

VLIV DIFERENČNÍHO SMRŠŤOVÁNÍ A DOTVAROVÁNÍ NA DEFORMACE LETMO BETONOVANÉHO MOSTU PŘES VLTAVU U VEPŘEKU ■ ANALYSIS OF SEGMENTALLY ERECTED BRIDGES ACROSS VLTAVA RIVER NEAR VEPREK WITH RESPECT TO DIFFERENTIAL SHRINKAGE AND CREEP

Miloš Zich, Jaroslav Navrátil

Pro většinu letmo betonovaných mostů je typické použití komorového průřezu. Komorový průřez je tvořen deskami a stěnami různých dimenzí. Rozdílné dimenze prvků příčného řezu mají za následek nestejnou vysychání průřezu, a tím i nestejnou smršťování a dotvarování jednotlivých částí. Dochází k tzv. diferenčnímu smršťování a dotvarování. Článek ukazuje porovnání výpočtů průhybů s dlouhodobým měřením mostu. ■ Most of segmentally erected bridges typically use the box cross-section. The box is usually created by slabs and webs of different dimensions. As a consequence of the differences in the element dimensions, the non-uniform drying of cross-section appears, which leads to the differential creep and shrinkage of concrete of the elements. The paper presents the comparison of calculated deflections with long-term monitoring of bridge-deflections.

Vliv diferenčního smršťování a dotvarování se při tvorbě výpočetních modelů v běžné projekční praxi dosud zanedbává. Zjednodušení výpočetních modelů tak může být jednou z příčin podhodnocení dlouhodobých průhybů konstrukce, a tím i příčinou poruch a nutných následných oprav a nákladných rekonstrukcí. V pracích [1] až [4] byl prokázán vliv diferenčního smršťování a dotvarování na chování jednoduchých nosníků s konstantním příčným řezem.

Mimo jiné bylo v těchto pracích konstatováno, že diferenční smršťování jednotlivých částí průřezu nemá vliv na konečnou hodnotu průhybů nosníků v čase sto let. Ve stáří nosníků cca do deseti let ale vliv na průhyb může být výrazný, přičemž např. pro řešené případy konzolových nosníků je největší v období cca jeden až dva tisíce dnů od vzniku nosníku. Tento jev tak může být jednou z příčin, proč při sledování deformací letmo betonovaných mostů jsou naměřené průhyby rozdílné od průhybů stanovených ve výpočetních modelech nezohledňujících tento jev.

Ze studií jednoduchých nosníků vy-

vstala otázka, jaký vliv má diferenční smršťování u reálných konstrukcí, které mají podstatně složitější geometrické tvary příčných a podélných řezů a během výstavby často mění statické schéma. Konstrukce jsou navíc budovány postupně, to znamená, že může docházet ke smršťování různých starých betonů. Účinky smršťování a dotvarování jsou též tlumeny přítomností výztuže.

Cílem tohoto článku je aplikovat závěry a doporučení vyplývající ze studií chování jednoduchých nosníků při výpočtu dálničního letmo betonovaného mostu přes řeku Vltavu u Vepřeku (obr. 1). Je třeba zdůraznit, že na této konstrukci se neprojevily nadměrné průhyby. S finanční podporou Ředitelství silnic a dálnic Praha bylo na mostě osazeno měřicí zařízení a uskutečněno velké množství měření a sledování již od samého počátku výstavby mostu. O mostě existuje ucelený soubor informací o průběhu výstavby, materiálových vlastnostech betonu, velikosti předpětí, provedených geodetických a tenzometrických měřeních apod. [5].

Dostatečně kvalitní soubor informací je předpokladem reálných vstupních údajů ve výpočtových modelech.

POPIS MOSTU

Konstrukce dálničního mostu je tvořena spojitým komorovým nosníkem o devíti polích rozpětí 33,2 + 5 x 43 + 69 + 125 + 69 m. Hlavní (125 m) a jemu přilehlá pole mostu byla postavena technologií letmé betonáže, ostatní pole byla betonována na pevné skruži. Výška komorového nosníku je v zárodku 6,9 m a ve středu pole 2,5 m. Podrobný popis konstrukce je uveden v [6].

V rámci [7] byla analýza mostu zpracována ve dvou stupních:

- Na vybraných lamelách hlavního pole mostu byla provedena **studie diferenčního smršťování a dotvarování**. Analyzována byla místa v konstrukci, která se vzájemně nejvíce odlišují svými dimenzemi, složením betonu a současně je u nich nejpatrnější vliv postupné výstavby.
- Bylo provedeno řešení **celé konstrukce mostu** s vlivem diferenčního smršťování a dotvarování.



1

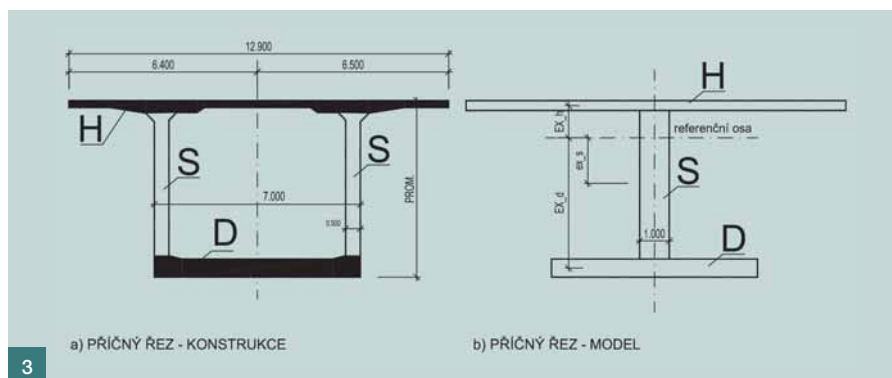
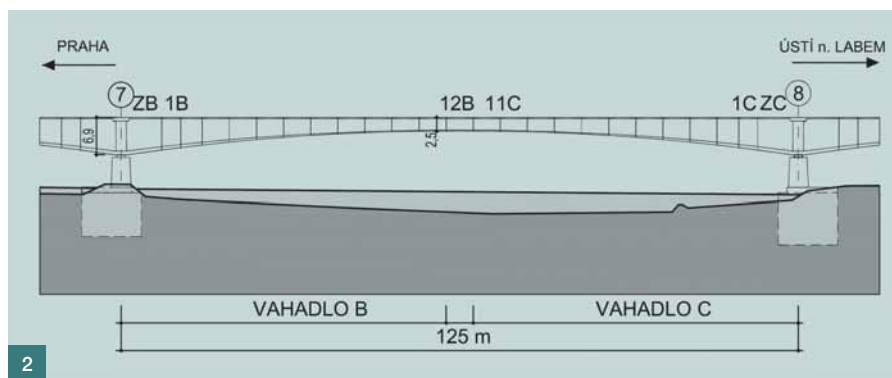
METODA POUŽITÁ PRO ANALÝZU KONSTRUKCE

