

Statistické vyhodnocení experimentálních dat – dálniční most Vepřek

Aleš Florian

Bylo provedeno podrobné statistické vyhodnocení dat získaných z experimentálních měření prováděných v průběhu výstavby dálničního mostu přes Vltavu u Vepřeku. Měření se prováděla pro rozměry průřezu konstrukce, složení betonu, fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu, fyzikálně-mechanické vlastnosti předpínací výztuže a velikost předpětí v kabelech. Získané výsledky svědčí o tom, že z globálního pohledu v porovnání s úrovní staveb v bývalém Československu a stávající České republice vykazuje tato stavba dobrou kvalitu provedení, dodržení technologie i úroveň kvality kontrolního procesu. Podrobnější zhodnocení dílčích jevů je ovšem rozporuplnější a zaslouží určitou pozornost, neboť je podle autora v mnoha směrech typické pro řadu staveb a má obecnější význam.

Statistical evaluation of experimental data (dimensions of cross-section, composition of concrete, unit weight and ultimate strength of concrete, modulus of elasticity and prestressing force in steel) obtained from in-situ measurements on highway bridge over Vltava River near Vepřek was performed. From the global point of view the obtained statistics show good quality of structural process, construction technology and quality inspection in comparison with other structures in former Czechoslovakia and Czech Republic. Evaluation of particular sets of experimental data shows some negative trends and general problems typical for a lot of structures.

V rámci prací podporovaných grantem GA ČR č. 103/95/0048 bylo provedeno podrobné statistické vyhodnocení dat získaných z experimentálních měření prováděných v průběhu výstavby dálničního mostu přes Vltavu u Vepřeku [1]. Primárním účelem vyhodnocení bylo získat přesné a spolehlivé údaje o statistických parametrech veličin, které tvoří vstupní veličiny stochastického modelu výše uvedeného mostu [2], [3]. Statistickým zpracováním a interpretací bezesporu rozsáhlých a reprezentativních souborů dat je ovšem také možné formulovat i obecné závěry o kvalitě provádění stavby, dodržení předpokládané technologie a porovnat je s předpoklady a předsevzetími investora, projektanta, stavitele i uživatele. Tyto závěry mohou mít platnost nejenom pro tuto konkrétní stavbu, ale obecně pro letmo betonované mosty velkých rozpětí. Experimentální měření in-situ byla prováděna pro rozměry průřezu konstrukce, složení betonu, fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu, fyzikálně-mechanické vlastnosti předpínací výztuže a velikost předpětí v kabelech.

Zdrojem naměřených dat byla v případě rozměrů konstrukce měření prováděná na stavbě pracovníky VUT Brno [4]. Pro data týkající se složení a fyzikálně-mechanických vlastností betonu byly zdrojem informací průběžně prováděné zkoušky dodavatele stavby [5], [6] a VUT Brno [4]. Konečně zdrojem dat pro mechanické vlastnosti předpínací výztuže a velikost předpínacího napětí byly předpínací protokoly Doprastavu Bratislava zpracované a doplněné VUT Brno [4]. Podrobné vyhodnocení a závěry je možné nalézt v [7]. Veškeré statistické zpracování včetně obrázků bylo provedeno systémem STATGRAPHICS. Pro osvětlení základních dále použitých statistických pojmů je možné doporučit [8].

Metodika statistického zpracování dat

V rámci statistického hodnocení byly určovány odhady následujících statistických parametrů sledovaných veličin:

- (a) střední hodnota,
- (b) medián,
- (c) směrodatná odchylka,
- (d) variační koeficient,
- (e) šikmost (koeficient šikmosti),
- (f) špičatost (koeficient špičatosti),
- (g) minimální a maximální hodnota v souboru.

Dále byly určovány 1, 5, 10, 90, 95 a 99% kvantily, které jsou ve stavební praxi obvykle nejdůležitější. Kvantily jsou důležité statistiky, které nám charakterizují náhodnou veličinu a umožňují nám činit pravděpodobnostní závěry.

Pro dané soubory dat byla vybrána vhodná rozdělení pravděpodobnosti. Naměřené hodnoty pro jednotlivé veličiny byly vždy nejprve zpracovány graficky. Byly rozříděny do histogramů, byla zpracována empirická funkce hustoty pravděpodobnosti a dále byly vyneseny do „pravděpodobnostního papíru“, kde se distribuční funkce normálního rozdělení zobrazuje jako přímka a výsledky měření jako body. Pokud by tudíž naměřená data vykazovala normální rozdělení pravděpodobnosti (obecně velmi často používané a v praxi velmi rozšířené), musely by jednotlivé body ležet dokonale na přímce.

Po grafickém zpracování bylo provedeno numerické hodnocení, kdy z množiny rozdělení pravděpodobnosti obsahující normální, lognormální, Weibullovo rozdělení a rozdělení extrémních hodnot bylo vybráno to rozdělení, které relativně nejlépe popisuje naměřená data. K tomu byly použity statistiky Kolmogorova-Smirnova a Chi-kvadrát. Jako relativně nejhodnější bylo vybráno to rozdělení, které má výše uvedené statistiky nejnižší.

