

BETON VYŠŠÍ PEVNOSTI S MALÝM VÝVINEM HYDRATAČNÍHO TEPLA

Vít Némčic, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
vit.nemcic@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek se zabývá sledováním vývoje teplot od hydratačního tepla a teplotních rozdílů v masivních betonových konstrukcích s vyšší pevností betonu. Na základě experimentů byly vyhodnoceny 3 receptury se dvěma různými cementy. Vybraná receptura byla navíc ověřena na dalším modelu konstrukce v měřítku 1:1. Zkušenosti ukázaly, že nejen technické, ale i technologické a logistické problémy jsou závažné pro výběr optimální receptury.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, Hydratační teplo, Teplota, Monitoring, Receptura

ABSTRACT

The article deals with monitoring the development of temperatures from the heat of hydration and temperature differences in massive concrete structures with higher concrete strength. Based on the experiments, 3 recipes with two different cements were evaluated. In addition, the selected recipe was verified on another model of the structure in a scale of 1:1. Experience has shown that not only technical, but also technological and logistical problems are important for choosing the optimal recipe.

KEYWORDS

Concrete, Heat of hydration, Temperature, Monitoring, Recipe

1. ÚVOD

V současnosti je jednou z významných priorit stavebnictví snaha o zvýšení efektivity využití přírodních zdrojů, snížení míry znečišťování životního prostředí a zajištění kvalitnějšího a trvale udržitelného životního prostředí. K zajištění udržitelnosti při přípravě betonových konstrukcí je jednou z klíčových fází optimalizace výrobních technologií cementu, betonu, betonových prvků a konstrukcí a optimalizace složení betonové směsi.

V případě optimalizace výrobních procesů v oblasti výpalu slínku a mletí cementu, je potenciál snižování emisí CO₂ prakticky vyčerpán. Proto je v současnosti důležité se zaměřit

na výrobu cementu, kde bude obsah slínku redukován a nahrazen jinými aktivními, popř. pasivními materiály.

K dosažení rychlé výstavby betonových konstrukcí (především u staveb dopravní infrastruktury) jsou nutností rychlého náběhu pevností betonu. K tomuto účelu se nejčastěji využívá portlandský cement (cement typu CEM I) s vysokým obsahem slínku. Využití tohoto typu cementu má však za následek vznik většího množství emisí CO₂ a také takové betony vyvíjejí větší hydratační teplo.

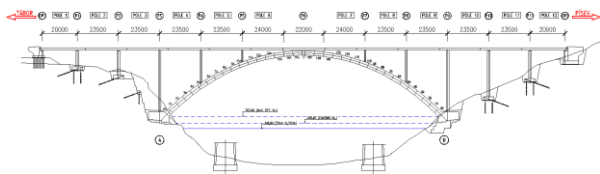
Vhodnou alternativou portlandského cementu mohou být portlandské směsné cementy, které snížením obsahu energeticky náročného slínku v cementové směsi a užitím dalších hlavních složek, snižují vznik emisí CO₂. Zároveň mohou být také takové směsi výhodné z technologického hlediska. Cement ovlivňuje vlastnosti betonu, např. zpracovatelnost, nárost pevnosti, a především trvanlivost betonu, která je úzce spjata s hutností, a tudíž nepropustností, která dokáže zpomalit proces karbonatace, omezit průnik chloridů atd. Další důležitou výhodou těchto cementů je schopnost pomalejšího a zároveň nižšího uvolňování hydratačního tepla, což je způsobeno nižším podílem slínku ve směsi. Vznik vysokých teplot uvnitř masivních betonových konstrukcí je rizikovým faktorem ovlivňující kvalitativní betonované konstrukce. Je také nutné, aby byly omezeny teplotní rozdíly, které v betonu vyvolávají v betonových prvcích vlastní pnutí. Tato napětí mohou být příčinou vzniku trhlin. Snížení teplot vyvíjených v betonu masivních konstrukcí proto redukuje riziko vzniku větších tahových napětí a tím vzniku trhlin, což má za následek větší trvanlivost konstrukcí.

Proto je při výstavbě masivních betonových konstrukcí důležité klást důraz na výběr cementové směsi s ohledem na výsledně požadované vlastnosti betonu s ohledem na technologické požadavky a udržitelnost.

