá rozpětí, neboť pro větší rozpětí již vzhledem k charakteru železobetonu nevycházejí ekonomicky příznivě. Přesto byl v roce 1962 dokončen dvoupolový železobetonový rámový most o rozpětí 2× 48,1 m jako jižní součást soumostí Hlávkova mostu přes rameno Vltavy.

Uvedené příklady železobetonových mostů až na výjimky ukazují vysokou trvanlivost těchto konstrukcí. Pokud byly použity kvalitní materiály – zejména beton – a pokud bylo krytí výztuže dostatečné, pak železobetonové mosty jasně prokázaly, že jsou schopny vydržet dnes plánovanou životnost 100 let. Musí být však přiměřeně udržovány, což znamená především včasnou výměnu izolace a udržování dilatačních závěrů, aby skrze ně voda nepronikala k ložiskům a úložným prahům, které v případě, že obsahuje soli, mohou degradovat. Hlavní nosné prvky obloukových mostů s horní mostovkou – oblouky – nejsou v přímém kontaktu se závěry a většinou nejsou přímo ostříkovány vodou se solí v zimním období, a proto mohou déle vydržet. (U mostů se spodní mostovkou je tomu právě naopak, a proto se u těchto mostů degradace projevila podstatně mnohem více než u mostů s mostovkou horní.) V případě, že byl použit nekvalitní beton, zářným příkladem je Libeňský most, se degradace projevila velmi významně. Jeho rámová pole byla prohlášena za neopravitelná, a dokonce jsou dočasně podepřena, aby most mohl být používán za omezeného provozu. Únosnost oblouků je značně omezena a vzhledem k heterogenitě materiálu a staticky určitému statickému systému, který neumožňuje žádnou redistribuci namáhání, není možné spolehlivě stanovit její skutečnou



10

hodnotu. Riziko křehkého porušení je velké. Tento příklad jasně ukazuje, že šetření na kvalitě je velmi nevhodné, což se u Libeňského mostu projevilo jak u návrhu konstrukčního systému, který byl zastaralý již v době výstavby, tak i u nekvalitního provedení.

Naopak betonové mosty, které byly vhodně navrženy a kvalitně provedeny, budou mít trvanlivost přesahující dnes uvažovaných 100 let a některé po rekonstrukcích ponese zatížení dokonce větší, než na které byly původně dimenzovány.

### Mosty z předpjatého betonu

Předpjaté mosty se u nás začaly stavět v 50. letech minulého století. Protože šlo o novou, nevyzkoušenou technologii, stavěly se nejprve menší konstrukce, avšak relativně rychle se přistoupilo k velkým mostům. Početnou skupinu tvoří mosty z tyčových prefabrikátů, které sice nedosahují velkých rozpětí, ale z hlediska významnosti tvoří podstatnou skupinu mostů na silniční i železniční síti. Jejich opravy a výměny proto nezanedbatelně ovlivňují provoz.

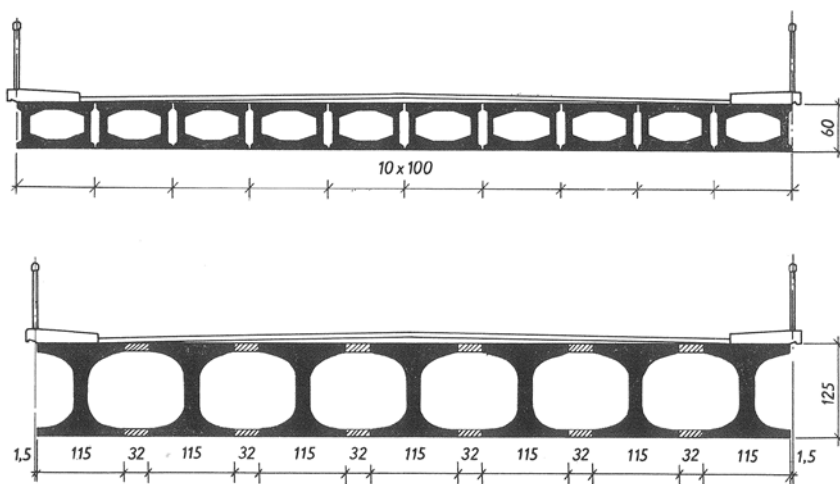
#### Mosty z tyčových prefabrikátů

Mosty u Cholína a Živohoště se staly jedny z prvních konstrukcí stavěných z předpjatých betonových nosníků (obr. 10). Byly použity velké nosníky

s průřezem ve tvaru písmene T složené z několika dílů na rozpětí 50 m, jejichž hmotnost přesahovala 200 t. Nosníky byly sestaveny za opěrou, kde byly též předepnuty pomocí kabelů sestavených z 12 drátů Ø 4,5 mm. Pomocí zavázací ocelové dráhy byly pak hotové nosníky přesunuty na místo uložení do mostního pole. Dnes jsou tyto konstrukce staré cca 60 let a fungují spolehlivě.