V této souvislosti je nutné se zmínit i o tom, že nejhodnější rozdělení pravděpodobnosti vybrané ze čtyř soutěžících nemusí být absolutně tím nejhodnějším. Je to vidět u řady veličin, kdy teoretická funkce hustoty vybraného rozdělení pravděpodobnosti více či méně nesouhlasí s empirickou funkcí a tvarem histogramu. Bohužel systém STATGRAPHICS obsahuje pouze čtyři výše uvedené rozdělení pravděpodobnosti.

Rozměry tvaru průřezu

U komůrkového průřezu byla měřena tloušťka stěny, tloušťka horní desky a tloušťka dolní desky. Odhady statistických parametrů jsou uvedeny v tab. 1 a odhady kvantilů v tab. 2.

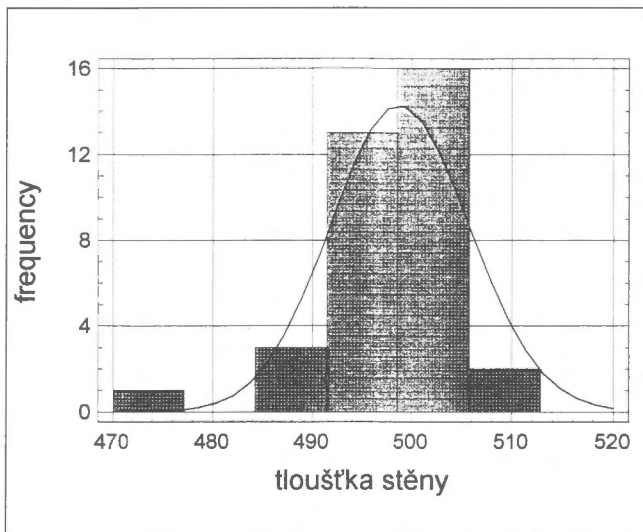
Tab. 1 – Statistické charakteristiky rozměrů průřezů / Statistical characteristics of cross-section dimensions

Statistické charakteristiky	Stěna	Horní deska	Dolní deska
Rozsah	35	7	38
Průměr	498,86	401,14	1,0448
Medián	500	403	1,0375
Sm. odch.	6,93	4,53	0,0398
Var. koef.	0,01	0,01	0,04
Šikmost	-1,05	-1,61	0,33
Špičatost	2,67	2,90	0,88
Min. hodn.	475	392	0,938
Max. hodn.	510	405	1,146

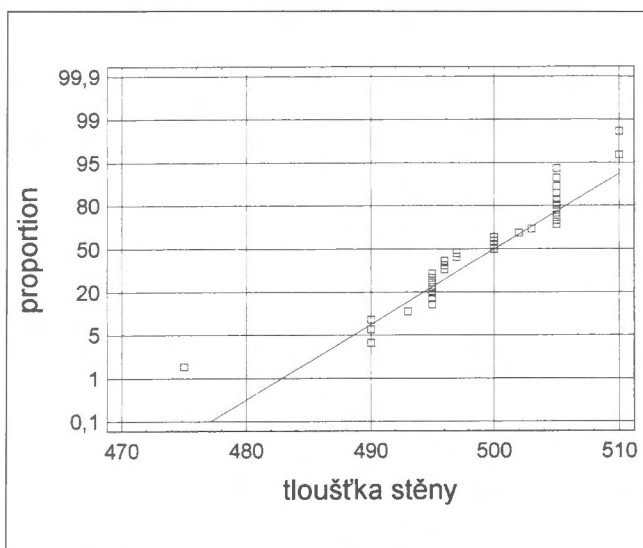
Tab. 2 – Kvantily rozměrů průřezu / *Quantils of cross-section dimensions*

Kvantil	Stěna	Dolní deska
0,01	475	0,938
0,05	490	1,000
0,1	490	1,009
0,9	505	1,104
0,95	510	1,111
0,99	510	1,146

Na obr. 1 a 2 jsou vykresleny histogramy s proloženou funkcí hustoty pravděpodobnosti nejvhodnějšího rozdělení resp. normální pravděpodobnostní papír. Nominální tloušťka stěny je 500 mm a horní desky 400 mm. Tloušťka dolní desky se průběžně mění a proto je v tabulce vyhodnocen poměr naměřené tloušťky k její nominální hodnotě (x/x_{nom}).



Obr. 1 – Tloušťka stěny – histogram a funkce hustoty pravděpodobnosti / *Width of wall – histogram and probability distribution function*



Obr. 2 – Tloušťka stěny – normální pravděpodobnostní papír / *Width of wall – normal probabilistic paper*