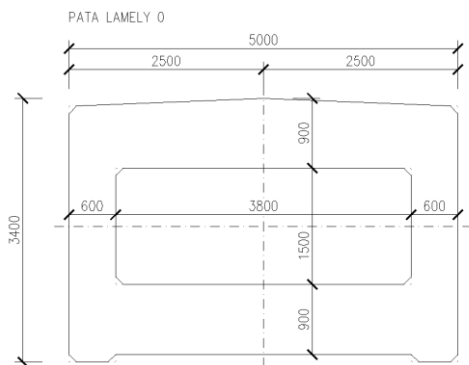
* Školitel: prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc., FEng.

2. MOSTNÍHO OBJEKT PŘES VD ORLÍK

Mostní objekt přes VD ORLÍK (most na Červené přes Vltavu) je charakterizován masivním železobetonovým obloukem s horní mostovkou. Oblouk mostního objektu je navržen jako železobetonový komorový třídy C45/55. Rozpětí oblouku je 156,0 m. Šířka mostního oblouku je 5,0 m, výška oblouku je proměnná od paty ke krčku. Komorový průřez má konstantní tloušťku stěn 0,6 m. Mocnost horní a spodní desky je proměnná s ohledem na zajištění proměnné tuhosti podél oblouku. Přitom vnitřní prostor komory má konstantní výšku 1,5 m. Ve větknutí jsou desky navrženy tl. 0,9 m, ve vrcholu oblouku 0,5 m. Výška průřezu se mění v rozsahu každé lamely oblouku lineárně. Oblouk je s ohledem na systém výstavby (letná betonáž s postupným vyvěšováním) rozdělen symetricky do 16 lamel. Mostovka nosné konstrukce je navržena jako spojitý dvoutrám. Realizace mostního objektu začala v lednu 2022. Dokončení projektu je plánováno na podzim 2024.



Obrázek 1: Podélný řez mostem



Obrázek 2: Příčný řez lamely oblouku (pata lamely)

3. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM PRO STANOVENÍ TEPLOT OD HYDRATAČNÍHO TEPLA

Autor příspěvku navrhl experimentální program s cílem vyhodnocení optimální receptury s ohledem na vývoj hydratačního tepla. Tato činnost probíhala nad rámec projektu mostu s částečnou podporou projektu SGS. Dále po konzultacích experimentální program zrealizoval a vyhodnotil výsledky.

3.1. Receptury a vzorky

Pro betonový oblouk železničního mostu „Červená“ přes VD Orlický byl proveden návrh 3 alternativních receptur betonové směsi (Tab. 1). U navržených receptur byla provedena řada zkoušek (průkazní zkoušky) s cílem stanovit mechanické charakteristiky betonu – pevnost v tlaku, modul pružnosti (Tab. 2), stanovit charakteristiky vzduchových pórů a hloubky průsaku a stanovit mrazuvzdornost betonu. Dále bylo nutné u navržených receptur ověřit riziko vzniku příliš vysokých

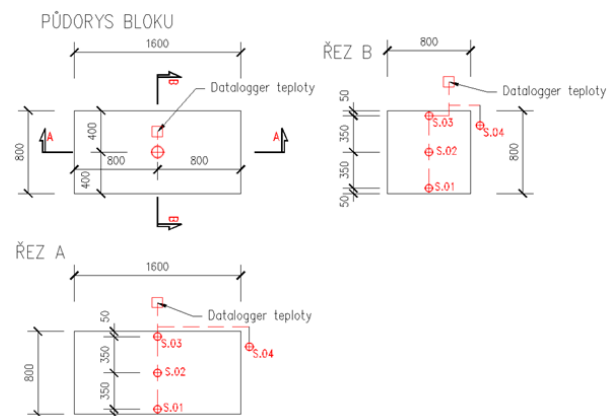
teplot v masivu monolitického betonového tělesa. Proto bylo provedeno měření teplot od hydratačního tepla na zkušebních betonových vzorcích na betonárně v Táboře.

Pro návrh železobetonového masivu bylo nutné ověřit zvolené receptury betonové směsi s ohledem na nově zaváděné typy cementů (CEM II/A-LL 42,5 R Radotín, CEM II/B-S 32,5 R Radotín).