Pro analýzu (tzv. časovou analýzu) konstrukce byl použit program TDA. Při analýze reologických účinků se vychází z teorie viskoelastivity. Smršťování a dotvarování každého betonového prvku se vyjadřuje v závislosti na vlastnostech příčného řezu prvku, přičemž se zohledňuje velikost prvku a relativní vlhkost okolního prostředí. Při výpočtu pružného přetvoření je respektována změna modulu pružnosti v čase způsobená stárnutím betonu. Model dotvarování je založen na předpokladu lineární závislosti mezi napětím a poměrnou deformací, což umožňuje použít princip superpozice. Numerické řešení pak vychází z náhrady integrálu pro výpočet dotvarování sumací. Výpočtový model konstrukce respektuje postupnou výstavbu a předpínání podle harmonogramu výstavby, vliv nestejně smršťování a dotvarování různých starých a různě vysychajících částí konstrukce i průřezu, vliv stárnutí betonu a další potenciální vlivy způsobující nadměrné průhyby konstrukcí.

Obr. 1 Pohled na konstrukci mostu
Fig. 1 View of the bridge

Obr. 2 Podélný řez hlavním polem mostu
Fig. 2 Longitudinal section of the main span of the bridge

Obr. 3 Příčný řez a výpočtový model D3 (H-horní deska, S-stěny, D-dolní deska)
Fig. 3 Cross-section and the structural model D3 (H-top slab, S-wall, D-bottom slab)



Studie chování lamel a zárodků hlavního pole mostu

Ve studii byl analyzován vliv diferenčního smršťování samostatných lamel 1B, 12B, 11C, 1C a zárodků B a C (obr. 2). Lamely a zárodky byly vyšetřovány na konzolových nosnících délky 5 m. Příčné řezy jednotlivých zárodků a lamel byly rozděleny na tři prvky (horní deska, dolní deska a stěny) excentricky vzdálené od těžiště průřezu (obr. 3). Pro zjednodušení je uvažován konstantní průřez bez náběhů v podélném směru.

Byly uvažovány dvě varianty příčného řezu, tj. dvě různé náhradní tloušťky průřezů:

- průřez bez izolace horní desky,
- průřez s izolací horní desky.

Výpočet je proveden pro reologický model B3 [9] s parametry podrobně popsány v následující kapitole. Náhradní tloušťka je konstantní po celou dobu životnosti nosníku. Geometrie průřezů je převzata z [5] a [6]. Není uvažováno žádné vnější zatížení nosníku. Zkrácení nosníku i svislý průhyb je umožněn od času ukončení ošetřování betonu.

Působí-li rozdílně smršťující se části příčného řezu v jednom průřezu společně, má to za následek nejen osové zkrácení nosníku, ale s ohledem na vnitřní statickou neurčitost modelu i svislý průhyb (obr. 4 a 5). Od vzniku lamel průhyby v absolutní hodnotě rostou až do okamžiku cca 2000

až 10 000 dní, kde dosahují svých extrémů, poté dojde ke zmenšování průhybů. U lamel 12B a 11C dojde u průřezu bez izolace i s izolací horní desky k průhybu konzoly ve směru dolů (dolní deska se smršťuje více než horní). Naopak tomu u ostatních lamel (1B, 1C, ZB, ZC) dojde u průřezu bez izolace k průhybu ve směru nahoru a u průřezu s izolací u všech lamel ve směru dolů. Extrémní průhyb průřezu s izolací je cca 5,6krát větší než u průřezu bez izolace.

Při vykreslování průběhů průhybů nosníku je vždy respektován skutečný čas vzniku jednotlivých lamel, je tedy patrný vliv rozdílného stáří jednotlivých lamel způsobený postupnou betonáží lamel. Je zřejmé, že k vymizení vlivu postupné betonáže dochází v časech cca 1 000 až 2 000 dnů, kdy lamely, které mají přibližně stejné průřezové charakteristiky, dosahují téměř shodných hodnot průhybů.

Výrazný vliv na průběhy deformací má dimenze dolní desky. Samotná dolní deska lamel ve středu pole mostu (12B, 11C s tloušťkou 0,18 m) se smršťuje více (v některých časech až 2krát) než dolní deska lamel u podpor (1B, 1C, ZC, ZB s tloušťkou cca 0,7 m).

Z provedené studie lze usuzovat na směr průhybu způsobený diferenčním smršťováním na konstrukci celého mostu. Doba, kdy je na konstrukci mostu izolace, je podstatně delší než doba, kdy je konstrukce bez izolace (pouze během výstavby mostu). Izolace je položena až na konstrukci, která tvoří spojitý nosník. Dolní deska ve všech sledovaných částech hlavního pole (průřez s izolací) se smršťuje více než horní deska. V ostatních lamelách hlavního pole tomu bude také tak. Znamená to, že na konstrukci celého spojitého nosníku může dojít vlivem diferenčního smršťování v hlavním poli k zvětšení celkového průhybu.

Časové období, kdy je konstrukce s průřezem bez izolace, se téměř kryje s montážním obdobím konstrukce. V tomto období jsou vahadla hlavního pole mostu nespojená a působí jako konzoly. Na sledovaných lamelách se smršťuje u podpor více horní deska, na konci konzol (střed pole) naopak dolní deska. Po délce konzoly tedy bude křivost vzniklá v důsledku rozdílného smršťování horní a dolní desky měnit svůj směr. Polohy těžiště stěn a těžiště celého průřezu se zejména pro lamely ke konci konzol výrazně odlišují, a tak na průběh průhybu bude mít nezane-

dbatelny vliv i smršťování stěn. Nelze tedy jednoznačně na základě jednoduchého úsudku stanovit alespoň směr průhybů celé konzoly od diferenčního smršťování.

