

# PRÁVDĚPODOBNOSTNÍ POSTUPY HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI EXISTUJÍCÍCH KONSTRUKCÍ PODLE ISO 13822

## PROBABILISTIC PROCEDURES FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF EXISTING STRUCTURES ACCORDING TO ISO 13822

JANA MARKOVÁ

Zavedení normy ISO 13822 do systému národních norem ČSN umožní hodnotit existující konstrukce jak tradičními metodami, tak také pravděpodobnostními postupy. Právě dokončovaná národní příloha bude uvádět informace z ČSN 73 0038 včetně stavebních výrobků a materiálů uplatňovaných v posledních dvaceti letech. Očekává se, že norma ISO 13822 usnadní ověřování existujících konstrukcí a navrhování jejich obnov. V textu je uveden příklad ověřování spolehlivosti balkonů panelových domů podle ISO 13822.

*Implementation of ISO 13822 into the national system of standards ČSN enables assessment of existing structures using traditional approach as well as advanced probabilistic methods. Developed National annex will include information on ČSN 73 0038, considering also building materials and products used in the last twenty years. It is expected that the standard ISO 13822 will facilitate effective redesign of existing structures. An example of verification of balconies of panel buildings according to ISO 13822 is presented.*

V současné době mohou být konstrukce na našem území navrhovány podle soustav ČSN nebo předběžných ENV Eurokódů. Transformace Eurokódů je téměř dokončena a očekává se, že se během několika příštích let budou v ČR používat pro navrhování konstrukcí předpisy EN. Současná generace Eurokódů však plně nepokrývá oblast hodnocení existujících konstrukcí. Pro ověřování těchto konstrukcí se používá norma ČSN 73 0038 [1]. I když je tato norma důležitým dokumentem pro hodnocení existujících konstrukcí, chybí zde potřebná návaznost na Eurokódy a mezinárodní normy ISO pro zásady navrhování konstrukcí, tedy zejména na Eurokód EN 1990 [2] a ISO 2394 [3]. Očekává se, že chybějící návaznost zajistí norma ISO 13822 [4] Hodnocení existujících konstrukcí, k níž je nyní dokončována národní příloha (NP). V NP budou uve-

deny vybrané informace z normy ČSN 73 0038 [1], jejíž platnost bude po zavedení normy ISO 13822 ukončena.

Norma ISO 13822 poskytuje obecné požadavky a postupy hodnocení existujících konstrukcí, které vycházejí ze zásad spolehlivosti konstrukcí a z následků jejich poruch. Podkladem pro zpracování normy byly pracovní materiály a dokumenty mezinárodní vědeckovýzkumné organizace JCSS a norma ISO 2394, která již byla zavedena v ČR jako ČSN ISO 2394, zatím pouze v anglickém jazyce.

Při ověřování spolehlivosti existujících konstrukcí lze podle ISO 13822 použít metodu dílčích součinitelů, alternativně je umožněno aplikovat také pravděpodobnostní přístup. Jsou zde doporučeny obecné postupy, jak stanovit zatížení a materiálové vlastnosti. ISO 13822 vysvětluje, proč současné normy pro navrhování nelze přímo používat pro hodnocení spolehlivosti existujících konstrukcí, pro navrhování jejich oprav nebo přestaveb. Normy pro navrhování nových konstrukcí totiž neuvádějí postupy pro hodnocení současného stavu existujících konstrukcí a odolností materiálů, nezabývají se nejistotami, které např. plynou z reálného způsobu používání stavby a z historie působících zatížení. Některé existující konstrukce mohou být dostatečně spolehlivé, i když nemusí vyhovovat současným, často zprísněným požadavkům pro navrhování. V úvahu je třeba brát zbytkovou životnost konstrukce a účel použití. Otázkou je, zda ukazatele spolehlivosti existujících konstrukcí mají mít stejnou hodnotu, které jsou doporučené v mezinárodních předpisech pro navrhování nových konstrukcí.