Tabulka 1: Obsah cementu v jednotlivých recepturách

Pevnostní třída betonu:	C 45/55	C 45/55-90d	C 45/55-90d
Číslo receptury:	558448	558448_2	558448_3
Označení receptury:	SMĚS 1	SMĚS 2	SMĚS 3
CEM II/A-LL 42,5 R Radotín kg / m ³	465	0	0
CEM II / B-S 32,5 R Radotín kg / m ³	0	465	405
Microsilika (pytlovaná) kg / m ³	0	0	20

Pro ověření teplot od hydratačního tepla byly zvoleny formy betonových bloků o rozměrech 80×80×160 cm, které simulují masivní betonovou konstrukci (Obr. 4). V řezu tělesa jednotlivých zkušebních betonových bloků byly umístěny 3 ks teplotních čidel. Dále mimo konstrukci bloku bylo umístěno jedno referenční externí čidlo. Teplotní čidla (S.01–S.03) byla upevněna na pomocnou ocelovou trojnožku, která umožnila umístit čidla do požadovaných míst. Jednotlivá čidla byla umístěna dle schématu měřicí sestavy (Obr. 3). Teplotní čidlo (S.04) bylo umístěno v okolním prostředí v trvalém stínu.



Obrázek 3: Zkušební betonové bloky – rozmístění čidel

Pro záznam teploty byl využit Datalogger teploty Testo 176T4 (jeden datalogger má 4 měřící kanály). Záznam hodnot byl ukládán do energeticky nezávislé elektronické paměti. Odečet naměřených hodnot byl prováděn automaticky v intervalu 5 minut. Automatické odečítání teplot v masivu betonové konstrukce bylo ukončeno v době, kdy intenzita vnitřního tepelného zdroje z hydratujícího cementu byla za dosaženým maximem teploty v jádře, kdy z tohoto údobí byl zjištěn průběh tzv. hydratační teploty.

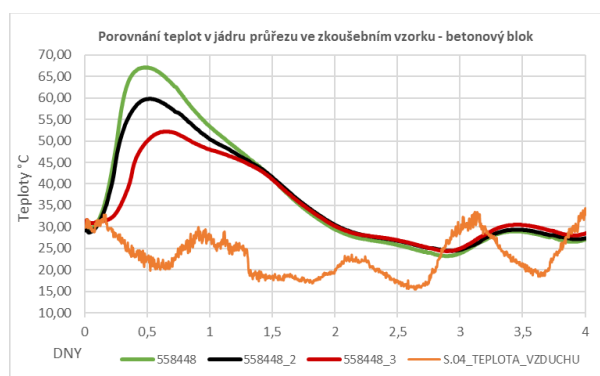


Obrázek 4: Zkušební betonové bloky – po betonáži

3.2. Vyhodnocení naměřených dat betonových bloků

Cílem experimentu bylo porovnání 3 alternativních receptur betonové směsi z hlediska vzniku maximálních teplot v masivu monolitického betonového tělesa a teplotních průběhů v čase. Uvedené hodnoty dávají ucelený přehled o teplotách stanovených na betonových blocích od okamžiku betonáže až do doby ukončení měření (Obr. 5). Betonáž proběhla dne 23.06. 2022. Měření pobíhalo po dobu 7 dní. Průměrná denní teplota okolního prostředí v období měření dosahovala hodnoty 26 °C. Průměrná noční teplota dosahovala hodnoty 20 °C.

Zvolené receptury betonové směsi obsahovaly kombinace různých typů cementů a přísad. Byla ověřena vhodnost nově zaváděných typů cementů (CEM II/A-LL 42,5 R Radotín, CEM II/B-S 32,5 R Radotín). U žádné receptury nebylo dosaženo příliš vysokých teplot, respektive byla splněna podmínka (Správy železnic; TKP Kapitola 17), že nejvyšší teplota nesmí přesáhnout 70 °C. Maximální dosažené teploty u jednotlivých směsí v betonovém vzorku po ukončení betonáže jsou uvedeny jsou v tabulce 2. Přitom teplota čerstvého betonu byla relativně vysoká (cca 30°C.) vzhledem k tomu, že vzorky byly betonovány za nepříznivých (příliš vysokých) teplot prostředí.



