

SPOLEHLIVOST NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ RAŽBY NRTM

RELIABILITY OF NUMERICAL MODELLING OF NATM TUNNELLING

JAKUB NOSEK

ABSTRAKT

Statické výpočty tunelového ostění se v poslední době provádí většinou pomocí numerických modelů, které využívají metodu konečných prvků. O přesnosti a spolehlivosti těchto výpočtů jsou mezi odborníky často vedené diskuse. Výpočet tunelové stavby je obecně ovlivněn přesností jeho vstupů a mírou zjednodušení v modelu. Tyto faktory vnášejí do výsledků větší či menší odchylku od skutečnosti. Vzhledem k tomu, že takto provedený statický výpočet na základě aktuálně dostupných vstupních informací (zejména geotechnických parametrů horninového prostředí) je zpravidla jedinou indicií o předpokládaném deformačním chování nebo například vnitřních silách v ostění, jsou tyto výsledky často považovány za obecně platné. V rámci doktorského studia a práce u společnosti 3G Consulting Engineers s.r.o. autor zpracoval studii zaměřenou na vyhodnocení přesnosti numerického modelování ražby tunelů. Za tímto účelem byly provedeny výpočty v programu Plaxis v několika řezech pro většinu rozsáhlejších tunelových staveb posledních deseti let v České republice. Výsledné hodnoty deformací jsou následně porovnávány s dostupnými výsledky monitoringu.

ABSTRACT

Lately, structural analyses of tunnel linings have mostly been carried out using numerical models and the Finite Element Method (FEM). The accuracy and reliability of these analyses are often subjects of discussions between professionals. The analysis of a tunnel structure is generally influenced by the accuracy of its inputs and the degree of the model simplification. These factors introduce bigger or smaller deviation from the reality into results. With respect to the fact that a structural analysis carried out in this way on the basis of currently available input information (mainly geotechnical parameters of the ground environment) is usually the only inferential evidence of the assumed deformational behaviour or, for example, internal forces in the lining. These results are often considered to be generally valid. The author carried out a study focused on the evaluation of the accuracy of numerical modelling of tunnelling within the framework of the doctoral study and his work for 3G Consulting Engineers s.r.o. For that purpose, analyses were conducted in several cross-sections for the majority of larger tunnelling projects of the previous ten years in the Czech Republic, using the Plaxis software. The resultant values of deformations are subsequently compared with the monitoring results available.

ÚVOD

Statická posouzení ražby a primárního ostění velkých dopravních tunelů jsou dnes většinou prováděna pomocí numerických modelů, a to metodou konečných prvků. Jejich výsledkem jsou vypočtené hodnoty deformací, sil, ohybových momentů i napětí v každém bodě zájmu. To může vést k dojmu, že je tak konstrukce zcela popsána a výsledky mají stejnou platnost, jako v případě ostatních statických výpočtů, například ocelových nebo betonových konstrukcí. Ve skutečnosti se mohou výsledky modelu od skutečného chování spolupůsobící konstrukce hornina-ostění výrazně lišit zejména kvůli zásadnímu vlivu nejistých geotechnických parametrů masivu. Jaká je přesnost numerického modelování ražby tunelů se však v literatuře neuvádí.

Nedostatek informací ohledně zmíněné přesnosti byl motivací k vypracování studie na toto téma v rámci doktorského studia na Stavební fakultě ČVUT v Praze. Její výsledky jsou stručně prezentovány v tomto článku. Detailní popis je k nalezení ve veřejně dostupné disertační práci „Vyhodnocení spolehlivosti statických výpočtů tunelů v ČR na základě analýzy výsledků monitoringu“ [1].

V rámci studie byly provedeny statické výpočty ražby a primárního ostění v programu Plaxis v deseti řezech zahrnujících většinu rozsáhlejších tunelových staveb posledních deseti let v České republice. Výsledné hodnoty deformací byly následně porovnávány s dostupnými výsledky monitoringu. Hodnocení přesnosti numerického modelování je založeno na jejich statistickém vyhodnocení. Vzhledem k omezenému počtu testovaných řezů je nutné veškeré závěry z této práce vnímat spíše jako indicie než jako prokázaná fakta. Zároveň se liší přístup k modelování u jednotlivých statiků, z čehož lze usuzovat, že se bude stejně lišit i jejich přesnost.