Model celé konstrukce mostu

V této části článku je zkoumán vliv diferenčního smršťování na deformace celé konstrukce dálničního mostu. Jsou srovnávány vzájemně si odpovídající prutové výpočetní modely konstrukce, a to model s neděleným příčným průřezem (ozn. NE) nerespektujícím diferenční smršťování s modely s děleným příčným průřezem respektujícím tento jev. Výpočtové modely konstrukce s děleným průřezem vycházejí z výpočetního modelu konstrukce s neděleným celistvým průřezem, který byl podrobně analyzován v [5].

Byly vytvořeny dva dělené výpočtové modely: model ozn. D3 s rozdělením příčného řezu celého mostu na tři prvky (obr. 3) a model ozn. D9 s rozdělením příčného řezu hlavního pole mostu na devět prvků (obr. 6), ostatní

pole mostu byla rozdělena na tři prvky jako u modelu D3. Dělení příčného řezu je provedeno tak, aby jednotlivé prvky respektovaly geometrii příčného řezu. Model D3 respektuje průměrné reologicky rozdílné vlastnosti horní desky, stěn a dolní desky. Model D9 naproti tomu zpřesňuje výpočet hlavního pole zohledněním reologicky rozdílných vlastností horní a dolní desky v příčném směru. Horní deska byla v tomto modelu rozdělena na pět prvků (ozn. 1 až 5, obr. 6). Obdobně i dolní deska byla rozdělena na tři prvky (ozn. 7 až 9).

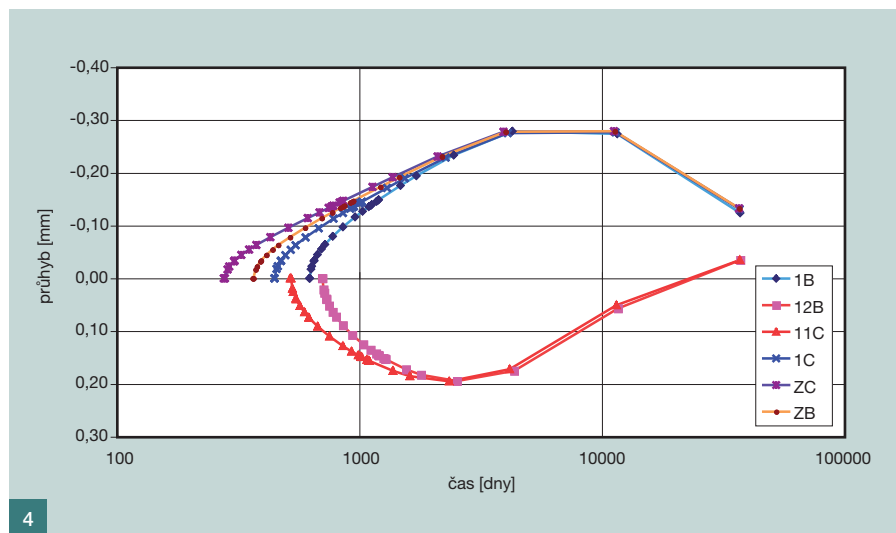
Popis výpočetních modelů

Statický model nedělený (NE) sestává celkem z 1 645 prvků, z toho 1 205 prvků modelujících předpínací kabely, 159 prvků základního betonového průřezu, 9 prvků modelujících příčníky, 9 podpěry, 4 kotevní táhla, 159 prvků betonářské výztuže a 98 „tuhých“ prutů znázorňujících postupně se přesouvající betonářský vozík.

Jednotlivé prvky jsou modelovány

prismatickým konečným prutovým prvkem. Střednice prvků v oblastech náběhů je modelována s excentricitou odpovídající změně polohy těžiště v důsledku náběhu. Smyková plocha je uvažována hodnotou rovnající se polovině plochy stěn, tím je zohledňován vliv smykových deformací na chování konstrukce. Rozdělením příčného řezu na prvky došlo u modelu D3 k nárůstu prvků modelujících betonový průřez o 318 prvků (celkem 1963), u modelu D9 poté k dalšímu nárůstu o 402 prvků (celkem 2365).

Velká pozornost byla věnována modelování postupné výstavby konstrukce. Vycházelo se přitom ze skutečného postupu výstavby. Za výchozí časový okamžik je považována betonáž pilířů mostu. Od tohoto okamžiku až do předpokládané životnosti konstrukce sto let je konstrukce zadávána celkem ve 201 časových uzlech, ve kterých došlo k technologickým změnám, případně k měření konstrukce. Pro zpřesnění výpočtu je časová analýza prováděna v celkem 405 časových uzlech.



Obr. 4 Průhyb konzol sestavených z jednotlivých lamel – průřez bez izolace ■ Fig. 4 Deflection of cantilevers constructed of individual segments – cross section out of waterproofing

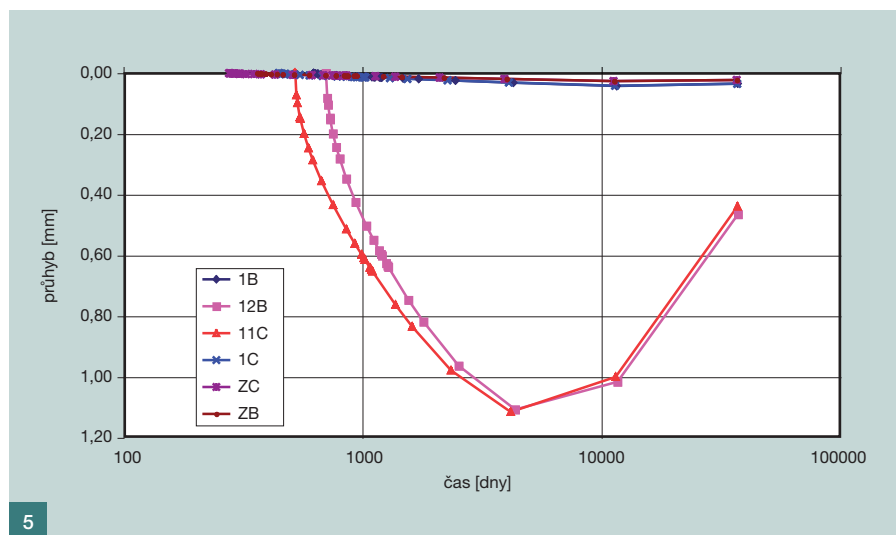
Obr. 5 Průhyb konzol sestavených z jednotlivých lamel – průřez s izolací ■ Fig. 5 Deflection of cantilevers constructed of individual segments – cross section with waterproofing