Během 50. a 60. let byla vyvinuta řada nosníků, především na menší rozpětí, a to pro silniční i železniční mosty. Nejvíce se však rozšířily dva typy prefabrikovaných nosníků, a to typ KA a typ I (obr. 11).

Nosníky typu KA měly komorový průřez a byly dodatečně předepnuty. Příčné spojení nosníků bylo zajištěno probetonováním úzké mezery mezi nosníky, kde byla též spojovací výztuž. V době jejich vývoje byly považovány za velmi vhodné pro výstavbu mostů do rozpětí cca 24 m, avšak zkušenosti s jejich používáním ukázaly některé nedostatky. Komorový průřez je velmi tuhý na kroucení a neumožňuje rozdílnou deformaci jednotlivých nosníků umístěných vedle sebe. Podélný spoj byl velmi namáhán, ale zároveň obtížně proveditelný. Kvalita probetonování silně závisela na lidském faktoru. Při pojezdu vozidel byly nosníky namáhány rozdílně a postupně docházelo k uvolnění spojů a následně k poru-



11



12

šování izolace. Zatékáním do dutin nosníků začala jejich degradace, často chybělo i odvodnění dutin. Dnes jsou tyto konstrukce vyměňovány, avšak v minulosti se někdy přistupovalo k jejich opravě nabetonováním spřahující železobetonové desky. Ani toto řešení však nebylo ideální.

Nosníky typu I byly též dodatečně předepnuty a používaly se na rozpětí do cca 32 m. Dle původního návrhu měly působit jako dutinová deska. Spodní i horní pásy vedle sebe uložených nosníků byly propojeny dodatečným zabetonováním podélné spáry. Kvalitní probetonování dlouhé spáry s malým objemem a s výztuží vyčnívající z obou nosníků nebylo jednoduché. Není divu, že kvalita provedení byla nejistá. Dutiny mezi nosníky se staly nepřístupné a často docházelo k poruchám těchto spojů, následné poruše izolace a zatékání do

nosníků a dutin mezi nimi. Při nedokonalé injektáží kabelových kanálků byla předpínací výztuž napadena korozi. V poslední fázi jejich výroby (cca v 80. letech) byly nosníky inovovány, spodní pás byl užší a nosníky se již nespojovaly na úrovni spodního pásu, ale byly propojeny pouze nahoře spřahující železobetonovou deskou. Působily tak jako jednotlivé I nosníky, původní idea dutinové desky byla opuštěna. Dnes jsou mosty z I nosníků též postupně vyměňovány, protože z výše uvedených důvodů trpí degradací.

Dalším rozšířeným nosníkem byl typ VST. V tomto případě byly nosníky s průřezem obráceného tvaru T předepnuty předem. Nosníky byly položeny na podpory a byla dobetonována horní spřahující deska. Změnou výšky stojiny při výrobě se vyráběly nosníky pro různá rozpětí. Spodní pásy sousedních

nosníků byly původně v těsné blízkosti, čímž v konstrukci vznikaly nepřístupné dutiny. Kolem roku 2000 byly nosníky inovovány (VSTi – obr. 12), přičemž inovace spočívala zejména v zúžení spodního pásu a vytvoření transparentnější konstrukce. Mosty z nosníků VST/VSTi jsou již modernějšího typu, nosník má deformovatelný příčný řez a při přiměřené údržbě mosty nevykazují nedostatky. Předpínání předem též snižuje riziko vznikající u dodatečně předpjatých konstrukcí, a to riziko nekvalitní injektáže.

Po roce 1990 byla opuštěna výroba nosníků KA a I a bylo navrženo několik typů poměrně podobných nosníků, které se používají dodnes. Mají průřez tvaru písmene T (např. T-93, Petra, MK-T) a jednotlivé nosníky jsou propojeny spřahující betonovou deskou. Nosníky se obvykle navrhují do rozpětí 32 m. Poddajný příčný řez umožňuje deformaci při nerovnoměrném zatížení, a proto nedochází k poruchám izolace z důvodu statického působení nosníků. Životnost izolace je dána jejím materiálem a kvalitou provedení. Mosty lze navrhovat jako prostá pole nebo jako spojitě nosníky, popř. jen jako konstrukční spojitě nosníky, kde jsou jednotlivá pole propojena pérovou deskou. Dosavadní zkušenosti ukazují, že mosty z nových prefabrikátů netrpí nedostatky, a dá se očekávat, že jejich plánovaná životnost bude při přiměřené údržbě dosažena.