Příkladem jsou náročnější požadavky

Eurokódů z hlediska zatížení. V porovnání s ČSN jsou v Eurokódech doporučovány vyšší hodnoty dílčích součinitelů stálých i proměnných zatížení a charakteristické hodnoty některých druhů proměnných zatížení (např. užitná zatížení pro kancelářské prostory, klimatická zatížení). Přitom některé z existujících konstrukcí jsou bez nutnosti větší opravy provozuschopné po řadu desetiletí, i když byly původně navrženy na nižší návrhové hodnoty zatížení nebo kratší návrhovou životnost. Po provedení pravděpodobnostní analýzy jejich spolehlivosti a vypočítání ukazatelů spolehlivosti (pravděpodobnost poruchy  $p_f$ , index spolehlivosti  $\beta$ ) by zřejmě tyto konstrukce nesplňovaly kritéria spolehlivosti podle doporučení Eurokódů nebo ISO norem.

Při hodnocení existujících konstrukcí a navrhování konstrukčních opatření jsou podle dokumentu ISO 13822 funkční požadavky na bezpečnost a použitelnost v zásadě shodné jako při navrhování nových konstrukcí. Přesto jsou mezi nimi některé zásadní rozdíly, které ovlivňují diferenciaci spolehlivosti těchto konstrukcí, jak naznačuje tabulka 1. V důsledku toho je u většiny existujících konstrukcí určených pro běžné účely uplatňován princip „minimálních stavebních zásahů“, podle kterého se při návrhu konstrukčních opatření používají původní materiály. Musí být samozřejmě posouzeny jejich současné vlastnosti.

Základní metodou pro ověřování spo-

Tab. 1 Rozdílná hlediska při posuzování funkčních požadavků na spolehlivost konstrukcí

Tab. 1 Different viewpoints in the evaluation of functional criteria on the structural reliability

Hledisko	Existující konstrukce	Nové konstrukce
Ekonomické	přírůstek nákladů na zvýšení spolehlivosti je zpravidla vysoký	přírůstek nákladů vedoucí ke zvýšení spolehlivosti je zpravidla menší
Sociální	může být významné z důvodu omezení nebo vyloučení provozu a z hlediska zachování kulturního dědictví	zpravidla méně významné než u existujících konstrukcí
Udržitelnosti	do značné míry se využijí stavební materiály, sníží se odpady	zpravidla se použijí nové materiály

Následky poruchy	Směrný index spolehlivosti $\beta_t$	Referenční doba
Velmi malé	2,3	$L_5$
Malé	3,1	$L_5$
Střední	3,8	$L_5$
Vysoké	4,3	$L_5$

Tab. 2 Doporučené hodnoty indexu spolehlivosti  $\beta_t$  podle ISO 13822

Tab. 2 Recommended values of the reliability index  $\beta_t$  according to ISO 13822

lehlivosti existujících konstrukcí je podle ISO 13822 metoda dílčích součinitelů. Kromě této metody lze podle [4] při hodnocení spolehlivosti existujících konstrukcí použít pravděpodobnostní přístup. Spolehlivost existujících konstrukcí, stejně tak jako u konstrukcí nových, může být vyjádřena prostřednictvím ukazatelů spolehlivosti, tedy pravděpodobnosti poruchy  $P_f$  nebo indexu spolehlivosti  $\beta$ . Vztah mezi oběma ukazateli spolehlivosti lze formálně zapsat

