

Josef ALDORF<sup>1</sup>, Lukáš ĎURIŠ<sup>2</sup>, Eva HRUBEŠOVÁ<sup>3</sup>, Karel VOJTASÍK<sup>4</sup>, Jiří GÉRYK<sup>5</sup>

## ZMĚNY A SLEDOVÁNÍ TEPLIT V DOPRAVNÍCH TUNELECH

### Abstrakt

Teplotní zatížení tunelového ostění je nedílnou součástí každého statického výpočtu. Sledováním těchto teplotních změn, bylo prokázáno že je potřeba v určité míře s tímto zatížením počítat. V příspěvku je několik příkladů sledování teplotních změn na dálničních tunelech a aplikace výsledků měření do výpočtu zatížení tunelového ostění.

### 1 ÚVOD

Navrhování definitivních ostění ražených tunelů je složitý úkol. Statické působení závisí na interakci tunelového ostění s horninovým masivem a zatížení je závislé na tuhosti ostění, velikosti výrubu, geotechnických podmínkách, postupu výstavby a v neposlední řadě na klimatických podmínkách.

Vzhledem k dopravnímu významu tunelů není možné připouštět jakékoliv výluky nebo jiná omezení provozu. Návrh ostění proto musí být bezpečný, rovněž ekonomický a zároveň musí splňovat nejvyšší požadavky na užitné vlastnosti po celou dobu životnosti díla. Zkušenosti s dlouhodobou funkcí a skutečným namáháním jsou však ve světě různé, a proto je třeba ověřit tyto skutečnosti v českých podmínkách.

Předmětem příspěvku je zejména prezentovat možnosti návrhu teplotního zatížení v závislosti na výsledcích měření v tunelech postavených v ČR a uvést některá doporučení získaná na základě provedených měření.

### 2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A STANOVENÍ VELIKOSTÍ VNITŘNÍCH SIL OD TEPLITNÍHO ZATÍŽENÍ

Naprostá většina tunelů budovaných v posledních letech v České republice je ražena Novou rakouskou tunelovací metodou (NRTM). Jednou ze zásad této metody je budování primární a sekundární obezdívky, mezi které se vkládá izolace proti vodě. Primární ostění se buduje při samotné ražbě tunelu a jeho hlavní úlohou je zajistit bezpečnou ražbu a vytvořit prostor pro zbudování definitivní (sekundární) obezdívky. Primární čištění je tvořeno zejména stříkaným betonem, který je doplněn ocelovou výztuží (rámy, sítě) a kotvami. Sekundární část tunelového ostění je tvořena monolitickým betonem ať už vyztuženým nebo prostým. Monolitický beton je ukládán do formy, která tvaruje příslušný tunelový průřez. Správné navržení ostění je poměrně složité, vzhledem k velkému množství vlivů (zatěžovacích stavů a jejich kombinací), působících na konstrukci. Jedním

<sup>1</sup> Prof. Ing. Josef Aldorf, DrSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875, Ostrava-Poruba, tel.: +420 597 321 944, e-mail: josef.aldorf@vsb.cz.

<sup>2</sup> Ing. Lukáš Ďuriš, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875, Ostrava-Poruba, tel.: +420 597 321 948, e-mail: lukas.duris@vsb.cz.

<sup>3</sup> Doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875, Ostrava-Poruba, tel.: +420 597 321 373, e-mail: eva.hrubesova@vsb.cz.

<sup>4</sup> Doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875, Ostrava-Poruba, tel.: +420 597 321 947, e-mail: karel.vojtasik@vsb.cz.

<sup>5</sup> Inset s.r.o., Rudná 21, 700 30 Ostrava, e-mail: geryk.jiri@inset.com