### Monolitické a segmentové mosty z předpjatého betonu

Postupné zavádění předpjatého betonu vedlo i u nás k rozvoji tzv. moderních technologií výstavby, které spočívají ve výstavbě po částech s využitím jejich postupného předpínání. Jde o betonáž na výsuvných skružích, jedná se o mosty vysouvané, mosty ze segmentů a mosty letmo betonované (obr. 13). Přestože použití každé z uvedených technologií znamenalo vyřešit řadu problémů, podařilo se je ve velmi krátké době, cca od 50. do 70. let 20. století, vyvinout a aplikovat na mostních konstrukcích. Představovaly totiž významný pokrok ve způsobu realizace mostů s dopadem jak na rychlost výstavby,



13

tak i na náklady. I názory na fungování předpjatých i nepředpjatých konstrukcí byly v mnoha směrech odlišné ve srovnání s tím, jak na betonové konstrukce pohlížíme dnes. Podstatně menší důraz byl kladen na jejich trvanlivost, provedení detailů a kvalitu provádění. Krycí vrstva výztuže byla menší a nebyly specifikovány přísné požadavky na kvalitu betonu z hlediska odolnosti proti prostředí. V některých případech byl přeceňován vliv předpětí, což vedlo k menšímu množství betonářské výztuže. Znalosti o působení betonu ve smyku nedosahovaly dnešní úrovně a navrhovalo se méně smykové výztuže než dnes. Neexistovaly podrobné výpočetní metody, a proto zejména v počátečních fázích výstavby předpjatých konstrukcí byly navrhovány transparentní systémy s malým stupněm statické neurčitosti. Nevýhodou takových systémů je větší citlivost konstrukce jako celku na selhání jednoho prvku. Naopak výhodou bylo jednoznačnější stanovení namáhání jednotlivých prvků tehdejšími výpočetními metodami. Názory na bezpečnost konstrukcí se změnily a dnes je snaha navrhovat konstrukce s vysokým stupněm redundance, a tím zvyšovat jejich bezpečnost i citlivost na změnu podmínek (tzv. robustnost).

Nesmírný pokrok nastal ve vývoji předpínacích systémů. Množství malých výrobců předpínací techniky bylo redukováno na specializované dnes certifikované firmy s vlastními vývojovými středisky, které dodávají ucelené systémy a většinou i předpínací práce

samy provádějí. U prvních předpjatých konstrukcí byly používány předpínací dráty, které bývaly uloženy v monolitickém betonu bez další ochrany. Při porušení izolace již mohla slaná voda napadnout předpínací výztuž a způsobit korozi, na kterou je předpínací výztuž podstatně citlivější než výztuž betonářská. Pokud byly předpínací dráty umístěny v komoře mostu a prostě obetonovány, při průniku vody do komory hrozila jejich rychlá koroze. Umístění drátů do kabelových kanálků však jejich trvanlivost příliš nezvýšilo, protože byly užívány kanálky ocelové, které nebyly zcela vodotěsné, a též proto, že kvalita injektážních malt obecně nedosahovala současných kvalit. Důvodem byla neexistence chemických přísad, které dnes běžně používáme. Kvalitní provedení ochrany v tehdejší době bylo možné pouze za podmínky mimořádně pečlivého provádění, avšak systém socialistické výstavby bohužel vysokou kvalitu provádění často nevyžadoval.

V pozdější době byly dráty nahrazeny předpínacími lany, která používáme dodnes, a ocelové kabelové kanálky byly často nahrazeny plastovými, které jsou těsné a navíc mají menší ztrátu předpětí třením. Injektáže jsou díky chemickým přísadám a díky většímu důrazu na odzkoušení injektážních malt dokonalejší. Od cca 80. let se používají též volné předpínací kabely, které poskytují lepší možnost kontroly stavu a umožňují případnou výměnu. Vyšší stupeň ochrany proti korozi umožňují



14

**11** Příčný řez mostu z nosníků KA a I **12** Předem předpjaté mostní nosníky VSTi **13** Most přes Vltavu u Zvíkova **14** Kotvení elektricky izolovaných kabelů (Trojský most v Praze)

**11** Cross-section of a bridge made of precast beams KA and I **12** Pre-tensioned bridge girders VSTi **13** Bridge over the Vltava river at Zvíkov **14** Anchorage of electrically isolated cables (Troja Bridge in Prague)

elektricky izolované kabely (obr. 14), u nichž lze monitorovat ztrátu dokonalé ochrany a riziko vzniku koroze.