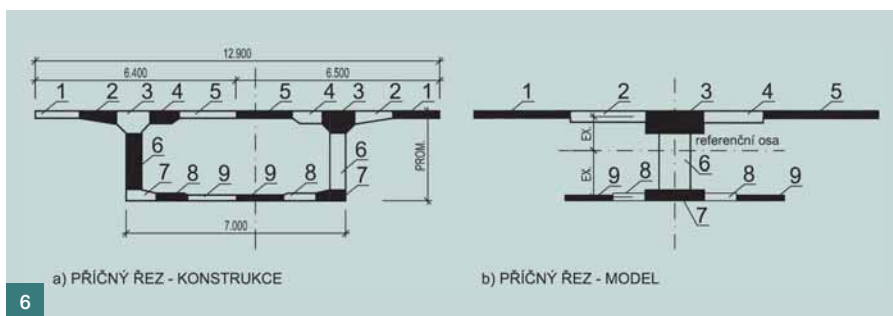
Obr. 6 Příčný řez a výpočtový model D9 ■ Fig. 6 Cross-section and the structural model D9

Obr. 7 a) Průběh náhradní tloušťky průřezu po šířce horní desky – model D9, b) průběh náhradních tloušťek v hlavním poli mostu – model D9 ■ Fig. 7 a) course of effective cross-section thickness along the width of the top slab – model D9, b) course of effective cross-section thickness along the length of main span of the bridge – model D9

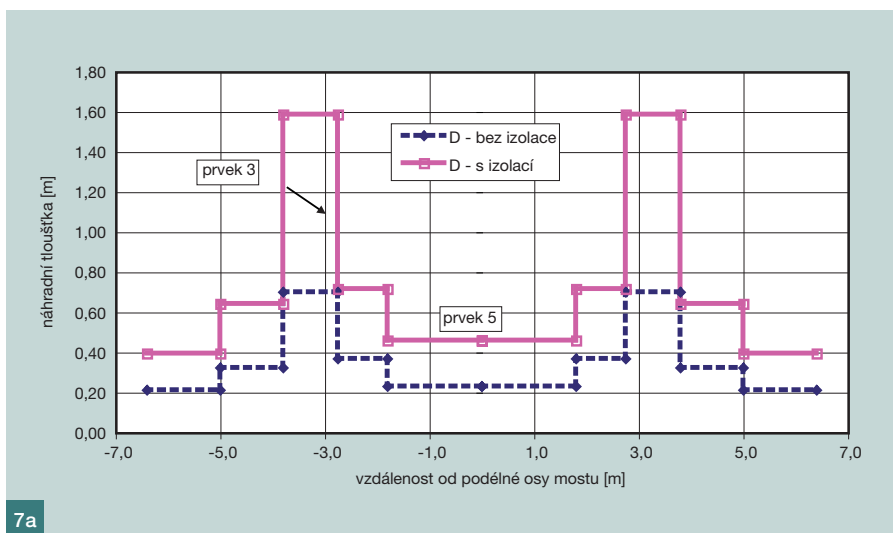
Obr. 8 Průběh náhradních tloušťek v hlavním poli mostu – model D3

■ Fig. 8 Course of effective cross-section thickness along the length of span of the bridge – model D3

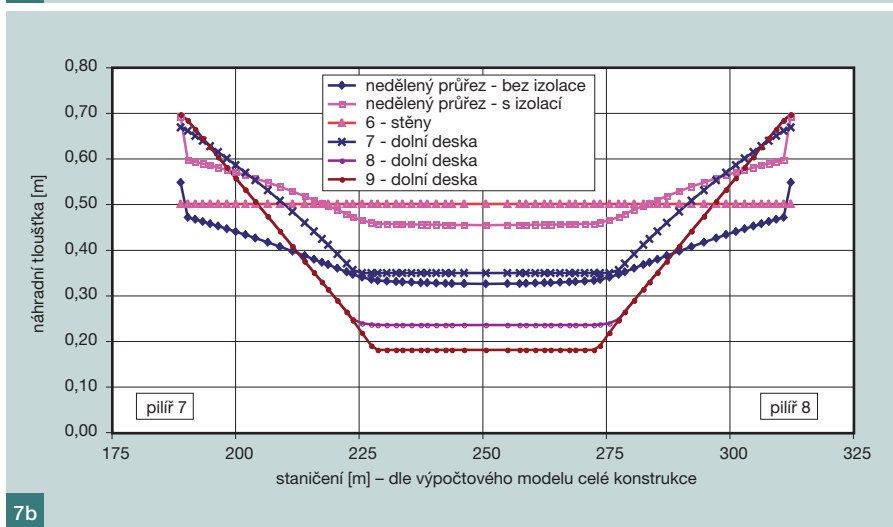




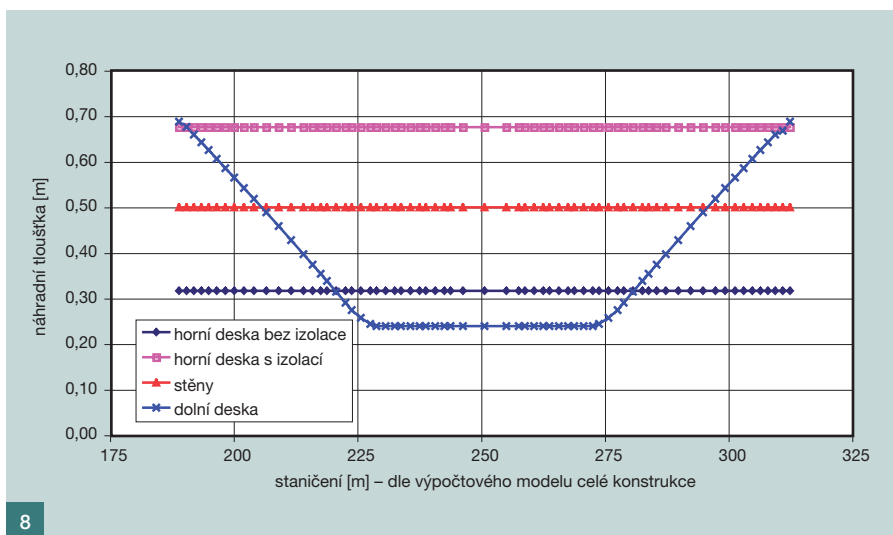
6



7a



7b



8

Reologický model

Ve výpočtu je uvažován reologický model B3 [9] upřesněný na základě skutečného složení a pevnosti betonu a na základě měření hranolů [5]. Reologický model je stejný pro dělené i nedělené modely. Složení betonové směsi je uvedeno v tab. 1.

