

REDUKCE TEPLOTNÍHO ZATÍŽENÍ KONSTRUKCÍ POMOCÍ MÍSTNÍCH HISTORICKÝCH DAT

Adam Froněk, *

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

ABSTRAKT

Předmětem článku je postup uvážený pro úpravu teplotního zatížení na základě historického měření teplot v blízkosti lokality stavby. Cílem je přesnější vyhodnocení místních klimatických podmínek pro redukci vnějšího teplotního zatížení a návrh hospodárnější konstrukce. Pro soubory získaných teplot mezi lety 1961 až 2022 byly uváženy základní metody popisné statistiky a lineární regrese. V rámci vhodného použití pro návrh konstrukcí, byla na základě těchto dat vytvořena predikce vývoje teploty pro následujících 100 let. Postup je diskutován pro rovnoměrnou složku teploty pro mostní konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

teplotní zatížení • klimatická změna • mostní konstrukce • statistika

ABSTRACT

The paper describes the possibilities of adjusting thermal actions based on historical data at the structure location. The aim is to reduce thermal actions by considering local climatic conditions, leading to economic design. Methods of descriptive statistics and linear regression were used on statistical data for the period from 1961 to 2022. Predictions were made for the following 100 years in order to achieve appropriate loads for bridges. Load reduction is applied to a uniform temperature component for bridge structures.

KEYWORDS

thermal actions • climate change • bridge structures • statistics

1. ÚVOD

Pro určité typy stavebních konstrukcí mohou být teplotní změny dominantním nebo zásadním proměnným zatížením, což může vést ke komplikacím při jejich dimenzování. Zatížení od teploty je nesilové, tedy úpravou tuhosti konstrukce nemusíme dosáhnout hledaného řešení, a je nutné sáhnout do statického uspořádání, aby se konstrukce stala dimenzovatelnou. Obecně lze říci, že kritické stavby pro teplotní zatížení jsou buď velmi tuhé konstrukce nebo například geometricky složité konstrukce, kdy vzájemné přetvoření jednotlivých částí nosné konstrukce může vyvolat významné silové účinky. Pod mostními stavbami si lze představit rámové nebo obloukové konstrukce.

Teplotní zatížení se dle Eurokódu (ČSN EN 1991-1-5 (73 0035) 5/2005) odvozuje na základě regionálních podmínek a typu konstrukce. Vstupními daty pro rovnoměrnou složku teploty jsou maximální a minimální hodnoty, a výchozí teplota při zabudování konstrukce. Eurokód připouští použití vstupních hodnot na základě místních meteorologických dat a národní příloha přímo definuje Český hydrometeorologický ústav jako zdroj těchto informací.

2. POSTUP VYHODNOCENÍ

Velikost teplotního rozdílu pro rovnoměrnou složku teploty lze vyjádřit následujícím způsobem.

$$\Delta T_{min} = T_0 - (T_{min} + X_{min}) \quad (1)$$

$$\Delta T_{max} = (T_{max} + X_{max}) - T_0 \quad (2)$$

Hodnoty X_{min} a X_{max} se stanovují na základě typu a materiálu konstrukce a nejsou v rámci příspěvku diskutovány. Ostatní hodnoty jsou závislé na klimatických podmínkách a jsou předmětem tohoto příspěvku. Slovně vyjádřeno se teplotní zatížení stanoví jako vzdálenost extrémní hodnoty k teplotě při zabudování.

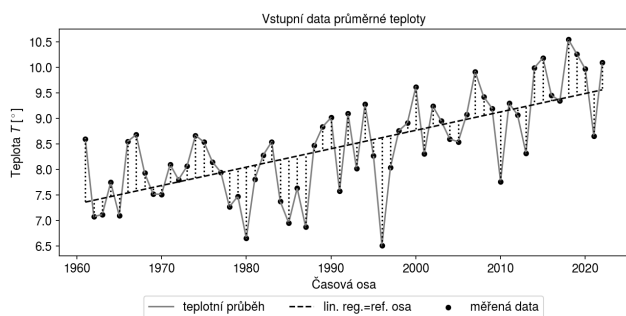
Vstupní data byla převzata z Českého hydrometeorologického ústavu (2023), pro měřicí stanici pražského Klementina. Minimální (T_{min}) a maximální (T_{max}) hodnoty byly převzaty z měsíčních hodnot a průměrná teplota (T_0) byla převzata z denních dat. Všechna měření jsou veřejně k dispozici, a to za období 1961-2022.