Segmentová technologie výstavby mostů vyvinutá ve Francii se prosadila i u nás. Některé podniky si vyvinuly vlastní segmenty, národní podnik Stavby silnic a železnic si zakoupil licenci francouzské firmy. U prvních mostů se používaly mokré (betonové) spáry, brzy se ale přešlo na spáry kontaktní, lepené epoxidovou pryskyřicí. Zpočátku se vedly diskuze o způsobu přenosu smyku ve spárách, které vyústily v jednoznačnou výhodnost využití malého zazubení spár z nevytuzeného betonu proti velkým vyztuženým ozubům, kde docházelo ke koncentracím napětí a následně k trhlinám. Specifikem segmentových konstrukcí je neexistence betonářské výztuže ve spárách. Tlakovou rezervou je třeba zajistit, aby nemohlo dojít k rozevření spár, což vede k vyšší spotřebě předpínací výztuže. Kvalitní slepení spáry je nutné z důvodu zajištění rovnoměrného přenosu napětí, ale i z důvodu zajištění těsnosti kabelových kanálků ve spáře. Je vhodné použít těsnící manžety vložené do spár v místech kabelových kanálků.

Dosud se tyto manžety standardně nepoužívají, protože představují další náklady a je též obtížné je do spáry umístit, pokud kabel neprotíná spáru kolmo na její rovinu. U segmentových mostů je tedy nutné ještě více dbát na zajištění spolehlivé funkce izolace, aby do konstrukce nezatekalo a předpětí zůstalo v suchém prostředí.

## Poznámky k navrhování předpjatých mostů

Starší železobetonové mosty byly obvykle navrhovány tradičními metodami. Protože se stavěly na pevné skruži, nevznikaly složité stavy napjatosti plynoucí z komplikovaného postupu výstavby. Byla snaha o transparentní působení těchto mostů, a proto tehdejší jednodušší, ale přehledné postupy návrhu vedly k dostatečně přesnému vystižení působení konstrukcí a následně k jejich správnému návrhu. S rozvojem předpjatých konstrukcí se začala situace komplikovat. Kromě složitých postupů výstavby začal stoupat význam dosud málo prozkoumaných faktorů, jako je dotvarování a smršťování betonu, relaxace předpínací výztuže, vliv smykového ochabnutí apod. U konstrukcí působících prostorově, u kombinací deskových a prutových prvků a u dalších složitějších systémů nebylo možné bez výpočetní techniky stanovit rozdělení namáhání na jednotlivé části. Proto byla snaha navrhovat konstrukce, které byly transparentní a u kterých bylo možné s vyšší mírou spolehlivosti stanovit namáhání jejich jednotlivých částí. Výsledkem byl návrh jednodušších systémů. Tento vývoj je patrný zejména u mostů stavěných betonovým letmo. Zpočátku se nevědělo, jak bude předpjatá konstrukce stavěná po malých částech působit, proto byl volen systém vahadel propojených kloubem uprostřed rozpětí, kde byla umožněna dilatace. Systém byl staticky správný, ale brzy se ukázalo, že tyto konstrukce jsou zcela nevhodné, neboť u nich v celosvětovém měřítku docházelo k nadměrným průhybům a k lomu ohybové čáry, což omezovalo komfort jízdy. Dosud není tento jev zcela vysvětlen, ale po prvních zkušenostech

se přistoupilo k výstavbě konstrukcí spojitých. Několik mostů s klouby uprostřed rozpětí bylo předčasně zbouráno, ostatní byly zesilovány a klouby byly při rekonstrukcích odstraněny.

Dalším faktorem, který se změnil, je úroveň napínání předpínací výztuže. Dle starší české normy bylo možné napínat předpínací výztuž až na 0,935násobek meze kluzu ( $\sigma_{0,2}$ ), v současné době se navrhuje na nižší hodnoty – 0,85násobek meze kluzu (ale definované jako  $f_{p0,1k}$ ). Vysoké počáteční napětí v předpínací výztuži bylo pravděpodobně důvodem větší relaxace napětí ve výztuži dříve navrhovaných konstrukcí, a tedy většího poklesu předpětí v čase, než se předpokládalo ve statických výpočtech.