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f), \quad (1)$$

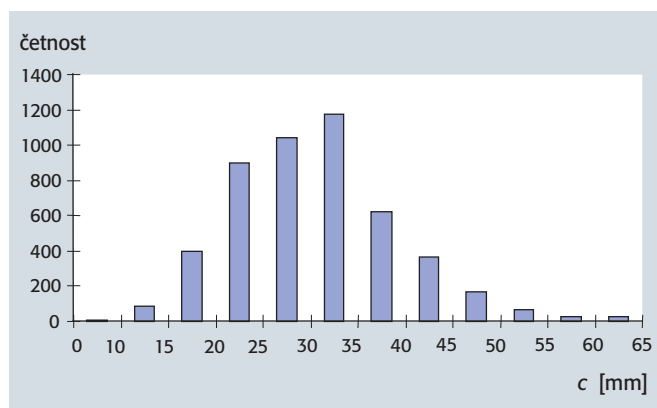
kde  $\Phi(\cdot)$  je normovaná normální distribuční funkce. Konstrukce je spolehlivá, pokud platí

$$P_f \leq P_{ft} \text{ případně } \beta \geq \beta_t, \quad (2)$$

kde  $P_{ft}$  a  $\beta_t$  jsou doporučené hodnoty

Obr. 1 Hustota pravděpodobnosti krycí vrstvy výztuže  $c$  pro 230 balkonů (4890 měření, průměr krytí  $\mu = 26$  mm, směrodatná odchylka  $\sigma = 0,009$  m, šikmost  $\alpha = 0,58$ )

Fig. 1 Probability density of concrete cover  $c$  for 230 balconies (4890 measurements, mean of the cover is  $\mu = 26$  mm, standard deviation  $\sigma = 0,009$  m, skewness  $\alpha = 0,58$ )



ty ukazatelů spolehlivosti uvedené v ISO 13822.

Směrnou úroveň spolehlivosti, která je použita při ověřování existujících konstrukcí, lze stanovit na základě kalibrací vzhledem k současně platným normám pro navrhování, např. s uvážením koncepce minima celkových očekávaných nákladů nebo porovnáním se sociálními riziky. Důležitý je také druh konstrukce, možné následky poruchy a sociálně-ekonomická kritéria. V tab. 2 jsou uvedeny doporučené hodnoty indexu spolehlivosti  $\beta_t$  pro posuzování mezních stavů únosnosti, referenční doba  $L_5$  zde představuje minimální běžnou dobu z hlediska bezpečnosti (např. 50 let).

#### PŘÍKLAD APLIKACE ALTERNATIVNÍCH POSTUPŮ HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI KONSTRUKCE PODLE ISO 13822

Postup hodnocení spolehlivosti existující konstrukce je ukázán na příkladu porušených balkonových nosníků panelových domů v severní části ČR. Požadavek na hodnocení balkonů zde byl vyvolán nejistotami o jejich spolehlivosti (dva balkony se zřítily, několik dalších bylo zjevně porušených) a změnou vlastníka objektů.

Pracovníci Kloknerova ústavu ČVUT se zúčastnili prohlídek dvě stě třiceti balkonů stáří přibližně čtyřicet pět let [6] (konstrukční systém T0-6B-BTS). Vizualní prohlídka ukázala, že výztuž železobetonových nosníků byla na mnohých místech silně zkorodovaná vlivem porušené izolace. Karbonatace betonů se projevovala zejména v čelních partiích balkonů (obr. 5). Na základě průzkumu bylo zjištěno, že nosníky byly vyrobeny z betonu třídy C16/20, z výztuže S 200 s průměrem 8 mm. Vyložení nosníků bylo 0,9 m a jejich šířka 3,5 m. Z výsledků průzkumu vyplynulo, že skutečná poloha výztuže se podstatně

odlišovala od projektových předpokladů (navrženo krytí 10 mm, vzdálenost výztuže 150 mm). Zjištěná vzdálenost výztuže se pohybovala od 50 do 200 mm, celkový počet výztužných prutů od 20 do 26 pro jednotlivé balkony.