Krychelná pevnost byla přepočtena na válcovou dle ČSN 73 1317. Modul pružnosti byl vypočten pro okamžik $\Delta = 0,01$ dne, za který jsou deformace považovány za okamžité. Cement byl uvažován rychle tuhnoucí, $\alpha_1 = 1,1$. Z hlediska součinitele tvaru průřezu jsou jednotlivé prvky příčného řezu považovány za nekonečné desky, $k_s = 1$. Na základě měření smršťování a dotvarování na zkušebních hranolech byly v [10] získány parametry upřesněného reologického modelu B3, $p_1 = 0,133830E-07$, $p_2 = 0,778397$ a $p_6 = 1,4$. Ošetřování betonu předpokládáme při 100% vlhkosti, $\alpha_2 = 1,1$.

Parametr τ_{sh} zjištěný z výsledků měření úbytků hmotnosti smršťujících se betonových laboratorních vzorků nelze přímo použít pro výpočet smršťování a dotvarování prvku reálné konstrukce odlišných rozměrů, byl proto pro výpočet smršťování a dotvarování prvku reálné konstrukce odlišných rozměrů přepočten podle metody uvedené v [10]. Vliv mikrotrhlin na zvýšené vysychání není uvažován.

Vlhkost vzduchu okolního prostředí předpokládáme ve studii konstantní ($\psi = 77\%$), při výpočtu celého mostu je vlhkost uvažována pro jednotlivé časové intervaly průměrnou hodnotou zjištěnou na základě měření vlhkosti v dutině mostu a na základě měření prováděných hydrometeorologickou stanicí Tuháň [5], která se nachází v blízkosti sledovaného mostu.

Stanovení doby ošetřování t_0 je problematické. Při kalibraci funkcí smršťování se obvykle předpokládá dokonalé ošetření betonu v laboratorních podmínkách, např. 100% vlhkost apod. Po tuto dobu se nepředpokládá žádné zatěžování betonu. V případě reálné konstrukce však i přes veškerou snahu není těchto podmínek dosaženo. Ve výpočtu se tedy předpokládá, že opatření k ošetření betonu se prováděla do doby předpínání, tj. po dobu asi tři dny.

Velký vliv na výsledky má velikost náhradní tloušťky průřezu. Náhradní (efektivní) tloušťka průřezu je veličina popisující, jak je daný průřez schopen vysychat. Zjišťuje se výpočtem a závisí

Tab. 1 Charakteristiky použitých betonů ■ Tab. 1 Characteristics of used concretes

	w – voda [kg/m ³]	c – cement [kg/m ³]	s – písek a kamenivo [kg/m ³]	E ₂₈ – modul pružnosti [GPa]	krychelná pevnost [MPa]
vahadlo AB (mimo zárodky)	185,2	410,9	1894,7	44,6	53,8
vahadlo CD a zárodky	182,8	410	1803,5	43,3	49,3
rampa	175,3	400	1913,3	45,1	54,4

na poměru plochy průřezu ku vysychajícímu obvodu. Většina funkcí dotvarování a smršťování byla však kalibrována na laboratorních vzorcích, jejichž dimenze se řádově liší od dimenzí mostní konstrukce. Další zdroje nepřesností mohou být v tom, že v dutině mostu je jiná vlhkost vzduchu (a jiné proudění) než v okolí mostu nebo po uvedení mostu do provozu v tom, že horní povrch mostovky je zaizolován. Proto je třeba na tuto veličinu pohlížet s jistou opatrností. Náhradní tloušťka průřezu je pro zjednodušení uvažována konstantní už od vzniku betonového průřezu, a to ve dvou variantách bez izolace horní desky a s izolací horní desky. Náhradní tloušťky pro model D9 jsou pro hlavní pole mostu uvedeny na obr. 7. Horní deska má (kromě části u podpor) konstantní průřez po celé délce hlavního pole. Náhradní tloušťka prvků horní desky je tedy také konstantní po délce hlavního pole

(obr. 7a). Položením izolace dojde přibližně k dvojnásobnému zvětšení náhradní tloušťky prvků horní desky. Náhradní tloušťky prvků dolní desky plynu sledují změnu geometrie od podpory ke středu nosníku, kde se geometrie dolní desky ani náhradní tloušťky jednotlivých prvků nemění (obr. 7b). Náhradní tloušťka stěn je konstantní po délce nosníku.