Průměrné hodnoty tloušťky stěny jsou o něco menší než nominální hodnota, zatímco u tloušťky horní desky jsou o něco větší. Jejich náhodná proměnlivost měřená variačním koeficientem je malá. Průměrné hodnoty tloušťky dolní desky jsou ovšem soustavně výrazněji větší (o 4,5 %) než nominální hodnota a taktéž její proměnlivost je mnohem větší. Jako relativně nepříznivé se jeví minimální a maximální hodnoty jednotlivých tloušťek. U stěny byla naměřena tloušťka až o 5 % menší a až o 2 % větší než nominální hodnota, u horní desky je v celkem přijatelných mezích -2 % až +1 % a u dolní desky je v mezích -6 % až +15 % oproti nominální hodnotě. Některé průřezy jsou tudíž výrazně předdimenzovány a proto s větší vlastní hmotností, jiné naopak výrazně poddimenzovány a tudíž s menší tuhostí. Nepříznivým jevem u tloušťky stěny i horní desky je vysoká záporná hodnota šikmosti, která ukazuje, že k poddimenzování může dojít často a s vysokou pravděpodobností. To dokumentují i hodnoty kvantilů, kdy např. u stěny existuje přibližně 5 až 10% pravděpodobnost, že tloušťka bude menší než 490 mm a ještě 1% pravděpodobnost, že bude menší než 475 mm. Jako vhodné rozdělení pravděpodobnosti se jeví lognormální případně Weibullovo rozdělení.

Rozměry tvaru průřezu vykazují obecně odpovídající úroveň kvality, dodržení technologie i úroveň kontroly. Beze zbytku to platí pro tloušťku stěny a horní desky. Naproti tomu tloušťka dolní desky, která se ovšem průběžně mění, takovou kvalitu nevykazuje a pohybuje se mírně za přijatelnými mezemi udávanými v literatuře. Vysoké hodnoty šikmosti také obecně příliš nesvědčí o rovnoměrnosti výroby.

Složení betonu

K dispozici byly dílčí údaje o složení betonu. Bylo proto možné vyhodnotit soubory dat týkající se množství vody, množství písku a množství kameniva v betonové směsi. Množstvím vody se rozumí množství vody celkem, tj. včetně vody obsažené v písku (odhaduje se 4 %). Vlhkost kameniva (odhaduje se 1 %) se zanedbala. Množství písku je udáno v suchém stavu. Na stavbě byly používány betony dvou receptur a to vždy dvě pro estakádu (BE I, BE II) a pro vahadla (BV I, BV II). Jejich teoretické nominální složení je uvedeno v tab. 3. V dalším je pozornost věnována betonu receptur BV I a BV II.

Tab. 3 – Složení betonu / *Composition of Concrete*

Dávkování v kg/m ³	Estakáda		Vahadlo	
	BE I	BE II	BV I	BV II
cement (Čížkovice 42,5 R)	390	390	410	410
písek (Dobřín 0 - 4 mm)	780	780	910	910
písek (Dobřín 4 - 8 mm)	180	180	0	0
šterk (Libochovany 8 - 16 mm)	880	971	900	992
umaform	5,5	5,5	5,8	5,8
voda	160	160	170	170

Přestože nominální složení betonů vahadel obou typů je jednoznačně předepsáno, v jednotlivých případech docházelo k dílčím rozdílům v množství vody, písku a kameniva. Odhady statistických parametrů (jednotky v kg.m⁻³) těchto veličin jsou uvedeny v tab. 4 a příslušné kvantily v tab. 5.

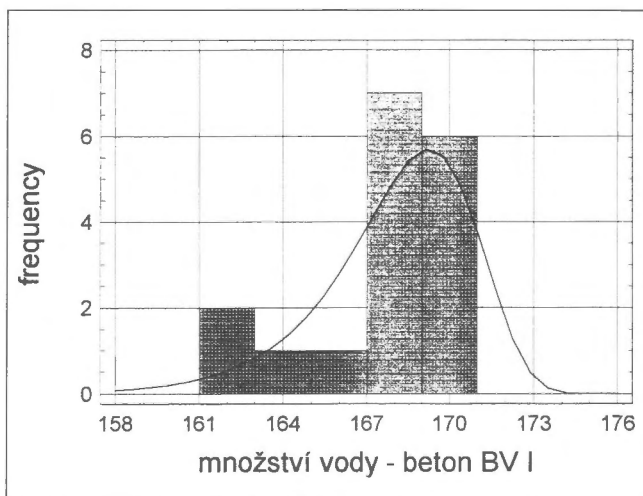
Na obr. 3 je vykreslen histogram s proloženou funkcí hustoty pravděpodobnosti nejvhodnějšího rozdělení a na obr. 4 normální pravděpodobnostní papír pro recepturu BV I.

Tab. 4 – Statistické charakteristiky složení betonu / *Statistical characteristics of composition of concrete*

Statistické charakteristiky	Voda		Písek		Kamenivo	
	BV I	BV II	BV I	BV II	BV I	BV II
Rozsah	17	15	17	15	17	15
Průměr	168,06	169,6	910	911,27	902,59	992,6
Medián	168	170	-	911	902	992
Sm. odch.	2,77	1,64	-	3,20	3,00	3,07
Var. koef.	0,02	0,01	0	0	0	0
Šikmost	-1,25	0,30	-	1,18	0,75	-0,09
Špičatost	1,05	-0,40	-	4,22	-0,74	-1,21
Min. hodn.	162	167	910	905	900	987
Max. hodn.	171	173	910	920	909	997