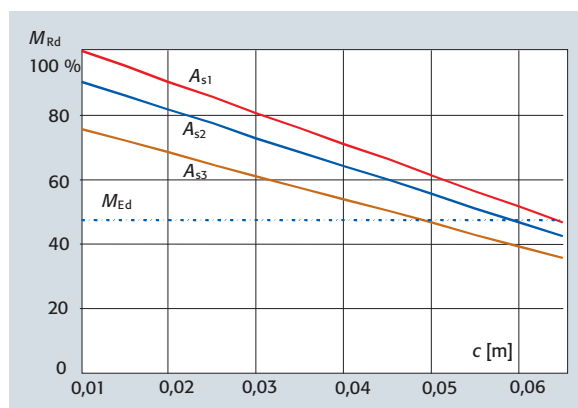
Terenní měření krycí vrstvy byla statisticky vyhodnocena jak na jednotlivých balkonech, tak i pro celkový počet balkonů. Pravděpodobnostní rozdělení krycí vrstvy výztuže  $c$  pro celkem  $n = 4890$  měření ukazuje obr. 1. Tloušťka krycí vrstvy výztuže byla zjištěna od 2 do 62 mm. Jakost provedení prefabrikovaných nosníků byla velmi nízká.

#### Ověření balkonových nosníků dle ČSN

Z hodnocení nosníků metodou dílčích součinitelů podle ČSN 73 1201 [5] vyplývá, že návrhová odolnost nosníku  $M_{Rd} = 6$  kNm je větší, než jsou návrhové účinky zatížení  $M_{Ed} = 3,15$  kNm na 1bm nosníku. Pokud je však uvažována redukce plochy výztuže vlivem koroze a její skutečná poloha, pak již podmínka  $M_{Rd} > M_{Ed}$  nemusí být splněna. Na obrázku 2 jsou uvedeny výsledky analýzy pro tři plochy výztuže  $A_s$  (pro návrhovou plochu  $A_{s1} = 100\%$ , pro redukovanou plochu  $A_{s2} = 90\%$  a  $A_{s3} = 75\%$ ) postupem v souladu s ČSN. Na obrázku je také zachycena návrhová hodnota účinků zatížení  $M_{Ed}$ .

Obr. 2 Snižující se odolnost  $M_{Rd}$  balkonového nosníku [%] se zvyšující se krycí vrstvou výztuže  $c$  pro navrženou plochu výztuže  $A_{s1} = 100\%$  a pro redukované plochy výztuže  $A_{s2} = 90\%$  a  $A_{s3} = 75\%$

Fig. 2 The decreasing resistance  $M_{Rd}$  of the balcony beam versus the increasing cover of reinforcement  $c$  for designed area of reinforcement  $A_{s1} = 100\%$ , for reduced areas of reinforcement  $A_{s2} = 90\%$  and  $A_{s3} = 75\%$



### Pravděpodobnostní analýza spolehlivosti

Pro analýzu spolehlivosti balkónového nosníku byl použit pravděpodobnostní přístup podle ISO 13822 [4]. Byla uvažována se následující funkce mezního stavu

$$g(\Theta_E, \Theta_R, R) = \Theta_R R - \Theta_E E, \quad (3)$$

kde  $E$  a  $R$  jsou vektory základních veličin pro účinky zatížení a odolnost balkonů,  $\Theta_R$  jsou modelové nejistoty pro účinky odolnosti a  $\Theta_E$  modelové nejistoty pro účinky zatížení. Pro balkonový nosník lze zapsat na základě vztahu (3)

$$g = \Theta_R n (\pi\phi^2/4) \cdot f_y [h - c - \phi/2 - 0,5 n(\pi\phi^2/4) f_y/f_c] - \Theta_E (g + p) L^2/2, \quad (4)$$

kde základní veličiny uvádí tabulka 3, včetně příslušného pravděpodobnostního rozdělení. Pravděpodobnostní modely základních veličin byly stanoveny na základě pokynů příručky Probabilistic Model Code [7] mezinárodní organizace JCSS a výsledků vyhodnocených zkoušek. Základní veličiny vstupující do funkce mezního stavu (4) jsou tedy popsány svými statistickými charakteristikami, průměrem a směrodatnou odchylkou, vhodným typem pravděpodobnostního rozdělení. Pro výpočet úrovně spolehlivosti betonových nosníků je možné použít různé softwarové produkty, zde byl použit STRUREL [8].