Postup zpracování vstupních dat (průměrné, minimální, maximální) je obdobný pro všechny datové soubory. Nejprve jsou data upravena pro vyřazení časové závislosti vývoje teploty. Následně jsou vyřazena odlehlá pozorování a vytvořen trend teploty na těchto upravených datech.

2.1. Průměrná teplota

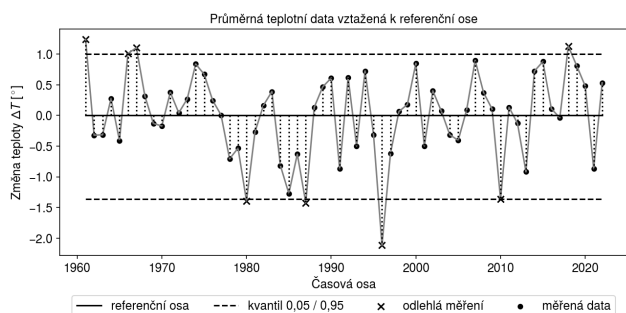
Hodnota zabudování T_0 byla postupně určena jako měsíční průměr z denních hodnot a z nich následně roční průměr. Nejprve byl průběh proložen pomocí lineární regrese. Tím byl naznačen prvotní trend teploty, který sloužil jako referenční osa.

* Supervisor: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEEng.



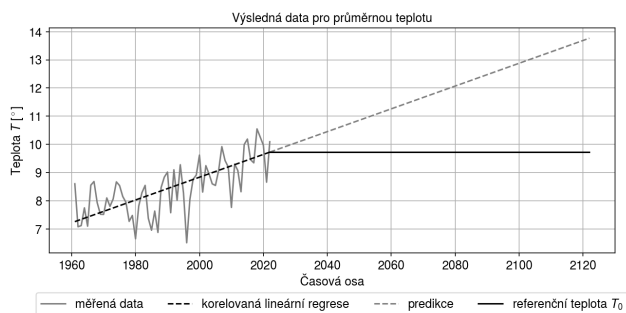
Obrázek 1: Vstupní data průměrné teploty.

Naměřené hodnoty byly odečteny od tohoto průběhu, čímž byla data zredukována o časovou závislost. Referenční průběh průměrné teploty byl následně redukován o 95%, resp. 5%, kvantil reprezentující odlehlá měření.



Obrázek 2: Průměrná teplotní data vztažená k referenční ose.

Redukovaná data o odlehlá měření byla vrácena do původní polohy, čímž byla vrácena časová závislost, a data byla opět proložena lineární regresí.



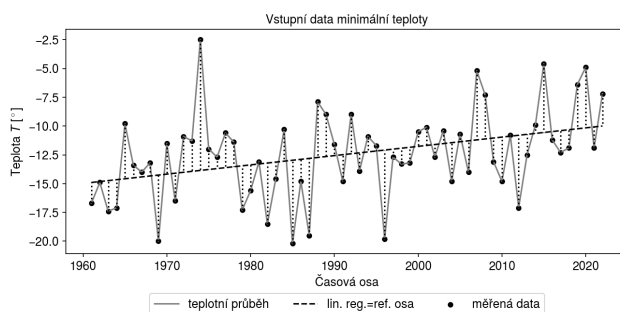
Obrázek 3: Výsledná data pro průměrnou teplotu.

Průběh byl ověřen i pro křivky vyšších řádů, ale lineární průběh se ukázal jako nejvíce odpovídající. Lineární růst teploty přibližně odpovídá nárůstu 1°C za 25 let. Teplotní trend byl extrapolován o následujících 100 let, tj. do roku 2122, nicméně extrapolace do teplotního zatížení nevstupuje a je pouze informativní.

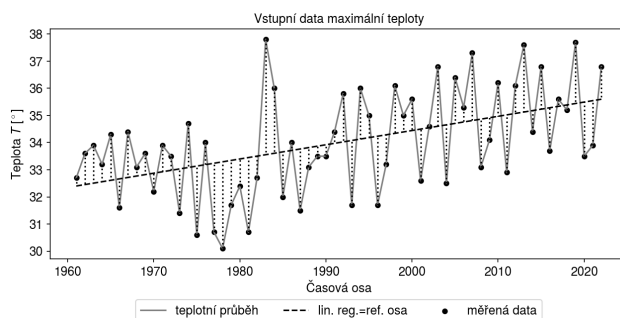
Při extrapolaci tohoto trendu až do konce století se dostaneme na hodnotu nárůstu 3,1°C, to se shoduje s hodnotou 3,2°C, kterou uvádí *The Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC 2023*. Tím se potvrdilo použití lineárního průběhu jako vhodně zvolené, s přihlédnutím ke klimatickému trendu v celosvětovém měřítku.