Tab. 5 – Kvantily složení betonu / *Quantils of composition of concrete*

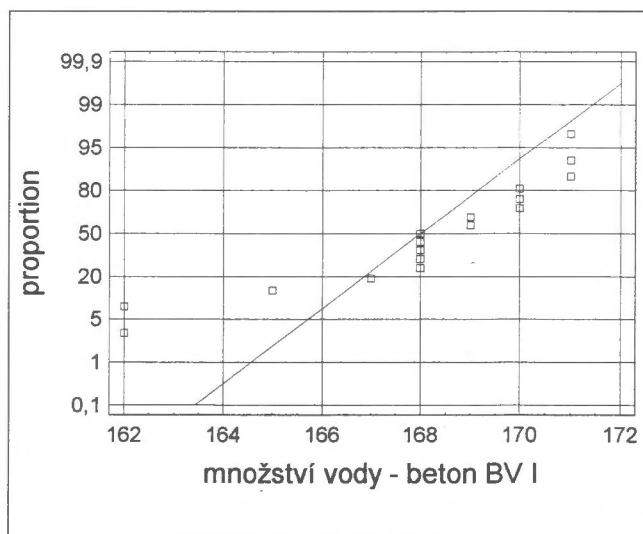
Kvantily	Voda		Písek		Kamenivo	
	BV I	BV II	BV I	BV II	BV I	BV II
0,01	162	167	-	905	900	987
0,05	162	167	-	905	900	987
0,1	162	168	-	910	900	990
0,9	171	171	-	915	906	996
0,95	171	173	-	920	909	997
0,99	171	173	-	920	909	997



Obr. 3 – Množství vody, beton BV I – histogram a funkce hustoty pravděpodobnosti / *Water content, concrete BV I – histogram and probability distribution function*

Pro množství vody je charakteristické, že u obou receptur bylo ve skutečnosti menší v porovnání s nominální hodnotou. Toto menší množství vody bylo v případě receptury BV I dávkováno soustavně (nejedná se tedy pouze o vliv náhodných odchylek), jak o tom svědčí značně velká záporná hodnota šikmosti a porovnání minimálních a maximálních hodnot se střední hodnotou. V případě receptury BV II tento trend neexistuje. Proměnlivost množství

vody je relativně malá, vykazuje ovšem u obou receptur určité rozdíly, což pravděpodobně souvisí s předcházejícími závěry. Pro množství písku je charakteristické, že u receptury BV I nevykazovalo žádnou odchylku od nominální hodnoty, zatímco u BV II bylo mírně větší. Toto větší množství písku bylo dávkováno soustavně, jak o tom svědčí značně velká kladná hodnota šikmosti a porovnání minimálních a maximálních hodnot se střední hodnotou. I tak je proměnlivost množství písku minimální. Množství kameniva bylo u obou receptur v průměru mírně větší v porovnání s nominální hodnotou. Toto větší množství kameniva bylo u receptury BV I dávkováno soustavně, jak o tom opět svědčí značně velká kladná hodnota šikmosti a porovnání minimálních a maximálních hodnot se střední hodnotou. V případě receptury BV II tento trend neexistuje. Proměnlivost množství kameniva je u obou receptur minimální. Nejvhodnějším rozdělením pravděpodobnosti pro popis náhodných vlastností složení směsi je vesměs lognormální rozdělení.



Obr. 4 – Množství vody, beton BV I – normální pravděpodobnostní papír / *Water content, concrete BV I – normal probabilistic paper*

Taktéž v případě složení betonu je proměnlivost dílčích složek velmi malá a svědčí o odpovídající úrovni kvality, dodržení technologie i úrovni kontroly. Na druhou stranu je ovšem možné se domnívat, že použitá technologie by jistě mohla teoreticky i prakticky vykazovat ještě lepší parametry. Přesto dávkování některých složek v dílčích případech vykazuje nikoliv pouze náhodné, ale i soustavné trendy. Tudiž je pravděpodobné, že sice teoretické parametry použité technologie výroby betonu jsou vysoké, ovšem průběžná kontrola jejich dodržení není v dílčích případech na optimální úrovni. Je pravdou, že rozdíly oproti receptuře nejsou nijak výrazné, aby ovlivnily např. pevnosti nebo modul pružnosti. Na druhé straně je nutné si uvědomit, že složení betonu ovlivní i takové jevy, jako je např. smršťování a dotvarování betonu, které u tohoto typu mostu mohou mít značný vliv na jeho chování. Že tomu tak skutečně je, vyplývá např. z [3].

Fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu

Z fyzikálně-mechanických vlastností betonu byly podrobně sledovány objemová hmotnost v čase 3, 28 a 90 dní a krychelná pevnost betonu v tlaku v čase 3, 28 a 90 dní. Pro tyto veličiny byly k dispozici dostatečně rozsáhlé a tudiž reprezentativní soubory dat. Mimo nich byly k dispozici i méně rozsáhlé soubory dat pro pevnost betonu v tlaku v čase 1,5, 2, 2,5, 4, 7, 14 a 31 dní.

Objemová hmotnost byla určována v čase 3 a 28 dní v nasáklém stavu - zkušební krychle byly uloženy ve vodě. V čase 90 dní

byla určována ve stavu přirozené vlhkosti, neboť zkušební krychle byly v období 28 až 90 dní uloženy ve vnějším prostředí.