z vnějších vlivů jsou změny teplot, které reagují na klimatické podmínky vně tunelu. Pro sledování chování ostění v závislosti na těchto změnách se osazují do nově budovaných tunelových staveb měřicí čidla, která nám umožňují sledovat tyto změny. Jedním z těchto tunelů je nově otevřený tunel Klimkovice. Stavba se nachází na trase dálnice D47 v blízkosti města Klimkovice. Výstavba tunelu zde byla zvolena z důvodu ochrany města a přilehlých léčebných lázní. Délka tunelu je 1080 m a je tvořen dvěma samostatnými tunely pro každý směr jízdy, které jsou propojeny pěti tunelovými spojkami. V průběhu výstavby sekundárního ostění byla instalována měřidla teploty horninového masívu a následně do sekundárního ostění tunelu zabudovány vibrační snímače deformací a teploty. Snímače byly osazovány ve dvou tunelových pásech – měřicích profilech. V každém profilu bylo použito 12 kusů těchto snímačů. Snímače byly rozmístěny do třech poloh a v každé poloze byly osazeny k hornímu a spodnímu okraji výztuže, ve směru radiálním a tangenciálním. Dále bylo v každém měřicím profilu ještě osazeno čidlo pro měření teploty vzduchu v tunelu (obr. č. 1). Včasným osazením měřidel bylo získáno velké množství dat, jako např. vývoj teplot během betonáže a nárůst hydratačního tepla betonu. Měřicí profily byly zvoleny ve vzdálenosti cca 120 m. Jeden profil byl v blízkosti portálu a druhý v místě s nejvyšším nadložím ve vzdálenosti cca 52 m od portálu.

Při návrhu definitivního ostění je dnes již zcela standardně využíváno prostředků moderní výpočetní techniky. Vnitřní síly a deformace ostění se počítají pomocí numerických modelů metodou konečných prvků, kde je simulováno celé horninové prostředí včetně postupu ražeb a etapy vložení jak primárního, tak i sekundárního ostění. Statické výpočty se provádějí především v místech nejneprůzračněji zatížených profilů se zohledněním mnoha zatěžovacích stavů a jejich kombinací, zejména pak:

vlastní tíhy

konstrukce geostatického zatížení horninovým prostředím

zatížení hydrostatickým tlakem podzemní vody (v případě uzavřené izolace)

smršťováním a dotvarováním betonu definitivního ostění

vlivu teploty (ochlazení/oteplení)

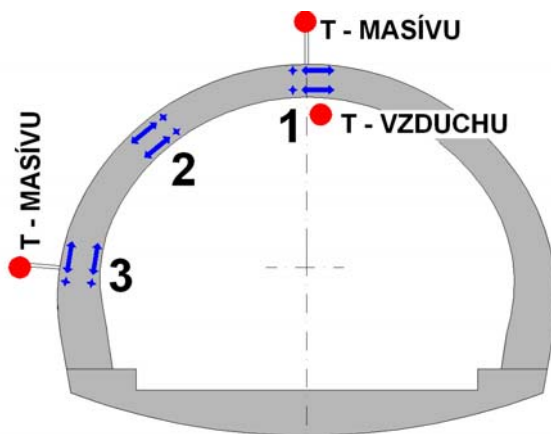
technologickým zatížením, atd.

V České republice jsou nejvíce využívány hodnoty teplotních diferencí vnějšího a vnitřního líce ostění podle německé drážní směrnice DS 853. Na obr. č. 3 jsou zaznamenány letní a zimní rozdíly teplot v ostění pro úseky tunelu 200 m a více od portálu (označ. norma), což zhruba odpovídá většině sledovaných měřicích profilů. Z průběhů statisticky vyhodnocených měření teplot po tloušťce ostění od povrchové teploty po teplotu vnějšího líce dále vyplývá skutečnost, že průběh teplot zdaleka nemá lineární charakter. Naopak střídavé oteplování a ochlazování betonu se projevuje zejména v povrchové vrstvě ostění, zatímco části vzdálenější od povrchu již podléhají menším rozdílům teplot. Naměřené hodnoty se v převážné míře blíží krajním hodnotám s označením II na obr. 2.