Současná filozofie navrhování veškerých konstrukcí, včetně mostů vyžaduje dostatečnou robustnost, tj. malou citlivost na změnu podmínek působení, a dostatečnou redundanci, tj. malou citlivost na selhání jednotlivých částí konstrukce. Tyto požadavky vedou k návrhu mnohokrát staticky neurčitých konstrukcí, kde je obtížnější stanovit namáhání jednotlivých prvků, neboť nejde již jen o splnění podmínek rovnováhy, ale významnou roli hraje tuhost jednotlivých částí, která je závislá na řadě parametrů. Současné výpočetní numerické modely jsou schopny chování složitých systémů vymodelovat, avšak za předpokladu správných vstupních parametrů. Zatímco numerické modely dosáhly vysoké přesnosti, spolehlivost přesného zjištění vstupních parametrů zůstává omezená, resp. ve většině případů neznáme vstupní parametry dostatečně přesně. Z tohoto důvodu je nutné konstrukci navrhovat mimořádně pečlivě. Je nutné podrobně rozmyslet, jak bude konstrukce působit, a pak provést několik analýz, které potvrdí, že předpoklady výpočtu byly správné. Koncepce konstrukce musí být navržena zkušeným inženýrem a pak teprve existuje předpoklad, že bude i správně fungovat a že bude bezpečná. Z toho důvodu je zásadně špatná současná praxe, kdy se projektové práce soutěží na nejnižší cenu. Projektování je činnost, při níž se dá dosáhnout úspor na konstrukci (v pořizovacích i celoži-

votních nákladech (LCC)), ale nelze na ní šetřit. Přitom náklady na projekt jsou ve srovnání s náklady na dílo velmi malé.

## Hlavní příčiny současného stavu předpjatých mostů

Současný stav předpjatých mostů je často kritizován a předpjaté mosty jsou někdy kvůli nedostatečné trvanlivosti označovány jako špatné. I přes řadu problémů je však třeba uvážit, že předpjatých mostů je velké množství a patrně většina z nich funguje správně a jsou bezpečné. Přesto se u mnoha mostů setkáváme s nedostatky. Je nutné připomenout, že tento problém se vyskytuje celosvětově a není specifickým jen naší země. Řada nedostatků má příčinu v rychlém vývoji technologie předpjatého betonu v dobách jejích prvních realizací. U starších staveb jsou podstatně nedostatečné zkušenosti s působením předpjatých konstrukcí. Již byly zmíněny některé nedostatky mostů z nosníků KA a I. U další skupiny mostů lze hledat příčiny v nedostatečně kvalitním provedení. Je nutné přiznat, že kvalita a kontrola provádění a kvalita používaných materiálů nebyla vždy na úrovni, která je vyžadována dnes. Podstatný vliv na poruchy nosných konstrukcí mostů mají další technologie, např. hydroizolace, návrhy detailů, řešení odvodnění atd., které mohou nepřímo ohrozit nosnou konstrukci a její trvanlivost např. vlivem zatékání. V neposlední řadě je třeba zmínit nedostatečnou údržbu. Čištění mostních závěrů, odvodnění nebo včasná výměna nefunkčních částí (např. izolace) jsou nutné činnosti, které mohou ovlivnit trvanlivost i bezpečnost mostů velmi významně.

Lze tedy konstatovat, že příčin současných poruch na předpjatých konstrukcích je celá řada, a nelze paušálně prohlašovat, že předpjaté konstrukce jsou špatné. Naopak, je tomu stejně jako u jiných konstrukcí: procházejí vývojem, během kterého se stále zlepšují. Podmínkou kvalitního díla je kvalitní návrh, kvalitní zpracování a správné používání včetně údržby. Pokud by tyto podmínky byly splněny, byly by i konstrukce navrhované dříve v podstatně lepším stavu, než jsou dnes.

## Zřícení některých mostů

Mosty podobně jako jiné stavby se ve výjimečných případech i zřítí. Příčiny zřícení mohou být různé. V principu je třeba rozlišit zřícení starých konstrukcí, kde dojde k opotřebení a degradaci, popř. přetěžování, a zřícení nových konstrukcí, kde je příčinou nejčastěji lidská chyba. Pokud k takové události dojde, bylo by vhodné, aby se příčiny specifikovaly, analyzovaly a aby se z nich formulovaly závěry a poučení s cílem zabránit jejich opakování. Bohužel ne vždy tomu tak je. V posledním období došlo k několika zřícením, která patřila do obou výše zmíněných skupin.

### Trojská lávka v Praze

V prosinci 2017 došlo ke zřícení lávky v Tróji (obr. 15). Lávka o třech polích (střední pole o rozpětí 96 m) měla konstrukci visutého předpjatého pásu. Lávka byla postavena v roce 1984 a vydržela tedy v provozu necelých 34 let. Přestože od kolapsu uběhlo již více než jeden a půl roku, dosud (červen 2019) nebyla zveřejněna oficiální zpráva o tom, k čemu došlo. Naproti tomu bylo zveřejněno obvinění dvou osob. To je poněkud podivná situace.