Odhady statistických parametrů objemové hmotnosti (jednotky v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) jsou uvedeny v tab. 6 a obdobně pro krychelnou pevnost v tlaku (jednotky MPa) v tab. 7.

Tab. 6 – Statistické charakteristiky objemové hmotnosti betonu / *Statistical characteristics of unit weight of concrete*

Statistické charakter.	Objemová hmotnost 3 dny		Objemová hmotnost 28 dní		Objemová hmotnost 90 dní	
	BV I	BV II	BV I	BV II	BV I	BV II
Rozsah	39	21	102	90	30	12
Průměr	2 415,31	2 430,86	2 425,23	2 449,46	2 431,47	2 431,75
Medián	2 418	2 435	2 427	2 451,5	2 432	2 428,5
Sm. odch.	29,9	23,92	38,93	25,61	24	17,45
Var. koef.	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Šikmost	-1,2	-0,56	-0,64	0,05	-1,76	0,08
Špičatost	1,01	-0,72	0,75	-0,6	6,44	-0,96
Min. hodn.	2 329	2 382	2 314	2 388	2 341	2 403
Max. hodn.	2 456	2 462	2 504	2 504	2 480	2 459

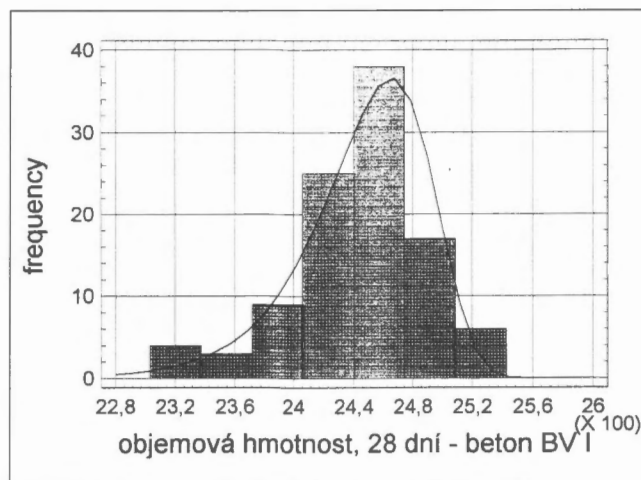
Tab. 7 – Statistické charakteristiky pevnosti betonu v tlaku / *Statistical characteristics of ultimate strength of concrete*

Statistické charakter.	Pevnost 3 dny		Pevnost 28 dní		Pevnost 90 dní	
	BV I	BV II	BV I	BV II	BV I	BV II
Rozsah	39	21	102	90	30	12
Průměr	32,28	33,45	49,41	53,53	55,42	57,17
Medián	31,8	33,8	49,7	53,3	56,65	57
Sm. odch.	3,05	3,07	4,17	3,77	4,68	3,23
Var. koef.	0,09	0,09	0,08	0,07	0,08	0,06
Šikmost	0,51	-0,25	-0,23	-0,09	0,11	0,43
Špičatost	-0,42	-1,22	-0,77	-0,52	-0,98	-1,03
Min. hodn.	26,7	28,2	39,8	44,4	48,4	52,9
Max. hodn.	39,1	38,2	56,7	62,2	65,4	62,8

Betony dle obou receptur vykazují u pevností ve sledovaných časech rozdílné průměrné hodnoty. Podstatnější rozdíly ovšem vykazují minimální a maximální hodnoty. Proměnlivost pevnosti je u receptury BV I soustavně větší než u BV II. V obou případech je ovšem vždy v pásmu charakteristickém pro kvalitně provedené betony. Hodnota variačního koeficientu se s časem, a tedy i s rostoucí pevností, soustavně snižuje, což je typická vlastnost pevnosti betonu v tlaku. U hodnot šikmosti vykazují obě receptury, s výjimkou pevnosti tři dny, obdobné trendy. Z původně záporné šikmosti přechází ke kladným hodnotám. I toto je typická vlastnost pevnosti betonu v tlaku.

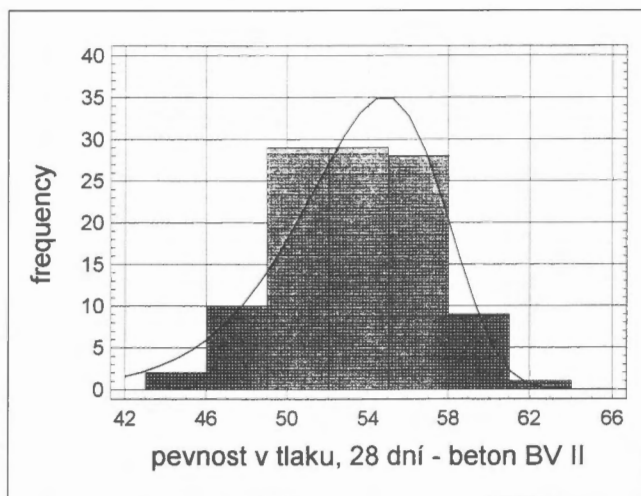
Objemová hmotnost betonu podle obou receptur vykazuje v průměru podstatnější rozdíly pouze do času 28 dní, kdy receptura BV I má soustavně nižší objemovou hmotnost. Od času 90 dní jsou objemové hmotnosti v podstatě totožné. Totéž se týká i proměnlivosti, která je v pásmu charakteristickém pro kvalitně provedené betony. Podstatnější rozdíly u obou receptur se projevují u minimálních a maximálních hodnot a také hodnot kvantilů, což

souvisí s rozdílnou hodnotou šikmosti. Zatímco v první receptuře má šikmost soustavně nezanedbatelnou zápornou hodnotu, v druhém případě záporná hodnota postupně přechází k hodnotám okolo nuly. Záporná šikmost u první receptury je značná a i když je proměnlivost relativně příznivá, celkově se jeví kvalita betonu dle této receptury horší než ve druhém případě.