V tab. 3 je uvažován minimální počet výtuzných vložek  $n = 20$  určených na základě experimentálních měření, krycí

Základní veličina	Rozdělení	Průměr $\mu$	Směr. odchylka $\sigma$
Pevnost betonu v tlaku $f_c$ [MPa]	LN	24	4
Mez kluzu $f_y$ [MPa]	LN	240	15
Délka nosníku $L$ [m]	DET	0,90	–
Průměr výtuzy $\phi$ [m]	DET	0,008	–
Počet prutů na 1 bm $n$	DET	20	–
Tloušťka balkónu ve vetknutí $h$ [m]	LN	0,12	0,01
Krycí $c$ [m]	BET	0,026	0,009
Nejistota odolnosti $\Theta_R$	LN	1,1	0,05 $\mu$
Nejistota účinku zatížení $\Theta_E$	LN	1	0,05
Obj. tíha betonu $\rho$ [MN/m <sup>3</sup> ]	N	nom	0,06
Užitné zatížení $p$ [MN/m <sup>2</sup> ]	GAM	0,0008	0,00048

vrstva je stanovená z měření na všech balkónech (obr. 1).

Výsledky pravděpodobnostní analýzy spolehlivosti nosníků pro pravděpodobnostní modely z tab. 3 ukazují, že index spolehlivosti  $\beta$  je větší (3,95) než hodnota 3,8 doporučená Eurokódy. Vliv redukce plochy výtuzy  $\Delta A_s$  na index spolehlivosti  $\beta$  pro čtyři případy krycí vrstvy  $c$  (podle vyhodnocených měření na jednotlivých balkónech) je patrný z obr. 3.

Významnou základní veličinou ovlivňující ukazatele spolehlivosti balkonových nosníků je krycí vrstva výtuzy. Pokud není uvažován úbytek plochy výtuzy  $\Delta A_s$ , pak se podle obr. 3 index spolehlivosti  $\beta$  snižuje od 5,2 do 3,7 pro zvyšující se krycí vrstvu  $c$  od 10 do 30 mm.

Původní návrh balkonových nosníků byl vypracován v souladu s požadavky v té době platných ČSN. Nekvalitní vyrobe-

Tab. 3 Pravděpodobnostní modely základních veličin

Tab. 3 Probabilistic models of basic variables

ni prefabrikovaných balkonových nosníků i dokončovací prováděcí práce vedly ke značné redukci plochy výtuzy proti původním návrhovým předpokladům. Významnou základní veličinou ovlivňující ukazatele spolehlivosti balkonů je plocha výtuzy a její krycí vrstva. Indexy spolehlivosti  $\beta$  výrazně klesají se snižující se plochou výtuzy vlivem koroze (index spolehlivosti  $\beta$  se snížil asi na poloviční hodnotu při 50% úbytku plochy výtuzy).

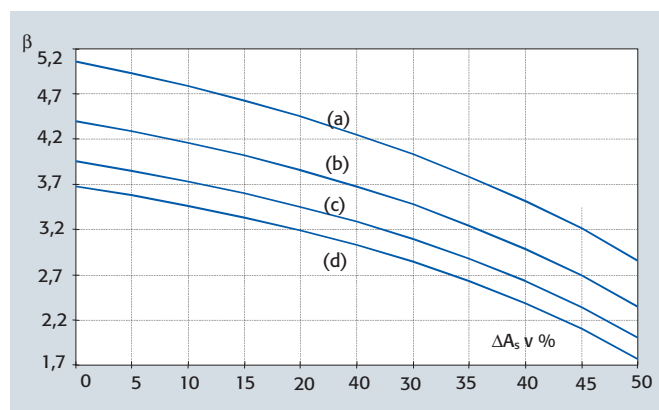
### Vliv dílčích součinitelů při hodnocení spolehlivosti

Původní návrh balkonových nosníků byl ovlivněn hodnotami dílčích součinitelů a konstrukčními zásadami podle tehdy platných ČSN (díliční součinitele pro stálá a proměnná zatížení  $\gamma_G = 1,1$ ,  $\gamma_Q = 1,3$ , krycí výtuzy  $c = 10$  mm).