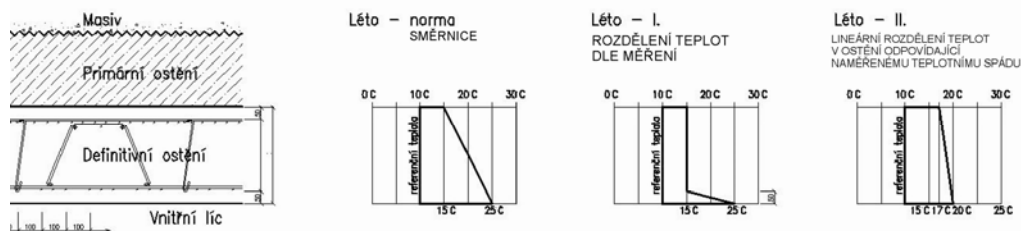
Při měření v tunelu Klimkovice byly vysledovány průběhy maximálních teplot (letní teploty v období) v měřicím profilu vzdáleném 52 m od portálu. Při zhruba týdenímu teplotním nadprůměru byly pozorovány změny teplot v hornině téměř konstatní ve výši cca 16°C. Dále měření ukázalo, že v ostění se teploty při vnějším povrchu chovaly stejně ve všech třech měřených bodech. Rozdíl mezi jednotlivými teplotami v různých úrovních byly v řádech desetin °C, přičemž nejtepleji bylo ve vrcholu klenby. Větší rozdíly teplot jsou na rubové části ostění kde rozdíly v jednotlivých úrovních jsou již větší. Teplota na rubu ostění ve vrcholu dosahuje přibližně stejné teploty jako na lícovém povrchu na nejnižší úrovni. Teplota vzduchu v tunelu významně kolísá a v rozmezí během 24 hodiny zaznamenaná změna až 5 °C. Rozdíl teplot vzduchu v části portálu a uvnitř tunelu nezaznamenává větších rozdílů. Uvnitř tunelu se vzduch ochladí cca o 1°C. Maximální naměřený rozdíl mezi teplotou na vnitřním a vnějším povrchu nepřesahuje 2-3° C, což se významně odchyluje od doporučení směrnice pro letní období. Z měřených dat byly sestaveny matematické modely pro dvě různá teplotní zatížení.

Při výpočtu bylo využito programového systému CESAR – LCPC, 2D modul. Modelování bylo prováděno pomocí metody konečných prvků na modelu ostění tunelu Klimkovice. Při modelování se tunel diskretizoval symetricky, pouze jednou plovinou průřezu. Do geometrie modelu byla zahrnuta i protiklenba a vozovka. Klenba tunelu byla proměnlivé tloušťky od 35 cm ve vrcholu klenby, v místě napojení na obslužný chodník je šířka klenby 60 cm. Sekundární ostění bylo přesně rozděleno na několik částí. Vzhledem ke srovnání výsledku bylo teplotní zatížení definováno předepsanou teplotou dle normy (směrnice DS 853) a dle výsledků měření. Hodnoty teploty byly zadávány 5 cm od vnějšího a 5 cm od vnitřního povrchu ostění. Jako referenční teplota byla zvolena teplota masívu 16°C. Systém neumožňuje zadávat proměnné teploty v čase, tak jak tomu ve skutečnosti je, kdy se teploty v tunelu neustále mění během 24 hodin v závislosti na venkovní teplotě (den a noc). Pro zatížení byly použity konstantní hodnoty a výpočet proběhl ve 24 krocích s intervalem 3600 s. Během této doby se teploty ustavily v průřezu v závislosti na zadaných hodnotách, viz obrázek č. . Pro měřené hodnoty se maximální teplota zatížení lince sekundáru stanovila na 23°C a rub sekundáru na 20°C. Rozdělení teplot v průřezech je patrné z obr. č. 4. Teplota venkovního vzduchu zde nebyla uvažována. Toto rozdělení teplot v klenbě bylo načteno ze souboru do modelu umožňující výpočet napětí a deformací klenby, ale také vnitřních sil v klenbě.