Obr. 5 – Objemová hmotnost 28 dní, beton BV I – histogram a funkce hustoty pravděpodobnosti / *Unit weight of concrete (28 days), concrete BV I – histogram and probability distribution function*

V obr. 5 a 6 jsou vykresleny histogram s proloženou funkcí hustoty pravděpodobnosti nejvhodnějšího rozdělení pro objemovou hmotnost v čase 28 dní u receptury BV I resp. pro krychelnou pevnost v čase 28 dní u receptury BV II.



Obr. 6 – Pevnost betonu 28 dní, beton BV II – histogram a funkce hustoty pravděpodobnosti / *Ultimate strength of concrete (28 days), concrete BV II – histogram and probability distribution function*

Mimo tohoto globálního vyhodnocení bylo ještě u pevnosti betonu v čase 28 dní pro recepturu BV I a BV II vyšetřováno, zda a jak se odhady statistických parametrů mění v závislosti na datu výroby. Pro ilustraci byly náhodně zvoleny dny na počátku, ve středu a na konci období, kdy byly betony dle příslušných receptur vyráběny. Odhady těchto statistických parametrů jsou uvedeny v tab. 8, přičemž první čtyři sloupce patří receptuře BV I, poslední dva sloupce BV II.

Pevnost betonu v tlaku v čase 28 dní vyrobeného dle jedné receptury vykazuje značnou proměnlivost v rámci jednotlivých vyrobených dávek. Průměrná hodnota pevnosti betonu vyrobeného 17. 10. 1995 je např. 44,82 MPa, zatímco u betonu vyrobeného podle stejné receptury 8. 8. 1995 je to 50,83 MPa, tedy o více než 10 % vyšší. Naopak u minimální pevnosti jsou rozdíly minimální

a hodnoty se pohybují v intervalu 43,1 MPa (17. 10. 95) až 45,3 MPa (18. 10. 95). U maximální pevnosti jsou rozdíly extrémně velké a hodnoty se pohybují v intervalu 45,8 MPa (17. 10. 95) až 58,2 MPa (21. 8. 95). Taktéž hodnoty variačního koeficientu vykazují podstatně rozdíly a pohybují se v intervalu 0,02 – 0,1.

Statistiky krychelné pevnosti a objemové hmotnosti betonu svědčí z globálního pohledu o jeho vysoké kvalitě, neboť proměnlivost je velmi malá. Na druhé straně vysoké záporné hodnoty šikmosti u jedné receptury opět naznačují přítomnost nenáhodných faktorů, spočívajících pravděpodobně v podcenění nutnosti soustavně sledovat proces zpracování betonové směsi či jejího ukládání. Mnohem závažnější je ovšem vnitřní proměnlivost těchto vlastností v závislosti na datu výroby betonu. Tyto rozdíly jsou až zarážející a opět je nutné konstatovat, že daná technologie výroby jistě dovoluje více, ovšem za předpokladu vyšší úrovně kontrolního procesu.

Tab. 8 – Statistické charakteristiky pevnosti betonu v tlaku v různých dnech / *Statistical characteristics of ultimate strength of concrete in different days*

Statistické charakter.	Krychelná pevnost v tlaku 28 dnů – BV					
	8.8.95	21.8.95	17.10.95	18.10.95	9.11.95	27.11.95
Rozsah	6	6	6	6	6	6
Průměr	50,83	49,23	44,82	50,27	55,03	56,55
Mediální	52,00	47,65	45,10	50,55	55,10	56,55
Sm. odch.	5,07	4,96	1,08	4,28	2,30	2,22
Var. koef.	0,10	0,10	0,02	0,09	0,04	0,04
Šikmost	-0,39	1,42	-0,86	-0,10	-0,12	0,91
Špičatost	-2,07	2,02	-0,48	-1,83	-1,84	1,85
Min. hodn.	44,4	44,4	43,1	45,3	52,0	53,8
Max. hodn.	56,4	58,2	45,8	55,5	57,8	60,4

Fyzikálně-mechanické vlastnosti předpínací výztuže a velikost předpětí v kabelech