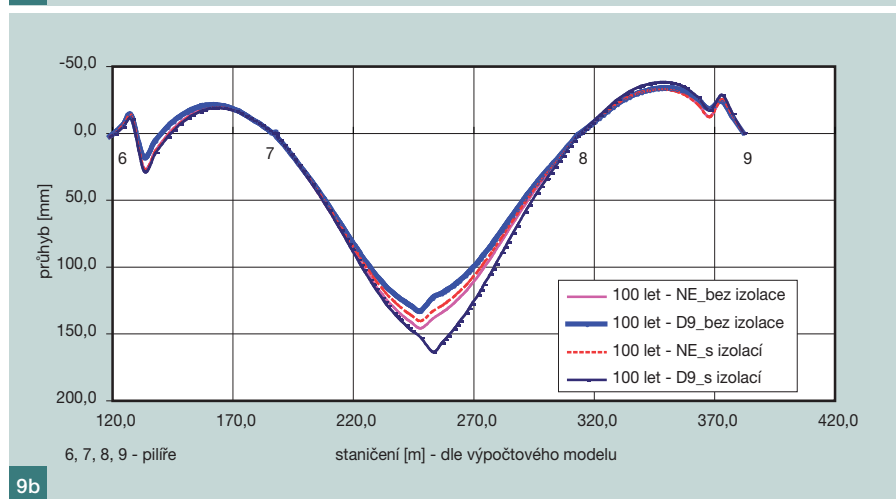
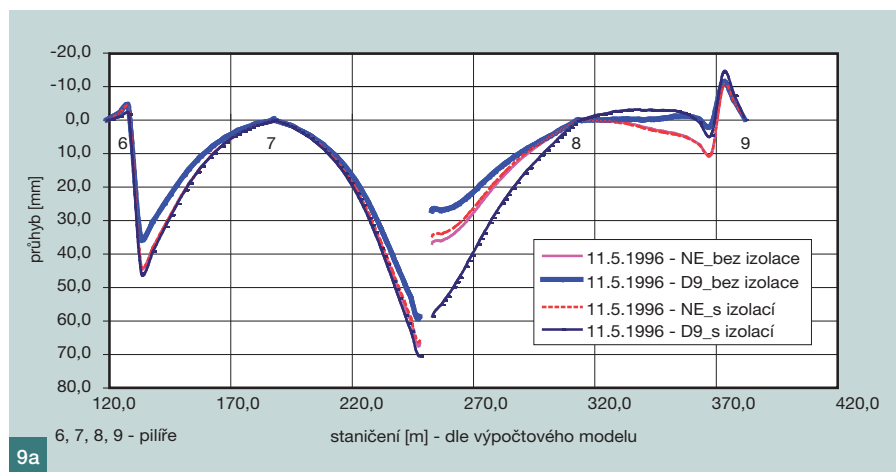
Pro model D3 je průběh náhradních tlouštěk uveden na obr. 8. Náhradní tloušťka horní i dolní desky má v modelu D3 konstantní průběh po délce nosníku. Náhradní tloušťka dolní desky se od podpory „lineárně“ mění cca do 1/3 rozpětí hlavního pole, ve středu rozpětí je náhradní tloušťka dolní desky konstantní. U průřezu s izolací horní desky je náhradní tloušťka horní desky po celém hlavním poli vždy větší než náhradní tloušťka dolní desky. U průřezu bez izolace je náhradní tloušťka horní desky v krajních čtvrtinách pole menší než ná-

hradní tloušťka dolní desky. Ve středu pole je opět náhradní tloušťka horní desky větší než dolní desky.

Výsledky a srovnání řešení

Porovnáním průběhů průhybů konce lamely 11C (přibližně střed mostu) vypočtených na obou dělených modelech D3 a D9 bylo zjištěno, že oba modely vykazují velmi dobrou shodu. Znamená to, že zpřesnění modelu rozdělením příčného řezu na více prvků nemělo významný vliv na dlouhodobé průhyby. Vypočtené deformace proto sledujeme pouze na modelu D9.

Na obr. 9 je pro řešené výpočtové modely v časovém okamžiku před spojením vahadel B a C a v čase sto let uveden průběh průhybu mostu v podélném směru. Jsou znázorněny deformace hlavního a jemu přilehlých letmo betonovaných polí s napojením na betonážní díly budované na pevné skruži. Vynesené průhyby jsou vý-



Obr. 9 a) Průhyb mostu 11. 5. 1996 (696 dní) – před spojením vahadel, b) průhyb mostu ve 100 letech ■ Fig. 9 a) Deflection of the bridge on May 11, 1996 (669 days) – before connection of cantilevers, b) deflection of the bridge at 100 years

Obr. 10 Průhyb konce konzoly vahadla C – od času betonáže lamely 11C do spojení s vahadlem B ■ Fig. 10 Deflection of the end of the cantilever C – from the time of casting of segment 11C to the connection with the cantilever B

Obr. 11 Relativní průhyb středu hlavního pole mostu (lamela 11C) ■ Fig. 11 Relative deflection at the midspan (segment 11C)

Obr. 12 Relativní průhyb středu hlavního pole způsobený diferenčním smršťováním a poměr průhybů děleného a neděleného modelu ■ Fig. 12 Relative deflection at the midspan caused by differential shrinkage and the ratio of deflections determined applying the differential and solid section model

sledkem výpočtu, při kterém byly lamely betonovány vždy ve směru tečny k průhybové čáře (tedy bez korekcí betonážním vozíkem).

Z porovnání obrázků průhybů po délce mostu vyplývá, že výsledky obou nedělených modelů jsou obdobné. Z hlediska průhybů není pro sledovaný most nutné rozlišovat nedělený průřez bez izolace a nedělený průřez s izolací horní desky.

Pokud sledujeme průhyby konců konzol vahadel před jejich spojením (ať už spojením vzájemným nebo spojením s betonážními díly rampy), dochází

vždy na děleném výpočtovém modelu bez izolace horní desky k zmenšení celkových deformací oproti nedělenému modelu. Na modelu s izolací horní desky je tomu naopak, průhyby konzoly na děleném modelu jsou větší než na neděleném.

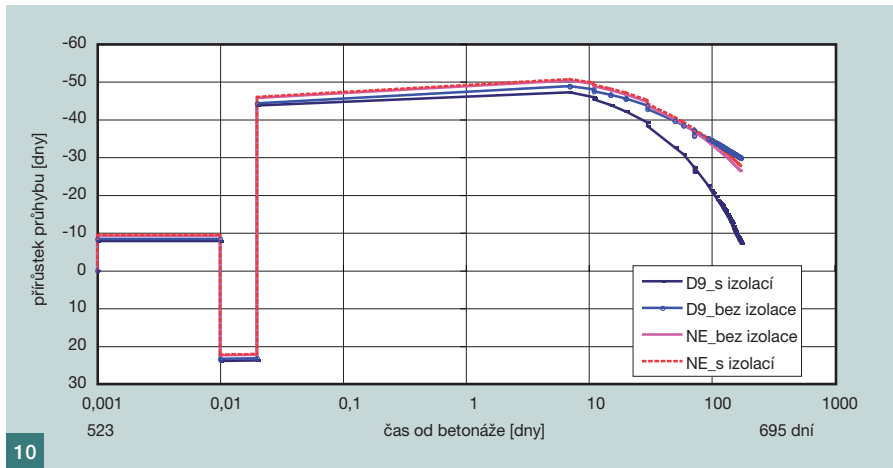
Sledujeme-li průhyb středu hlavního pole po spojení konzoly (spojitý nosník), dosahuje i nadále celkový průhyb na děleném modelu bez izolace horní desky menších hodnot než na neděleném modelu. A naopak dělený model s izolací horní desky větších hodnot než model nedělený.