Obrázek 5: Porovnání teplot v jádru betonových bloků

Tabulka 2: Charakteristiky betonových směsí

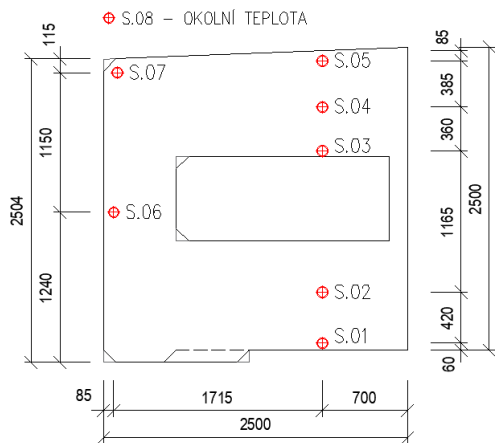
Pevnostní třída betonu	C 45/55	C 45/55-90d	C 45/55-90d	
Číslo receptury:	558448	558448_2	558448_3	
Označení receptury:	SMĚS 1	SMĚS 2	SMĚS 3	
CEM II/A-LL 42,5 R RADOTÍN	kg / m ³ 465	x	x	
CEM II/B-S 32,5 R RADOTÍN	kg / m ³ x	465	405	
Microsilika (pytlovaná)	kg / m ³ x	x	20	
Teplota vzorku betonu	°C	25,5	25,1	29,3
Maximální dosažená teplota	°C	67,2	59,8	52,2
Čas pro dosažení maximální teploty:	hod	13	15	15,5
Krychelná pevnost v tlaku po 2 dnech	MPa	39,7	27,6	23,8
Krychelná pevnost v tlaku po 7 dnech	MPa	x	39,4	37,8
Krychelná pevnost v tlaku po 28 dnech	MPa	63	50,0	51,9
Krychelná pevnost v tlaku po 56 dnech	MPa	x	54,5	56,4
Krychelná pevnost v tlaku po 90 dnech	MPa	x	59,1	61,4
Modul pružnosti po 28 dnech	GPa	35,6	34,0	35,3
Modul pružnosti po 90 dnech	GPa	x	34,9	36,8

Všechny navržené receptury splňují požadavky dle ČSN EN 206+A2, TKP17, ČSN P 73 2404. Z výsledků ověření vlastností betonu vyplývá, že pro návrh monolitického betonového tělesa oblouku železničního mostu z hlediska vzniku vysokých teplot se jeví jako nevhodnější použití směsi 3 (Obr. 5). Použití této receptury však naráží na některé technologické problémy na betonárně. Např. nelze na betonárně zajistit strojové zavedení microsiliky do míchačky apod. Dále u směsi 2 a 3, které obsahují cement CEM II/B-S 32,5 R Radotín nedosahuje beton takového nárůstu pevnosti jako beton s cementem CEM II/A-LL 42,5 R Radotín. Bylo by třeba pevnosti hodnotit až po 90 dnech, což je vzhledem k požadované rychlosti betonáže oblouku pro objednatele nepřijatelné. Proto receptura 1 vyšla pro použití na stavbu oblouku jako nejvhodnější, přestože u ní byly dosaženy nejvyšší teploty. Při výběru byla uvážena i skutečnost, že masivní části oblouku se budou betonovat v zimním období, kdy teploty čerstvého betonu budou podstatně nižší než u vzorků použitých pro porovnání receptur.

Na základě naměřených hodnot se použije pro betonáž zkušební lamely oblouku mostu směs 1 (receptura 558448). U této receptury byla provedena zkouška na zkušební lamele oblouku v měřítku 1:1.

3.3. Kontrolní měření na zkušební lamele

Na základě výsledků provedeného experimentu porovnání 3 alternativních receptur betonové směsi byla provedena dne 10.11.2022 zkouška na zkušebním tělese části oblouku v měřítku 1:1. Měřením byly stanoveny teploty ve vzorku monolitického betonového tělesa oblouku železničního mostu „Červená“ přes VD Orlik. V řezu tělesa bylo umístěno 7 ks teplotních čidel. Dále mimo konstrukci bloku bylo umístěno jedno externí čidlo. Teplotní čidla (S.01–S.07) byla upevněna pomocí elektroizolační pásky, která umožnila oddělení od ocelové konstrukce kotevního koše lamely. Umístění jednotlivých čidel bylo dle schématu měřicí sestavy (Obr. 6). Teplotní čidlo (S.08) bylo umístěno v okolním prostředí v trvalém stínu.