Z fyzikálně-mechanických vlastností předpínací výztuže byl statisticky vyhodnocován pouze modul pružnosti. Z veličin charakterizujících velikost vneseného předpětí v kabelech byly statisticky vyhodnoceny veličiny Δ_p a Δ_n . Veličina Δ_p je definována jako podíl rozdílu skutečného a teoretického průtahu k teoretickému průtahu v %. Reprezentuje tak průměrnou relativní chybu protažení po délce kabelu plynoucí z rozdílu teoretických a reálných hodnot jako důsledek proměnlivosti modulu pružnosti a pracovního diagramu výztuže, kotevního napětí včetně chyby manometru a ztrát předpětí třením a pokluzem. Teoretický průtah byl vypočten integrací po délce kabelu s respektováním pracovního diagramu výztuže a za předpokladu, že modul pružnosti výztuže je roven teoretické nominální hodnotě 190 GPa. Protože modul pružnosti vykazuje vlastní proměnlivost, byla zavedena nová veličina Δ_n definovaná obdobně, respektující ovšem reálnou hodnotu modulu pružnosti. Výsledky statistického vyhodnocení (jednotky v GPa resp. v %) jsou souhrnně uvedeny v tab. 9 a 10.

Na obr. 7 a 8 jsou vykresleny histogramy s proloženou funkcí hustoty pravděpodobnosti nejhodnějšího rozdělení pro modul pružnosti a pro veličinu Δ_n .

Modul pružnosti je v průměru soustavně menší než nominální (a současně i charakteristická či normová) hodnota 190 GPa. Minimální hodnota se pohybuje okolo 178 GPa a maximální hodnota okolo 192,5 GPa. Proměnlivost modulu pružnosti je relativně

malá a je v mezích odpovídajících údajům z literatury. Hodnoty šikmosti jsou záporné a tudíž je větší pravděpodobnost, že se objeví hodnoty modulu pružnosti menší než průměrná hodnota. S výjimkou střední hodnoty a relativně větší záporné šikmosti je tedy kvalita předpínací výztuže odpovídající a je typická pro tuto kategorii.

Tab. 9 – Statistické charakteristiky modulu pružnosti a předpětí předpínací výztuže / *Statistical characteristics of modulus of elasticity and prestressing force in steel*

Statistické charakteristiky	Modul pružnosti	Δ_p	Δ_n
Rozsah	49	290	292
Průměr	185,23	2,54	-0,26
Medián	185,97	2,73	0,52
Sm. odch.	3,42	9,09	8,84
Var. koef.	0,02	-	-
Šikmost	-0,48	-2,62	-2,55
Špičatost	-0,41	11,01	10,2
Min. hodn.	178,12	-45,34	-46,32
Max. hodn.	192,68	25,97	19,83

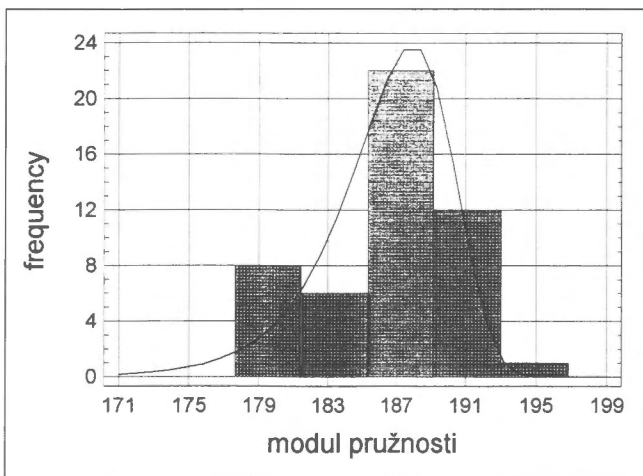
Tab. 10 – Kvantily modulu pružnosti a předpětí předpínací výztuže / *Quantils of modulus of elasticity and prestressing force in steel*

Kvantil	Modul pružnosti	Δ_p	Δ_n
0,01	178,12	-39,23	-40,21
0,05	179,17	-5,71	-8,96
0,1	179,85	-2,67	-5,4
0,9	189,05	9,89	7,45
0,95	189,05	12,12	10,27
0,99	192,68	20,59	18,08

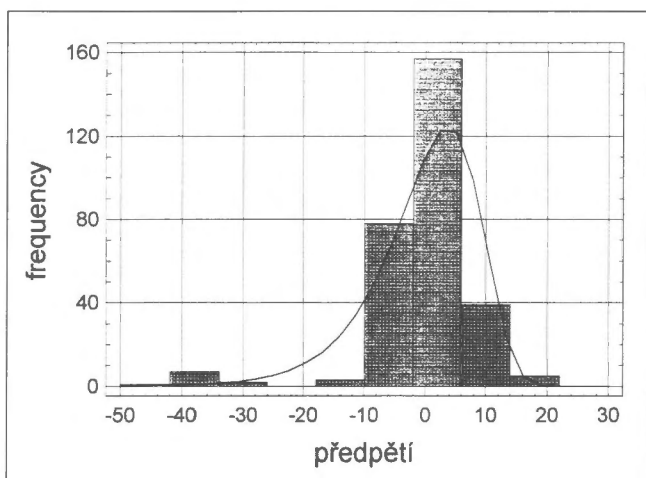
Veličiny Δ_p a Δ_n vykazují obdobné trendy a budeme se proto v dalším zabývat veličinou Δ_n . Průměrná hodnota se pohybuje okolo 0,26 %. Znamená to, že v průměru je v kabelech vneseno teoretické předpětí stanovené v projektu. Proměnlivost předpětí je značná. Minimální hodnoty se pohybují okolo -46 % a maximální okolo +20 %, což znamená, že v některých kabelech je až o 46 % menší předpětí než předpokládané a v jiných až o 20 % větší. Existuje 1% pravděpodobnost, že vnesené předpětí bude o 40 % menší než předpokládané a 5% pravděpodobnost, že bude menší o 9 %. Hodnoty šikmosti jsou výrazně záporné. Jedná se o velice negativní trend, který ukazuje, že vnesení menšího předpětí než předpokládaného má velkou pravděpodobnost.