2.2. Teplotní extrém

Minimální a maximální teploty byly určeny obdobným postupem. Nejprve proložením měřených dat lineární regresí.

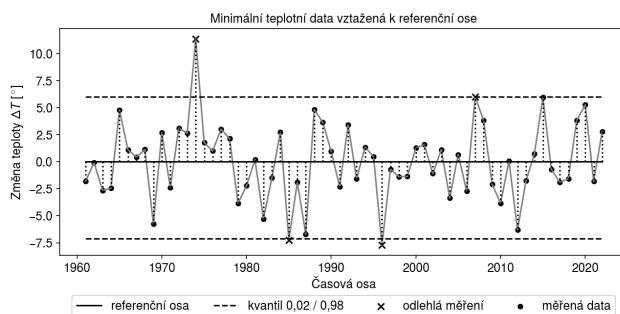


Obrázek 4: Vstupní data minimální teploty.

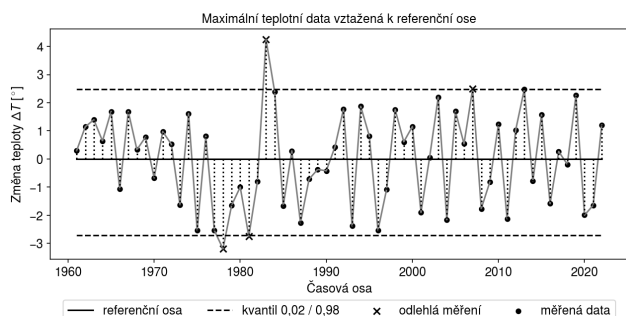


Obrázek 5: Vstupní data maximální teploty.

Data byla odečtena od referenční osy a byla vyražena odlehlá měření. Vybraný kvantil klimatických jevů se dle ČSN EN 1990 ed. 2 (73 0002) 2/2021 a ČSN EN 1991-1-5 (73 0035) 5/2005 uvažuje 0,02 (doba návratu 50 let).

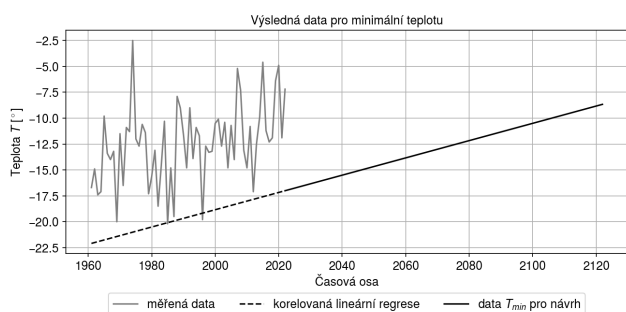


Obrázek 6: Minimální teplotní data vztažená k referenční ose.

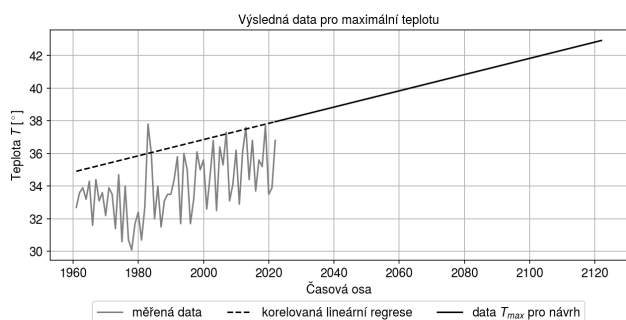


Obrázek 7: Maximální teplotní data vztažená k referenční ose.

Data, po vyřazení mimo kvantilového rozpětí, nebyla extrapolována ve střední hodnotě, ale v místě extrémní kvantilové hodnoty s odpovídajícím sklonem průběhu podle mezikvantilových dat. Jinak řečeno byla vrácena časová závislost v místě 2%, resp. 98%, kvantilu.