Konstrukční systém lávky (visutý předpjatý pás) spočívá v tom, že soustava nosných lan přenáší zatížení a soustava předpínacích lan zajišťuje trvalou tlakovou rezervu v betonovém

pásu, a tím i jeho tuhost. Při selhání nosných lan dochází k pádu lávky, při selhání předpínacích lan se redukuje tlaková rezerva, v betonu mohou vznikat trhliny, a tím je ohrožena ochrana všech lan, neboť se k nim může dostávat voda a vlhkost z okolního prostředí.

V případě Trojské lávky došlo k porušení nosných lan. Příčinou byla jejich koroze. Množství nosných lan bylo podstatně větší, než by bylo nutné pro přenos zatížení. Proč tedy k jejich poškození došlo? To by mělo být výsledkem vyšetřování, které však nebylo zveřejněno, a lze tedy jen odhadovat, co se mohlo stát.

Historie lávky byla komplikovaná. Brzy po otevření byly pozorovány trhliny, lávka přežila dvě povodně, přitom povodeň v roce 2002 zřejmě lávku mimořádně přetížila. Celá lávka byla pod vodou a byla zatížena z boku tlakem proudu a nárazy plovoucích předmětů, tedy byla silně zatížena způsobem, který nebyl v návrhu předpokládán. Kromě toho byla dvakrát opravována, čímž se též ovlivnilo její statické působení. Lávka byla navrhována cca před 35 lety, kdy byly jiné předpisy i názory na ochranu předpínací výztuže. Navíc se dle různých informací dá usuzovat, že

15 Lávka přes Vltavu v Praze Tróji

15 Footbridge over the Vltava river in Prague

15



kvalita provedení nebyla příliš dobrá. Příčin ke korozi nosných lan bylo tedy zřejmě více. Nevýhodou tohoto konstrukčního systému je, že všechny průřezy jsou namáhány podobně a při selhání kteréhokoli z nich dojde k pádu lávky. Toto riziko mělo být v návrhu omezeno významným předimenzováním nosných lan.

Při zkoumání pevnosti předpínacích lan odebraných z lávky byla zjištěna zajímavá okolnost. Při zkoušce neporušeného lana byl naměřen obvyklý pracovní diagram přibližně bilineárního tvaru s pružnoplastickou větví. Tento test prokázal, že pokud lana nebyla zkorodována, jejich vlastnosti odpovídaly vlastnostem lana nového. Při zkoušce lana porušeného korozi byl zjištěn pracovní diagram, kde bylo dosaženo přetržení lana při nižší pevnosti a současně plastická větev diagramu zcela vymizela [4]. Při oslabení průřezu o 1,2 % (úbytek hmotnosti) se pevnost lana snížila o 18,5 %, ale tažnost o 80 %. Důvod je celkem prostý – oslabení lana korozi není rovnoměrné, ale na laně se vlivem lokální koroze vytvoří vruby. Při rostoucím zatížení se dosáhne plasticity v nejslabším místě, při zvýšení zatížení je protažení malé, protože délka oslabené části je také malá, a rychle se zvýší napětí, až se lano přetrhne. Toto je nebezpečná situace, se kterou je třeba počítat při vyhodnocování průzkumů dalších konstrukcí.

U předpjatých visutých pásů je pro bezpečnost konstrukce rozhodující stav nosných lan. Jejich ochrana proti korozi je zásadním prvkem ovlivňujícím jejich trvanlivost. Nyní je požadovaný způsob ochrany lan proti korozi na vyšší úrovni než před 35 lety a podle dnešních předpisů by navržené visuté předpjaté pásy měly být spolehlivější, než tomu bylo dříve. Přesto podobné systémy visutých pásů navržené v minulosti dle tehdejších zvyklostí spolehlivě fungují i dnes.

### Most Chirajara v Kolumbii

V lednu 2018 došlo během výstavby ke kolapsu klasického třípolového zavěšeného mostu Chirajara v Kolumbii [5]. Délka mostu byla 446 m, rozpětí hlav-

ního pole bylo pravděpodobně přes 200 m dlouhé. Postupnou výstavbou mostovky se přitěžoval pylon, který měl nad mostovkou tvar písmene A a pod mostovkou se oba jeho sloupky opět přibližovaly (pylon ve tvaru diamantu) a byly založeny na společném základě (obr. 16). Pod mostovkou byly oba sloupky pylonu propojeny stěnou. Horní část příčné stěny byla namáhána tahovými silami od šikmých osových sil ve sloupech pylonu. V případě tohoto mostu byla výztuž v horní části stěny nedostatečně dimenzována, nepřenesla vznikající tahové síly a došlo ke zřícení jednoho pylonu. Po analýze situace byl druhý pylon se zbytkem