Velikost předpětí v jednotlivých kabelech je zdánlivě nejvíce diskutabilním a nejméně příznivým výsledkem. Fakt, že v některých kabelech je až o 46 % menší předpětí než projektované a uvažované při posouzení konstrukce, je jistě hodný zamyšlení. Faktem ovšem také je, že se tyto hodnoty nijak nevymykají jiným experimentálně zjištěným datům a neliší se bohužel příliš od výsledků obdobných měření prováděných např. v bývalém Československu. Z tohoto důvodu tedy nemůžeme v žádném případě hovořit o nějakém záporném excessu. I zde je možné obecně ukázat na pravděpodobného viníka – objektivně na složitost této

operace a subjektivně na nedostatečnou úroveň kontroly a nízkou úroveň odpovědnosti osob provádějících předpínání.



Obr. 7 – Modul pružnosti – histogram a funkce hustoty pravděpodobnosti / Modulus of elasticity – histogram and probability distribution function



Obr. 8 – Veličina Δ_n – histogram a funkce hustoty pravděpodobnosti / Factor Δ_n – histogram and probability distribution function

Závěr

Statistické vyhodnocení rozsáhlých a reprezentativních souborů dat experimentálně zjištěných na mostu přes Vltavu u Vepřeku svědčí o tom, že z globálního pohledu v porovnání s úrovní staveb

v bývalém Československu a stávající České republiky vykazuje tato stavba dobrou kvalitu provedení, dodržení technologie i úroveň kvality kontrolního procesu. Podrobnější zhodnocení dílčích jevů je ovšem rozporuplnější a zaslouží určitou pozornost, neboť je podle autora v mnoha směrech typické pro řadu staveb a má obecnější význam.

Poděkování

Tento výzkum byl finančně podporován Grantovou agenturou České republiky jako součást projektu č. 103/95/0048 a byl prováděn na zařízení Ústavu stavební mechaniky, VUT FAST Brno.

Literatura

[1] Cieslar P., Landa T., Žurych R.: Most přes Vltavu u Vepřeku, *Beton a ždivo*, 1995, č. 4, s. 5-9.

[2] Florian A., Navrátil J.: *Stochastical Analysis of Highway Bridge across Vltava River*, dílčí výzkumná zpráva č. 10-103/0048/95, grant GA ČR No. 103/0048/95, Ústav stavební mechaniky, VUT FAST Brno, 1996, 25 s.

[3] Florian A., Navrátil J.: *Stochastical Analysis of Highway Bridge across Vltava River*, 7th Int. Conference ICOSSAR 97, Kyoto, Japonsko, 1997 (v tisku).

[4] Stráský J., Navrátil J., Zich M., Cikrle P., Bydžovský J., Chalupná M., Chandoga M.: *D8-0802 c/SO 209 dálniční most přes řeku Vltavu - zkoumání vlivu dotvarování a smršťování na deformace nosné konstrukce mostu*, zprávy k etapám I až IV HČ 250401, Ústav betonových a zděných konstrukcí VUT FAST Brno, 1996

[5] *Protokoly o odběru vzorků čerstvého betonu a zhotovení zkušebních těles*, Espebepe S.A. Holding Szczecin, Poland, Dušníky, 1996

[6] *Zprávy o krychelné pevnosti betonu v tlaku*, Espebepe S.A. Holding Szczecin, Poland, Dušníky, 1996

[7] Florian A.: *Statistické vyhodnocení experimentálních dat*, dílčí výzkumná zpráva č. 09-103/0048/95, grant GA ČR No. 103/0048/95, Ústav stavební mechaniky, VUT FAST Brno, 1996, 56 s.

[8] Vorlíček M., Holický M., Špačková M.: *Pravděpodobnost a matematická statistika*, skriptum ČVUT Praha, 1984, 345 s.

Ing. Aleš Florian, CSc., Ústav stavební mechaniky, VUT FAST Brno, Veveří 95, 662 37 Brno

Stavební firmy roku

Na letošním Mezinárodním stavebním veletrhu Brno byl udělen titul „Stavební firma roku“ podnikům: Pozemní stavby Zlín, a. s. Inkoma Praha, s. r. o.

Ocenění vyjadřuje nejen komplexní výsledky dlouhodobější činnosti firmy – výsledky ekonomické, ale i technickou úroveň a kvalitu prováděných staveb. Výběr provedla porota z představitelů stavebních fakult v Praze a v Brně, Ministerstva průmyslu a obchodu ČR a Svazu podnikatelů ve stavebnictví ČR.

Redakce