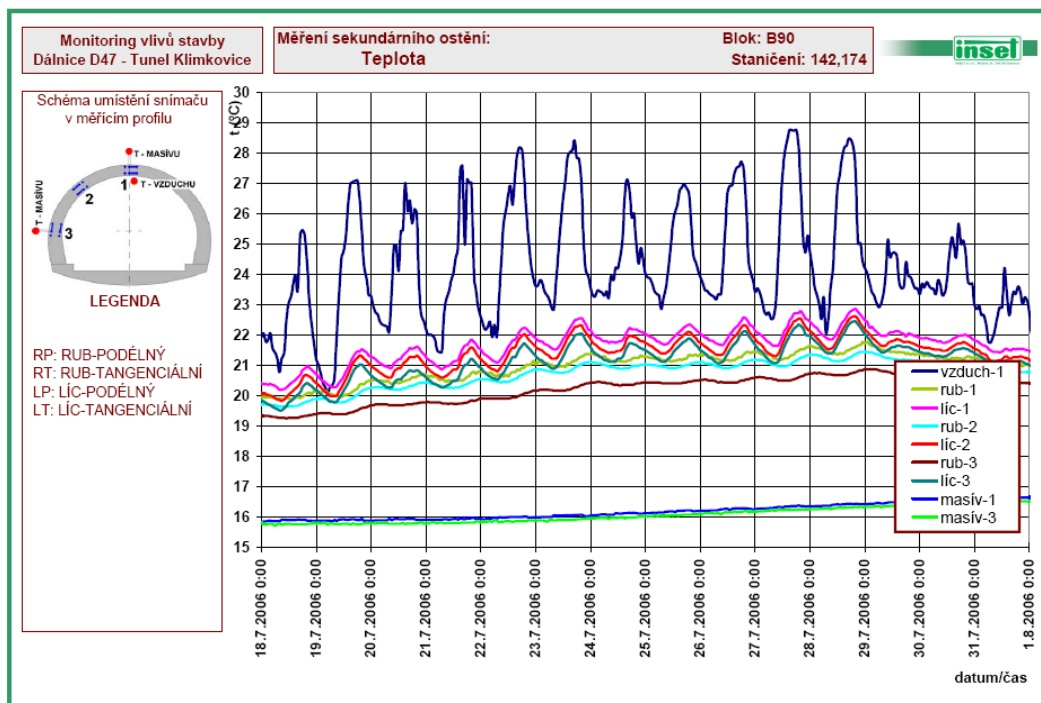
Při porovnání výsledků předepsaných v německé směrnici, kdy teplotní spád je 10°C a měřených teplotách se spádem 3°C bylo zjištěno, že ohybové momenty se snížily v průměru až o 66% , normálové síly se naopak zvýšily v průměru o 40%, obr. č. 5 a 6 . Hodnoty deformací jsou v řádech desetin milimetrů. Výsledky měření prokazují, že nejvíce namáhána teplotními změnami, je lícová část ostění a průběh teplot v průřezu není tak velký, jak předepisuje německá směrnice.