Eurokódy doporučují ve většině případů větší hodnoty dílčích součinitelů zatížení ( $\gamma_G = 1,35$ ,  $\gamma_Q = 1,5$ ) než ČSN. Obr. 4

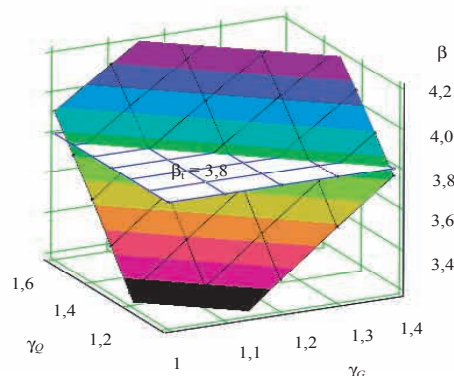
Obr. 3 Vliv redukce plochy výtuzy  $\Delta A_s$  [%] na index spolehlivosti  $\beta$  pro čtyři případy krycí vrstvy  $c$ : a) průměr  $\mu = 1$  mm, b) 20 mm, c) 26 mm, d) 30 mm (variační koeficient  $v = 0,35$ , dolní mez  $a = 0$ , horní mez  $b = 3\mu$ , Beta rozdělení)

Fig. 3 The impact of the reduction of the reinforcement area  $\Delta A_s$  [%] on the reliability index  $\beta$  for the four cases of concrete cover  $c$ : a) mean  $\mu = 10$  mm, b) 20 mm, c) 26 mm, d) 30 mm (coefficient of variation  $v = 0,35$ , lower bound  $a = 0$ , upper bound  $b = 3\mu$ , Beta distribution)



Obr. 4 Vliv dílčích součinitelů

$\gamma_G$  a  $\gamma_Q$  na úroveň spolehlivosti balkonových nosníků  
Fig. 4 The influence of the partial factors  $\gamma_G$  and  $\gamma_Q$  on the reliability level of balconies





Obr. 5 Koroze výztuže balkonového nosníku  
Fig. 5 Corrosion of reinforcement of the balcony beam

ukazují vliv dílčích součinitelů  $\gamma_G$  a  $\gamma_Q$  na změnu hodnot indexu spolehlivosti  $\beta$  (je předpokládána návrhová plocha výztuže  $A_s$ ) pro balkonový nosník, pokud by tyto součinitele byly při návrhu nosníku uplatněny. Úroveň spolehlivosti doporučenou podle Eurokódů pro padesátiletou dobu životnosti znázorňuje na obr. 4 bílá plocha ( $\beta_t = 3,8$ ).

#### ZÁVĚREČNÉ POZNÁMKY

Mezinárodní norma ISO 13822 poskytuje návody pro hodnocení spolehlivosti existujících konstrukcí včetně možnosti aplikace pravděpodobnostních postupů. Uvádí pokyny pro aktualizaci pravděpodobnostních modelů základních veličin a zpřesňování spolehlivosti existujících konstrukcí na základě nových informací. Pravděpodobnostní přístupy podle ISO 13822



poskytují nové možnosti, jak rozhodnout o dalším používání existujících konstrukcí.

Zavedení normy ISO 13822 do systému českých norem umožní posuzovat existující konstrukce v ČR nejenom podle tradičních postupů, ale také podle zásad teorie pravděpodobnosti a spolehlivosti. Do NP budou uvedeny důležité informace z normy ČSN 73 0038 a budou dále rozšířeny. Očekává se, že norma ISO 13822 bude začleněna do současně zaváděného systému evropských a mezinárodních norem pro navrhování v ČR a usnadní posuzování existujících konstrukcí a navrhování jejich oprav nebo přestaveb.