Při analýze výsledků a jejich porovnání s výsledky měření je nutno uvážit dobu, po kterou byl most bez izolace. Izolace byla na mostě dokončena cca 24. srpna 1996 (tj. v čase 801 dní). Uváděné průběhy deformací do tohoto období pro průřez s izolací jsou tedy pouze orientační a v podstatě ukazují, jakou chybu by projektant udělal, pokud by uvažoval zjednodušeně dělený průřez s izolací hned od samotného vzniku betonu. K takové úvaze by ho opravňovala podstatně delší doba, po kterou je na konstrukci položena izolace oproti době, po kterou je most bez izolace.

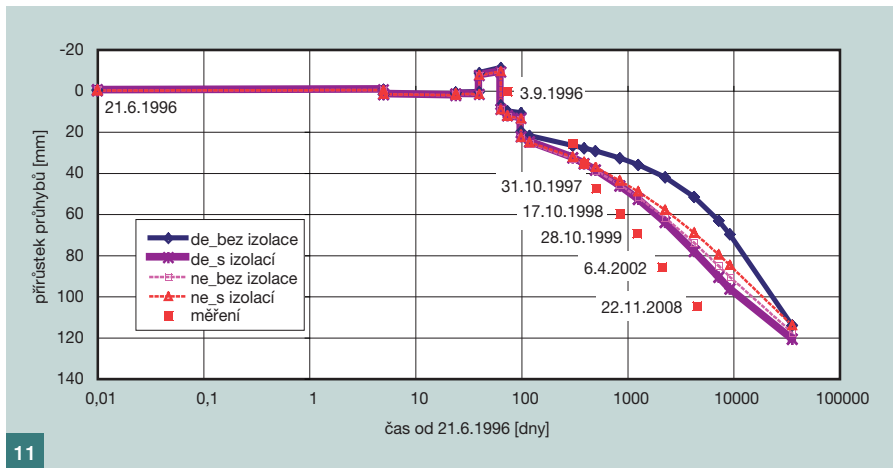
Na obr. 10 je uveden průběh přírůstku průhybu konce konzoly staršího vahadla „CD“ od času betonáže poslední lamely 11C. Jedná se o vahadlo, které bylo dokončeno na podzim roku 1995, a je tedy cca o šest měsíců starší než vahadlo AB. Přírůstky průhybů po betonáži lamely jsou pro dělený model bez izolace v podstatě stejné jako pro nedělený model s izolací horní desky.

Na obr. 11 je znázorněn průběh přírůstku průhybu konce lamely 11C v čase. Vypočtené deformace jsou konfrontovány s naměřenými hodnotami opravenými o vliv teploty a o hodnoty deformací pilířů v okamžiku měření. Na obr. 12 je znázorněn přírůstek průhybu konce lamely 11C způsobený pouze diferenčním smršťováním a dotvarováním nosníku vypočtený jako rozdíl průhybu mezi děleným a neděleným průřezem. Do tohoto obrázku je doplněn i poměr relativních průhybů zjištěných na děleném a neděleném modelu. Průhyby jsou v obr. 11 a 12 vztaženy ke stavu z 21. června 1996, kdy proběhlo první geodetické zaměření po dokončení hlavní nosné konstrukce (tj. po spojení vahadel). Počátek časové osy je vztažen do období, kdy konstrukce mostu již vykazuje jasné statické schéma (spojitý nosník) a je dokončeno téměř celé podélné předpětí konstrukce. Počátek téměř odpovídá položení izolace na horní desku, odlišuje se cca o dva měsíce. Za tuto dobu jsou ovšem deformace od diferenčního smršťování a dotvarování na modelu bez izolace malé. Uvedenému období tak lépe odpovídají přírůstky průhybů stanovené na výpočetních modelech s izolací horní desky.

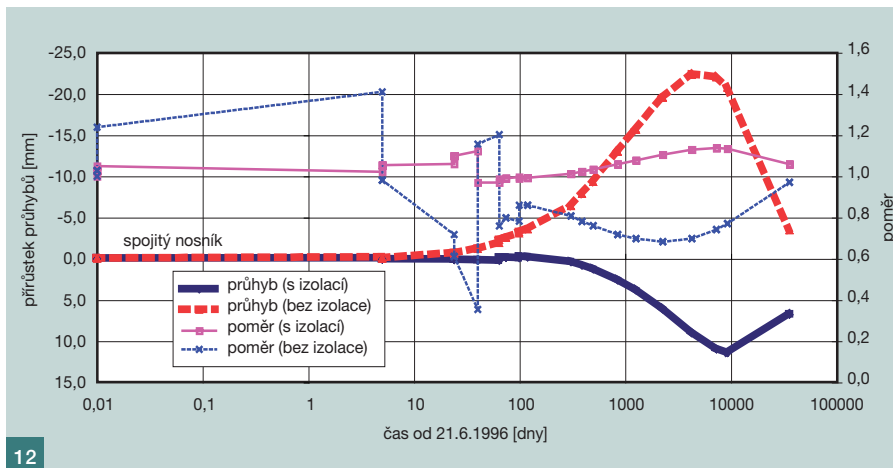
Diferenční smršťování a dotvarování způsobuje průhyb nosníku, který se s časem zvětšuje a svého maxima dosahuje v časech okolo 10⁴ dní, dále se průhyb od diferenčního smršťování



10



11



12

Literatura:

- [1] Navrátil J., Zich M., Křístek V.: Vliv diferenčního smršťování na deformaci komorových nosníků, sb. konf. Betonářské dny, Pardubice 1999
- [2] Voplakal M., Zich M., Kohoutková A., Křístek V.: Vliv diferenčního smršťování na průhyb letmo betonovaných komorových mostů, sb. konf. Betonářské dny, Pardubice 2000
- [3] Zich M., Navrátil J.: Studie vlivu diferenčního smršťování a dotvarování komorových nosníků s proměnnou tloušťkou spodní desky, Zpráva grantu 103/00/0604 „Zpřesnění metod analýzy účinků dotvarování a smršťování v betonových konstrukcích“, Brno 2000
- [4] Křístek V., Bažant Z. P., Zich M., Kohoutková A.: Box Girder Bridge Deflections – Why is the initial trend deceptive?, Concrete international/ January 2006, pp. 1–9
- [5] Navrátil J., Zich M.: Sledování dálničního mostu přes Vltavu D8-0802 c/SO 209 Zpráva k etapám V1 až V5, Ústav betonových a zděných konstrukcí VUT FAST, Brno, 1997–1999
- [6] Cieslar P., Landa T., Žurých R.: Most přes Vltavu u Vepřeku, čas. Beton a zdivo, 4/1995, str. 5–9
- [7] Zich M.: Analýza letmo betonovaných mostů s ohledem na diferenční smršťování a ochabnutí smykem“, disertační práce, Brno 2001
- [8] Navrátil J.: Časově závislá analýza rámových konstrukcí, Stavebnický časopis, 7 (40), s. 429–451, Slovak Academic Press, Bratislava, 1992
- [9] Bažant Z. P., Baweja S.: Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage, 2. Updating and Theoretical Basis, Mater. Struct. 28, 1995, 488–495
- [10] Navrátil J.: Upřesnění predikce dotvarování a smršťování betonu, Stavební obzor, 2/1998, str. 44–50

snižuje a v čase 100 let se blíží nulové hodnotě (obr. 12).