Obr. 1

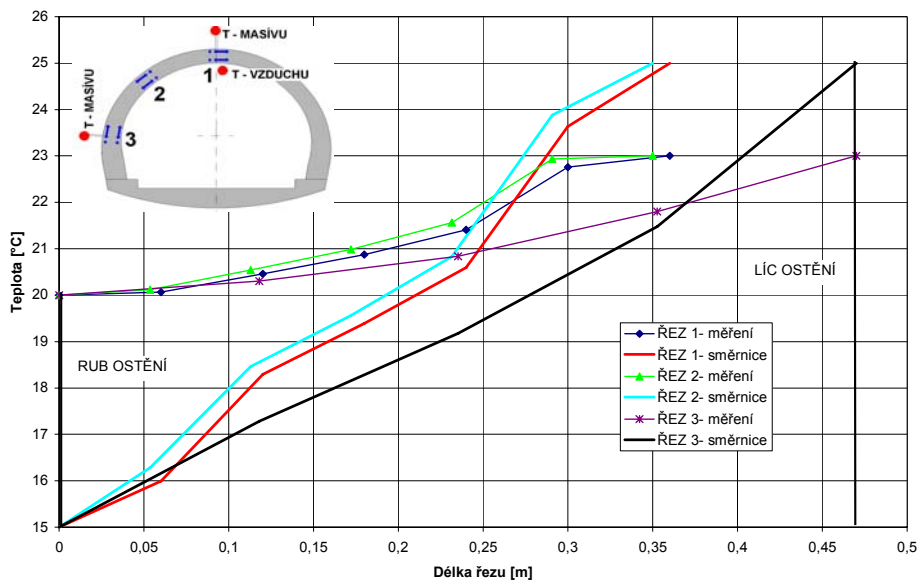


Obr. 2



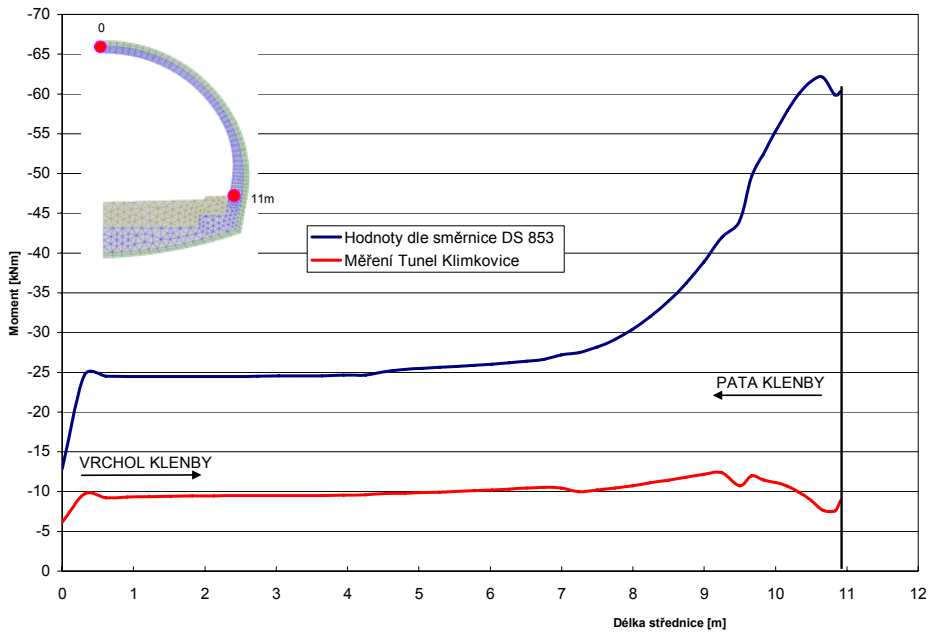
Obr. 3

Průběhy teplot v řezech tunelovým ostěním pro různá zatížení



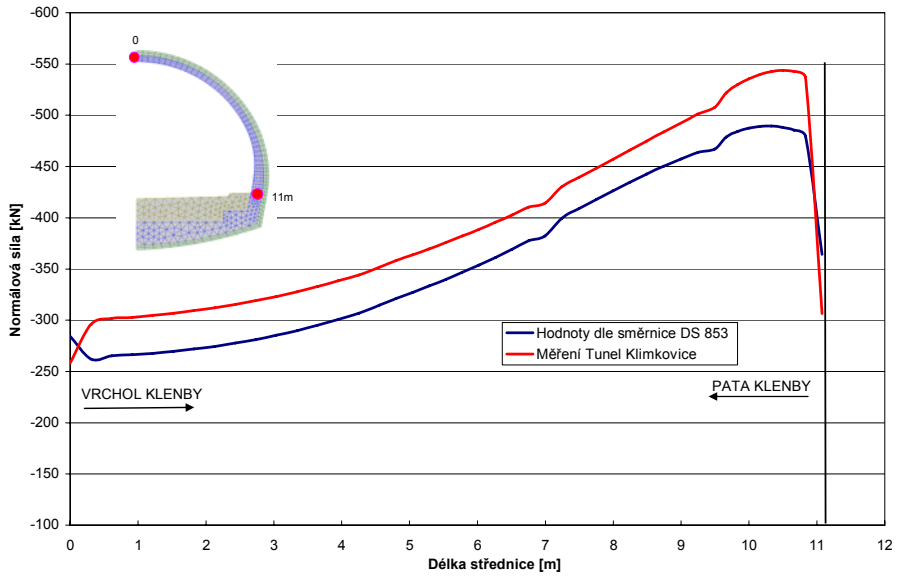
Obr. 4

Průběhy ohybových momentů na střednici sekundárního ostění pro různá teplotní zatížení



Obr. 5

Průběhy normálových sil na střednici sekundárního ostění pro různá teplotní zatížení



Obr. 6

### 3 ZÁVĚR

Z naměřených hodnot max. letních teplot byly stanoveny hodnoty vnitřních sil, které potvrzují že:

- rozdíly vnitřních a vnějších teplot v letním období v ostění zdaleka nedosahují hodnot uváděných směrnicí DS 853 a směrnicí uvažované teplotní zatížení není reálné, vede k přecenění vlivu teplotních zatížení a zvýšení spotřeby oceli pro vyztužení
- velikosti vnitřních sil od teplotních zatížení dle směrnice jsou až o cca 50-60 % větší než reálně dosahované
- pro stanovení těchto reálných hodnot doporučujeme využít průběhů teplotních spádů dle obr. č. 2, označených léto I, resp. léto II, které věrohodněji odpovídají skutečným hodnotám teplot u ostění.  
Využití těchto grafů může vést ke značným úsporám vyztužovacích materiálů.
- stanovení vlivu max. zimních teplot (ochlazení) je možno provést stejným způsobem. Nebylo však prováděno, protože naměřené teploty v zimním období nedosahovaly minim, které mohou v našich klimatických podmínkách nastat (-20 až -25 °C).

### LITERATURA

- Manuál CESAR –LCPC Version 4.0

**Oponentní posudek vypracoval:** Ing. Alexandr Butovič, Ph.D.