*Studie vznikla jako součást řešení úkolu č. 1H-PK/26 „Optimalizace spolehlivosti staveb a kalibrace norem EU“ podporovaného z prostředků MPO.*

#### Literatura:

- [1] ČSN 73 0038 Navrhování a posuzování stavebních konstrukcí při přestavbách, ČNI, 1986
- [2] ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí, ČNI, 2004
- [3] ČSN ISO 2394 Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí, ČNI, 2003
- [4] ISO 13822 Assessment of existing structures, 2001
- [5] ČSN 73 1201 Navrhování betonových konstrukcí, ČNI, 1986
- [6] Bouška P. a Klečka T.: Technické a statistické hodnocení balkónů, Kloknerův ústav, 1999
- [7] Probabilistic Model Code, Parts 1 to 4, Basis of design, Load and resistance models, Examples, JCSS, 2002
- [8] STRUREL, Structural Reliability System (programy STATREL, COMREL, SYSREL a NASREL – COMREL 8.00 z roku 2003), RCP Consulting software, Munich, Germany

Ing. Jana Marková, Ph.D.

Kloknerův ústav ČVUT v Praze

Šolínova 7, 166 08 Praha 6

tel.: 224 353 501, fax: 224355232

e-mail: markova@klok.cvut.cz



Dokončení ze strany 36

s výsypkami (obr. 9). Panel má tři části, které jsou postupně betonovány z výsypek. Spodní část obsahující napnutá lana, žebra vnitřní části a horní část jsou z hutného betonu. Mezi žebra vytváří kačírek, sypaný z výsypek, podélné průběžné dutiny požadovaného tvaru a rozměrů. Po přeříznutí pásu se kačírek odebírá a opakovaně používá (obr. 10).

Způsob výroby umožňuje použít měkký čerstvý beton s vyšším vodním součini-

Obr. 11 Betonovací stroj Dy-Core

Fig. 11 Concreting machine Dy-Core

telem, takže je možné po vybetonování pásu zatlačit do betonu příčnou betonářskou výztuž do horní části, třmínky do žeber a závěsná oka k čelům panelu.

Pro nákladné výrobní zařízení a pro velkou spotřebu tepla při urychlování tvrdnutí betonu se systém Spandek u nás neuplatnil.

U systémů Dy-Core, Spiroll a Partek je pás betonován na dráze dlouhé až 130 m betonovacím strojem pojezděným nad dráhou (obr. 11). Stroj rozváží a ukládá zavlhlý čerstvý beton. Ten přichází z násypky stroje k šroubovicovým vřetenům, které ho zhutňují vibrováním a lisováním a které vytvářejí v pruhu podélné průběžné dutiny. Horní povrch betonu se stanovuje tak, aby bylo zajištěno řádné kotvení lan soudržností a aby byl zachován tvar dutin. Po vybetonování pásu není možné do betonu vložit betonářskou výztuž a závěsná oka. Předpínací síla je přenášena dráhou, která působí

#### Literatura:

- [1] Voves B.: Současný stav a předpoklady dalšího rozvoje předpjatého betonu v bytové a občanské výstavbě, DT, TO Povereníctva stavebnictva, Bratislava, 1959
- [2] Voves B.: Technologie předpjatého betonu, SNTL Praha, 1976

bí jako rozpěra. Vyrobené panely jsou vyztuženy pouze předpínací výztuží.

Panely systému Spiroll vylehčené podélnými dutinami kruhového průřezu byly u nás již před lety zavedeny do výroby v několika výrobních. Bylo to usnadněno tím, že projektanti mohli upouštět od unifikace rozměrů ve výstavbě a volit délku panelů podle navrhované stavby. Souběžně jsou vyráběny i panely systému Partek s dutinami kruhového i oválného průřezu.

Prof. Ing. Bohumír Voves, DrSc.

Pod Fialkou 7, 150 00 Praha 5

tel.: 257 216 282