**16** Most Chirajara v Kolumbii **17** Mostní pole lávky v Miami před zřícením **18** Most v Janově před zřícením **16** Chirajara Bridge, Columbia **17** Bridge span of a footbridge in Miami before collapse **18** Bridge in Genova before collapse

mostu v červenci 2018 odstřelen. V říjnu bylo rozhodnuto o výstavbě mostu nového s rozpětím hlavního pole 286 m. Příčinou kolapsu byla konstrukční chyba ve vyztužování pylonu.

### Lávka Miami

V březnu 2018 se zřítla nedokončená lávka v Miami, která překračovala rušnou komunikaci [6]. Lávka měla mít dvě pole (53 + 30 m) zavěšená na pylonu nad mezilehlým pilířem, širokou spodní pochůznou desku a střešní desku tvořící pásy příhradové konstrukce a prutové diagonály. Diagonály byly z architektonických důvodů navrženy v nezvyklém uspořádání. Výstavba byla zahájena instalací delšího pole (obr. 17), které bylo smontováno mimo komunikaci a jako celek bylo položeno na pilíře (jako prostý nosník). Chyběl pylon se závěsy a kratší pole. Po pěti

dnech se mostní pole zřítlo. Ukázalo se, že konstrukce nebyla dimenzována na působení ve stavebním stavu (při nedokončené lávce). Důvodem selhání byla patrně chybná projektová dokumentace, která nezohlednila odlišné působení konstrukce ve stavebním a v definitivním stavu.

### Most Polcevera v Janově

V srpnu loňského roku se zřítíl most Polcevera v Janově (obr. 18) [7]. Most byl uveden do provozu v roce 1967. Neobvyklá konstrukce zavěšeného mostu, jejímž autorem byl Riccardo Morandi, byla stejným autorem použita několikrát. Asi nejznámějším je most přes jezero Maracaibo ve Venezuele, který měl pět velkých polí o rozpětí 235 m, zatímco most v Janově měl největší pole o délce cca 210 m. Jako nejpravděpodobnější příčina kolapsu



16

17

#### Literatura:

- [1] FISCHER, J., FISCHER, O. *Pražské mosty*. Praha: Academia, 1985.
- [2] VÍTEK, J., VÍTEK, J. L. 100 let betonových mostů. In: *Sborník konference Betonářské dny 2018*. Praha: ČBS, 2018.
- [3] VÍTEK, J. *Historie předpjatého betonu*. Edice Betonové stavitelství. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2016.
- [4] KALNÝ, M. Kvalita předpjatých betonových mostů. In: *Sborník sympozia Mosty 2019*. Sekurkon, 2019.
- [5] Chirajara bridge collapse. In: *Wikipedie* [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Chirajara\\_bridge\\_collapse](https://en.wikipedia.org/wiki/Chirajara_bridge_collapse)
- [6] Florida International University pedestrian bridge collapse. In: *Wikipedie* [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Florida\\_International\\_University\\_pedestrian\\_bridge\\_collapse#Collapse](https://en.wikipedia.org/wiki/Florida_International_University_pedestrian_bridge_collapse#Collapse)
- [7] Ponte Morandi. In: *Wikipedie* [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Ponte\\_Morandi](https://cs.wikipedia.org/wiki/Ponte_Morandi)



18

se uvádí selhání jednoho ze závěsů. Závěsy mostu z kabelů chráněných předpjatou obetonávkou se měly vyznačovat vysokou trvanlivostí. Tento předpoklad nebyl pravděpodobně splněn. Protože most měl malý stupeň statické neurčitosti, vedlo pravděpodobně selhání jednoho ze závěsů ke kolapsu části mostu o délce cca 200 m. Zdá se, že nepravděpodobnější příčinou byla koroze předpínací oceli v závěsu mostu. Ochrana předpětí nebyla dostatečná a společně s dalšími příčinami jako přetěžování konstrukce, nedostatečná údržba atd. vedla až k zřícení mostu.

### Příčiny selhání mostů

Uvedené případy tragických konců mostních konstrukcí ukazují na různé příčiny. Jedna spočívá v návrhu málo robustního konstrukčního systému společně s nedostatečnou ochranou předpínací výztuže, přitom v době výstavby se použitá ochrana považovala za velmi dobrou. Druhou příčinou je konstrukční chyba při návrhu konstrukce. Třetí pak nevěnování dostatečné pozornosti stavebním stavům, kdy konstrukce ještě nepůsobí v definitivním statickém systému.