Obrázek 6: Zkušební lamela – rozmístění čidel

Pro záznam teploty byl využit Datalogger Testo 176T4 (jeden datalogger má 4 měřicí kanály). Záznam hodnot byl ukládán do energeticky nezávislé elektronické paměti. Odečet naměřených hodnot byl prováděn automaticky v intervalu 5 minut. Automatické odečítání teplot v masivu betonové konstrukce bylo ukončeno v době, kdy intenzita vnitřního tepelného zdroje z hydratujícího cementu byla za dosaženým maximum teploty v jádře, kdy z tohoto údobí bylo zjištěn průběh tzv. hydratační teploty.

Pro betonáž zkušební fyzikálního modelu byl použit beton C45/55 (směs 1; číslo receptury 558448), který obsahoval cement CEM II/A-LL 42,5 R Radotín. Celkové navržené množství cementu v betonové směsi činí 465 kg/m³.



Obrázek 7: Zkušební lamela po odbednění

3.4. Vyhodnocení naměřených dat zkušební lamely

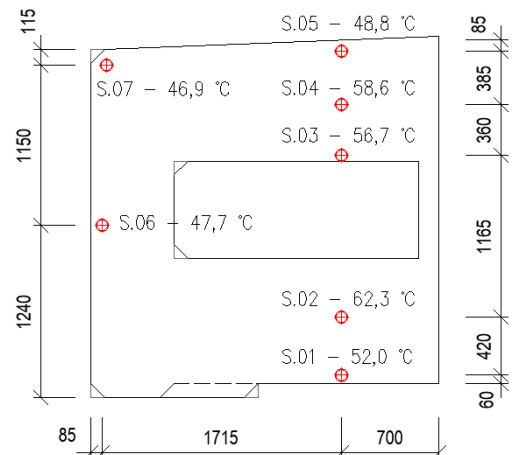
Měřením teplot ve zkušební lamelě se prokázalo, že maximální teplota dosažená v jádře průřezu dosáhla 62,3 °C. Tím byla splněna podmínka, že nejvyšší teplota nesmí přesáhnout 70 °C (SŽ, TKP Kapitola 17). Maximální hodnota byla dosažena v čase 33 hodin po ukončení betonáže (Tab. 3). Obr. 9 znázorňuje průběhy teplot jednotlivých čidel (S.01–S.08), které byly umístěny ve zkušební lamelě (Obr. 6) od okamžiku betonáže až do doby ukončení měření.

Obnednění zkušební lamely proběhlo 4 den od ukončení betonáže. Krátce po odbednění zkušební lamely byl naměřen největší teplotní rozdíl mezi čidlem S.02 a S.07, který dosáhl 25,4 °C (Obr. 10).

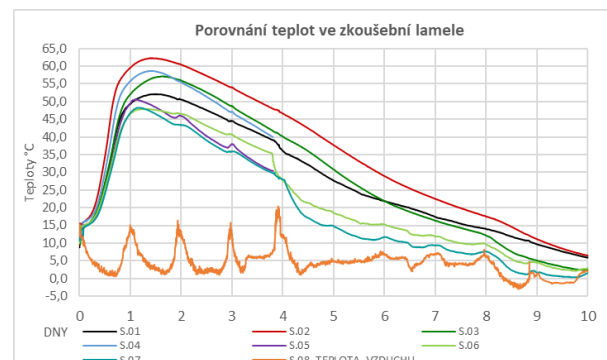
Dále byla v rámci betonáže zkušební lamely ověřena pevnost betonu v tlaku (Obr. 11) a modul pružnosti v čase (Obr. 12).