Obrázek 8: Výsledná data pro minimální teplotu.



Obrázek 9: Výsledná data pro maximální teplotu.

3. VÝSLEDNÉ HODNOTY PRO NÁVRH

Pro vyhodnocení postupu byly, pro shodné okrajové podmínky (lokalita Praha), určeny teploty dle Eurokódu. Porovnání obsahuje pouze klimatické vlivy pro určení rovnoměrné složky teploty a nezahrnuje vliv typu konstrukce.

Tabulka 1: Teploty dle Eurokódu.

T [°C]	T_{EC}	ΔT_{EC}
T_{min}	-32	-42
T_0	10	–
T_{max}	40	32

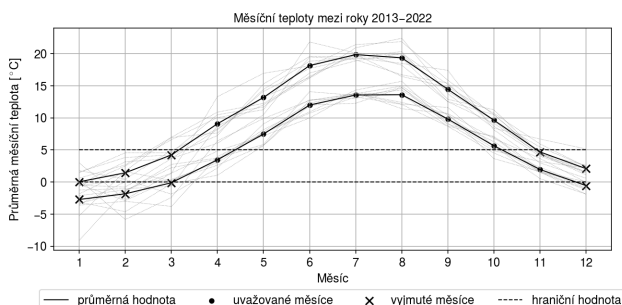
Výsledné teploty na základě historických dat jsou v následující tabulce.

Tabulka 2: Vyhodnocené teploty dle historických dat.

T [°C]	T_{2022}	T_{2122}	ΔT_{2022}	ΔT_{2122}
T_{min}	-17,0	-8,7	-26,7	-18,4
T_0	9,7	–	–	–
T_{max}	37,9	42,9	28,2	33,2

Při prvotním pohledu na výsledky, je teplotní rozdíl od ochlazení v Eurokódu s velkou rezervou (redukce o 36%). Jelikož cílem tohoto vyhodnocení je zpřesnění teplotního zatížení, byly pro zachování bezpečnosti při použití v návrhu, uváženy i scénáře, kdy doba zabudování konstrukce (vliv na teplotu T_0), je mimo zimní měsíce.

Proces výběru měsíců uvažovaných pro osazení konstrukce byl založen na výběru měsíčních dat mezi roky 2013–2022. Z pohledu betonových konstrukcí jsou určité limity povrchu betonu, dle ČSN EN 206+A2 (73 2403) 10/2021 a ČSN EN 13670 (73 2400) 6/2010, +5°C a 0°C. Tyto limity byly využity pro vyřazení zimních měsíců. Kritérium pro vyřazení průměrné teploty bylo +5°C a pro minimální teplotu 0°C.



Obrázek 10: Měsíční teploty mezi roky 2013–2022.

Proces měření, případně zajištění, teploty betonového povrchu je technologickou záležitostí, která není v kompetenci projektanta, ale teplotní limity lze považovat za dobré orientační hodnoty. Vyřazení měsíčních hodnot rozhodně neříká nic o kalendářním rozvržení stavebních prací, ale pouze to vyjímá klimatické podmínky nevhodné pro betonáž.

Výsledné rozsahy pro průměrnou teplotu jsou v období od dubna do října, pro minimální teplotu od dubna do listopadu. Doplnkově byly uváženy i tři měsíce od června do srpna, pro zohlednění provádění v letních měsících.

Tabulka 3: Absolutní výsledky pro měsíční rozsahy.

	EC	ČHMÚ ^a	ČHMÚ ^b	ČHMÚ ^c	ČHMÚ ^d
T_0	10	9,7	12,7	15,1	19,7
ΔT_{min}	-42	-26,7	-29,7	-32,1	-36,7
ΔT_{max}	30	33,2	30,2	27,8	19,3

^ateplotní průměr pro celý rok^bteplotní průměr pro období duben–listopad^cteplotní průměr pro období duben–říjen^dteplotní průměr pro období červen–srpen

Tabulka 4: Relativní výsledky pro měsíční rozsahy.