Při průzkumu stávajících mostů je třeba věnovat mimořádnou pozornost stavu předpjaté výztuže. Dosud neexistují nedestruktivní metody, které by byly schopny identifikovat stav koroze předpínacích kabelů v konstrukci, a jako jediná možnost se nabízí použití lokálních sond. Pro zajištění bezpečnosti lze v případě pochybností doporučit další zesílení konstrukce (např. dodatečným předpětím). Ostatní zmíněné příčiny jsou typickým případem selhání lidského faktoru. V našich podmínkách by tedy bylo vhodné zavést kontroly projektů nezávislým subjektem, jak je tomu např. v Německu nebo v Británii. Takové kontroly nebo supervize by jistě byly efektivní a vynaložené náklady by se jistě mnohonásobně vyplatily.

### Závěr

Starší železobetonové mosty (zejména obloukové s větším rozpětím) se během svého provozu, některé po dobu více než 100 let, ukázaly jako spolehlivé únosné konstrukce. Mnohé byly ve své době navrženy na zatížení, které neodpovídá současným požadavkům, a přesto mohou být

zrekonstruovány tak, aby unesly současné vyšší zatížení. Některé předpjaté konstrukce z počátečních období jsou poplatny době svého vzniku a projevují se u nich závady, které nebyly vzhledem k malým zkušenostem s tehdy novou technologií jejich autory předpokládány. Řada závad má příčiny v nekvalitním provádění z dob před rokem 1990. V současnosti je však technologie předpjatého betonu vyvinuta již natolik, že by se již žádné významné závady neměly vyskytnout.

Na druhé straně se způsob navrhování konstrukcí změnil a s tím vznikají nová rizika. Snaha o neobvyklá řešení s cílem dosažení originality na úkor transparentního statického působení může být riziková. V současnosti neúměrný tlak na snižování nákladů nepřispívá kvalitnímu návrhu ani kvalitnímu provedení mostního ani jiného díla. Mimořádně tenkostěnné a vylehčené konstrukce se mohou časem ukázat jako rizikové. Někteří projektanti příliš spoléhají na výsledky numerických metod, což může vést k rizikovému návrhu. Numerické modely (včetně těch nelineárních) jsou pouze modely a nemusí zcela odpovídat reálnému působení konstrukcí. Inženýrský přístup, který musí zhodnotit veškeré souvislosti a navrhnout základní koncepci díla, je nezastupitelný. Nelze přeceňovat ani význam návrhových norem. Uvedená selhání mostů současně ukazují, že příčiny nebyly ve špatných návrhových metodách nebo v chybných normových ustanoveních, ale v chybných konstrukčních detailech, chybném provádění nebo v nepochopení funkce konstrukce ve stavebních nebo definitivních stavech.

Základním předpokladem spolehlivé funkce konstrukce a její bezpečnosti je uvážený komplexní návrh díla včetně rozhodujících detailů, pečlivé provedení z kvalitních materiálů a jeho odpovídající údržba.

*V článku byly částečně využity výsledky projektu podporovaných TAČR (projekt CESTI č. TE 01020168) a MPO ČR (projekt č. FV20472).*

*Fotografie:*

*1 – Milan Špička, 2 – Milan Senko (SVB), 3 – Jitka Erbenová (Wikipedia, CC BY-SA 3.0), 4 až 14, 15 – SHP, 16 – www.euronews.com, 17 – www.inverse.com, 18 – www.shutterstock.com*



**prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc., FEng.**

Je dlouholetým pracovníkem Fakulty stavební ČVUT v Praze a pracuje jako expert na betonové konstrukce ve společnosti Metrostav. Je autorizovaným inženýrem v oboru mosty a inženýrské konstrukce. Zastupuje Českou republiku v Mezinárodní federaci pro konstrukční beton (*fib*), kde zastává též funkci předsedy komise 2 (*Analysis and Design*) a současně vede pracovní skupinu „Serviceability models“. Je místopředsedou České betonářské společnosti ČSSI. Při výstavbě nových konstrukcí prosazuje využití aktuálních poznatků z oboru a zároveň přenáší zkušenosti ze stavební výroby do výuky na Fakultě stavební, kde přednáší problematiku předpjatého betonu a betonových konstrukcí a mostů. Podílel se na řadě významných projektů, např. vysouvané tunely metra pod Vltavou v Praze, most přes Opatovské údolí, Trojský most v Praze nebo zavěšená lávka z UHPC v Čelákovících, z nichž řada byla oceněna na mezinárodní úrovni.