Tabulka 3: Základní naměřené výsledky

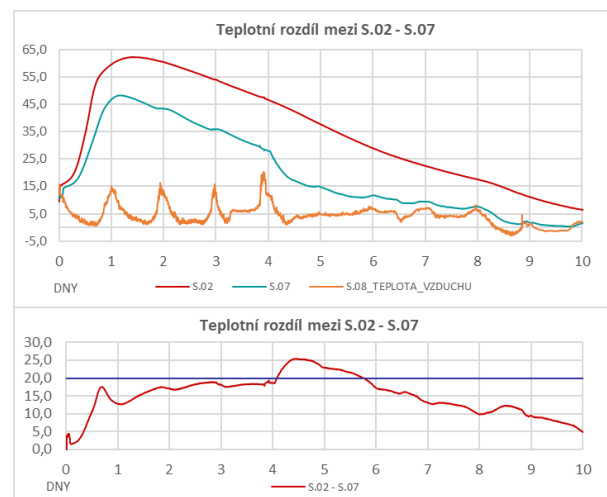
Pevnostní třída betonu:	C 45/55	
Číslo receptury:	558448	
Označení receptury:	SMĚS 1	
CEM II/A-LL 42,5 R Radotín	kg / m ³	465
Čas pro dosažení maximální teploty	hod	33
Průměrná teplota čerstvého betonu	°C	15
Maximální dosažená teplota	°C	62,3



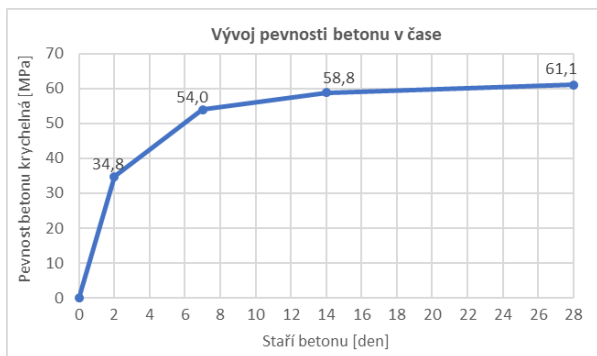
Obrázek 8: Teploty v jednotlivých čidlech max. (čidlo S.02)



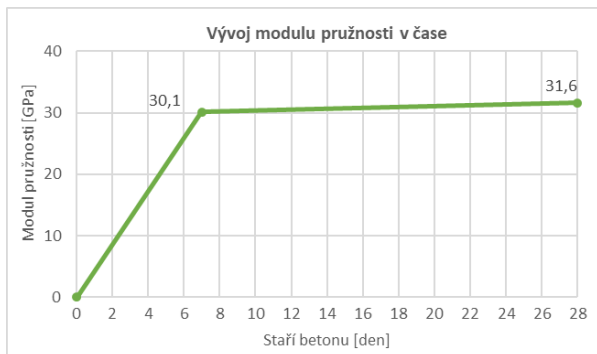
Obrázek 9: Teploty betonu jednotlivých čidel v čase



Obrázek 10: Naměřený teplotní rozdíl v čidlech S.02 a S.07



Obrázek 11: Krychlelná pevnost betonu zkušební lamely



Obrázek 12: Modul pružnosti betonu zkušební lamely

4. ZÁVĚR

Byly vyhodnoceny 3 receptury betonu třídy C45/55 určeného pro betonáž oblouku. Výsledky měření teplot od vývinu hydratačního tepla byly porovnány. Po uvážení technických technologických a klimatických podmínek betonáže oblouku byla vybrána receptura použitelná pro betonáž oblouku.

U zvolené receptury betonové směsi byla ověřena technologie betonáže na vzorku 1:1, včetně ověření maximální teploty betonu vlivem hydratačního tepla. Uvedené hodnoty dávají ucelený přehled o teplotách v masivu zkušebního betonového tělesa oblouku (lamely) mostu od okamžiku betonáže až do doby ukončení měření. Zvolená receptura betonové směsi obsahuje portlandský cement s vápencem (CEM II/A-LL 42,5 R Radotín). Celkové použité množství cementu v betonové směsi činí 465 kg/m^3 .

Na základě provedených experimentů, kde byly zhodnoceny 3 receptury se vybrala betonová směs, která vyhovuje po stránce technické, technologické i logistické. Za podmínek betonáže oblouku budou tak rizika vzniku vysokých teplot v oblouku minimalizována.

Poděkování

V článku byly částečně využity výsledky projektu SGS Číslo grantu: SGS22/035/OHK1/1T/11

Literatura

Görringer, J., *Rekonstrukce mostu v km 41,791 trati Tábor – Písek. Technická zpráva*. SUDOP PRAHA, 2019.