Na děleném modelu s izolací došlo k zvýšení průhybu cca o 11,5 mm. Pokud bychom uvažovali průřez bez izolace, došlo by ke zmenšení námi vypočtených průhybu o cca 22,3 mm, což může dokumentovat chybu, jaké by se projektant dopustil, pokud by uvažoval dělený průřez bez izolace po celou dobu životnosti konstrukce. Mohlo by tak dojít k podcenění počítaných průhybů. Rozdíl průhybů určených mezi děleným a neděleným modelem může nabývat značných hodnot, zejména u průřezu bez izolace, kde je průhyb na děleném modelu v čase pět dnů až 1,4krát větší než na neděleném a naopak v čase čtyřiceti dnů pouze 0,35 z hodnoty průhybu na neděleném modelu. Tyto extrémní hodnoty jsou ale dosahovány v časech, kdy celkové hodnoty průhybů jsou malé.

V časovém období od sta dní do sto let je minimální poměr mezi průhy-

bem na děleném a neděleném modelu u průřezu bez izolace (cca 0,7), maximální poměr je u průřezu s izolací (1,14). Extrémních poměrů je dosaženo v časech 10^3 až 10^4 dní, přičemž pro průřez bez izolace nastává extrém dříve (cca 3 000 dní). V čase sta let se poměry mezi děleným a neděleným modelem blíží u obou průřezů jedné.

Naměřené hodnoty průhybů vykazují poměrně dobrou shodu s průhyby vypočtenými (obr. 11) na děleném modelu (průřez s izolací), i když v časovém období do jednoho roku po uvedení mostu do provozu došlo k zvětšení skutečných průhybů více než u vypočtených průhybů. V dalším časovém období je již gradient průhybů u modelu děleného bez izolace téměř stejný jako u hodnot naměřených. Uvedený rychlejší nárůst průhybů v prvním roce by mohl být způsoben právě položením izolace na horní desku, čímž se změnila náhradní tloušťka průřezu. Zohlednění změny náhradní tloušťky není v současné době v programu TDA možné, změna proto není ve výpočtových modelech zohledněna.

ZÁVĚR

Byl prokázán vliv diferenčního smršťování a dotvarování na chování reálné konstrukce letmo betonovaného mostu, který má složitý geometrický tvar příčného a podélného řezu a během výstavby měnil statické schéma. Konstrukce byla budována postupně, takže dochází ke smršťování různě starých betonů. Z výsledků lze stanovit následující závěry:

- Diferenční smršťování nemá vliv na konečnou hodnotu průhybů, má ale vliv na jejich časový průběh. Bylo prokázáno, že uvažováním modelů s diferenčním smršťováním a dotvarováním došlo k lepší shodě mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami průhybů.
- Velký vliv na výsledky má uvažování typu průřezu (s izolací horní desky nebo průřez bez izolace). Výsledky pro oba průřezy jsou často velice rozdílné a při nesprávném použití mohou vést k podcenění hodnot průhybů. U dělených modelů je nutné respektovat změnu náhradní tloušťky průřezu v důsledku položení izolace na horní povrch mostu. Bohužel zatím není k dispozici program, který by tuto změnu průřezu zohledňoval. Je tedy nutné mít dva výpočetní modely s různou náhradní tloušťkou průřezu.
- Při analýze staticky neurčitě spojitě konstrukce o více polích s vlivem dife-

renčního smršťování je nutné provést dělený model všech polí konstrukce. Například dělíme-li příčný řez mostu u Vepřeku pouze v hlavním poli mostu a nerozdělíme-li příčný řez sousedních polí, dostáváme správné výsledky pouze v montážním stádiu vaha del (konzoly). V okamžiku, kdy dojde ke vzniku spojitěho nosníku, jsou výsledky nesprávné, neb v polích sousedních k hlavnímu není vyvozeno žádné zatížení křivostí.

- Při sledování průhybů konstrukce zcela postačuje dělený výpočtový model tvořený třemi prvky (horní deskou, stěnou a dolní deskou).
- Při analýze konstrukce je třeba dále pamatovat i na vznik doplňkových napeťí od diferenčního smršťování a dotvarování, jež mohou nabývat nezanedbatelných hodnot a budou předmětem dalšího výzkumu.

Zanedbání vlivu diferenčního smršťování a dotvarování betonu může být jednou z mnoha příčin chybné predikce vývoje průhybů. Správným zohledněním diferenčního smršťování ve výpočetních modelech lze za relativně nízké finanční náročnosti zohlednit tento jev již v projektu stavby. Z toho důvodu lze použití výpočetních modelů zohledňujících diferenční smršťování a dotvarování doporučit pro standardní postup návrhu letmo betonovaných konstrukcí velkých rozpětí.

Práce vznikla za podpory Ředitelství silnic a dálnic Praha. Prezentované výsledky byly získány též za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím MPO ČR v rámci projektu FI-IM5/128 „Progresivní konstrukce z vysokohodnotného betonu“ a za finančního příspěví MŠMT ČR, projekt 1M0579, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Ing. Miloš Zich, Ph.D.
tel.: 541 147 860
e-mail: zich.m@fce.vutbr.cz



Doc. Ing. Jaroslav Navrátil, CSc.
tel.: 541 147 849
e-mail: navratil.j@fce.vutbr.cz
IDEA RS, s. r. o.
U vodárny 2a, 616 00 Brno
tel.: 511 205 263
e-mail: navratil@idea-rs.com

oba: Ústav betonových
a zděných konstrukcí
Fakulta stavební VUT v Brně
Veveří 95, 602 00 Brno

Text článku byl posouzen odborným lektorem.