	EC	ČHMÚ ^a	ČHMÚ ^b	ČHMÚ ^c	ČHMÚ ^d
T_0	1,00	0,97	1,27	1,51	1,97
ΔT_{min}	1,00	0,64	0,71	0,76	0,87
ΔT_{max}	1,00	1,11	1,01	0,93	0,64

^ateplotní průměr pro celý rok^bteplotní průměr pro období březen–říjen^cteplotní průměr pro období duben–listopad^dteplotní průměr pro období červenec–srpen

Shodná hodnota průměrné teploty dle Eurokódu a vyhodnocení historických měření pro rozsah celého roku jsou dobrým prvotním ukazatelem validnosti postupu. Nicméně velikost oteplení pro rozsah celého roku je poměrně znepokojující, jelikož hodnota překračuje normovou hodnotu zatížení o 11%.

Uvážení průměrné roční teploty by bylo, z pohledu technologických možností betonážních prací za velmi chladného počasí, velmi konzervativní. Oteplení na redukované stavební sezóně dává zatížení odpovídající normě. Extrémní hodnota pro ochlazení nedosáhla hodnoty dle Eurokódu pro žádný rozsah definující teplotu při zabudování.

K rozdílu extrémních hodnot (oteplení +11%, ochlazení -13%), se částečně odkazuje i ČSN EN 1991-1-5 (73 0035) 5/2005, příloha A, kdy v městských aglomeracích lze očekávat vyšší minima teplot.

Zároveň, časový trend teplot ukazuje na rychlejší nárůst minimální teplot (minimální teplota +1 °C za 12 let, maximální teplota +1 °C za 20 let), a i s ohledem na změny klimatu a prediktivní modely vývoje teploty planety (IPCC 2023), je výrazný pokles teplot v zimních měsících nepravděpodobný.

4. ZÁVĚR

Vyhodnocení teplot na základě historických dat ukazuje nadhodnocení zatížení pro ochlazení konstrukce, a to i pro případy uvážení betonáže v letních měsících. Určení teplotního zatížení na základě místních klimatických podmínek se ukázalo jako hospodárné. Obecně teplotní měření poukazují na vyšší teploty extrémních složek, což je může být ovlivněno městskou aglomerací a obecnou klimatickou změnou, která je z dat velmi patrná. Pozornost si zaslouží velikost maximálních teplot, která pro nejméně příznivý uvažovaný rozsah překročila normovou hodnotu. Při uvážení redukce osazení konstrukce mimo zimní měsíce se oteplení shoduje s normovou hodnotou a velikost ochlazení přináší úsporu 24%. V takovém případě jsou oteplení a ochlazení přibližně shodná, a to s hodnotou 30 °C.

Soubor dat pro časový rozsah za posledních 61 let se nemusí, ze statistického hlediska, jevit jako dostatečný pro nalezení výsledků pro dobu návratu 50 let, nicméně výsledky potvrzují časovou shodu s uvažovaným předpisem pro teplotní zatížení konstrukcí i celosvětovou predikcí vývoje teploty.

Je dobré připomenout, že celé porovnání mezi průběhem historických měření a normou pro navrhování, bylo určeno pro teploty z Klementina, tedy historické centrum Prahy, a výsledky nelze obecně aplikovat pro jiné lokality, ale stejným postupem lze pro místní soubor historických dat snížit uvažované teplotní zatížení na posuzované konstrukci. Zároveň konkrétní lokalita stavby může, mimo husté zástavby, obsahovat další okrajové podmínky, které mohou mít vliv na teplotní působení, jako je blízkost vodních toků nebo směr slunečního svitu, na které je dobré myslet při návrhu.

Jelikož změna klimatu a globální oteplování jsou z principu časově proměnné záležitosti, je dobré tyto vlivy sledovat nejen ze společenského hlediska, s ohledem na snižování na uhlíkové stopy, ale jak tento příspěvek ukazuje, tak i z pohledu hospodárnosti a bezpečnosti posouzení konstrukcí jako takových.

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Michalovi Drahorádovi, PhD. za konzultace na tématu.

Článek vznikl za podpory SGS OHK1-027/24 *Moderní cementové kompozity a jejich efektivní použití v konstrukcích*.

Reference

- ČSN EN 13670 (73 2400) (6/2010). *Provádění betonových konstrukcí*. vč. Opr.1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 1990 ed. 2 (73 0002) (2/2021). *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 1991-1-5 (73 0035) (5/2005). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou*. vč. změny Z2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 206+A2 (73 2403) (10/2021). *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- Historická data* (2023). *Praha, Klementinum*. Český hydrometeorologický ústav. URL: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zakladni-informace>.
- IPCC (2023). *Climate Change 2023. Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)] Geneva, Switzerland: IPCC. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.