INTRODUCTION

Structural analyses of tunnel excavation and the primary lining of large transport tunnels are today mostly carried out using numerical models, namely the Finite Element Method. Their results comprise the calculated values of deformations, forces, bending moments and stresses at each point of interest. This fact can lead to the impression that the structure is fully correctly described in this way and the applicability of the results is identical with the results of other structural analyses, for example of steel or concrete structures. In reality, the model results may significantly differ from the model of actual behaviour of the ground-lining interaction structure, mainly because of the fundamental influence of uncertain geotechnical parameters of the massif. Nevertheless, the accuracy of numerical modelling of tunnel excavation is not stated in literature.

The lack of information regarding the above-mentioned accuracy was the motive for conducting a study on this topic within the framework of the doctoral study at the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University in Prague. Its results are briefly presented in this paper. The detailed description can be found in the publicly available thesis “Evaluation of reliability of structural analyses on tunnels in the CR on the basis of the analysis of monitoring results” [1].

Structural calculations of the excavation and the primary lining were carried out within the framework of the study the study in ten cross-sections covering the majority of larger tunnelling projects of the previous ten years in the Czech Republic, using the Plaxis software. The resultant values of deformations were subsequently compared with the monitoring results available. The evaluation of the accuracy of numerical modelling is based on the statistical evaluation of the values. With respect to the limited number of tested cross-sections, it is necessary to consider all conclusions of this work rather as inferential evidence than proved facts. At the same time, the attitude of particular structural engineers toward modelling is different. It is possible to conclude that their accuracy will be different in a similar way.

ZPRACOVÁNÍ ŘEŠENÝCH ŘEZŮ

Cílem studie bylo provedení většího množství praktických testů, spočívajících v modelování vybraných tunelů v dobře monitorovaných příčných řezech. Konkrétně bylo vybráno deset řezů na sedmi různých tunelech prováděných v posledních deseti letech v České republice Novou rakouskou tunelovací metodou. Řezy byly pečlivě vybírány jak z hlediska dostupnosti dat monitoringu (zejména přítomnosti extenzometrů), tak na základě vhodnosti pro dvourozměrný model, tzn. například bez blízkých změn průřezů nebo skokových změn nadloží.

Analýza každého z řezů se skládala ze tří základních kroků – výpočet deformací, analýza výsledků monitoringu a porovnání získaných hodnot. V každém řezu byl nejprve proveden a spočítán numerický model, a teprve následně provedena analýza monitoringu tak, aby nemohlo dojít k ovlivnění nastavení výpočtu znalostí správného výsledku.

Geotechnické parametry horninového prostředí byly nastaveny na základě informací z podrobného geotechnického průzkumu bez znalosti výsledků různých dodatečných průzkumů a monitoringu po zahájení ražby hlavních tunelů. Pro zajištění souladu výpočtů s realitou bylo ovšem nutné projít záznamy provedené ražby v okolí řezu, aby byl do modelů zanesen skutečně realizovaný způsob členění čelby a vystrojení tunelu.

Cílem bylo provádět výpočty tak, jak by je nastavil „průměrný“ statik v české projekční kanceláři. Z toho důvodu byla provedena malá anketa mezi několika statiky z různých společností (Mott MacDonald CZ, spol. s r.o., PRAGOPROJEKT, a.s., SUDOP PRAHA a.s., SATRA, spol. s r.o.) a na základě jejich odpovědí a zkušenosti autora (3G Consulting Engineers s.r.o.) byly modely nastaveny takto:

- Použitý software: *Plaxis 8.2 2D, Metoda konečných prvků*;
- Materiálový model: *Mohr-Coulomb*;
- Zatížení nevystrojeného výrubu: *kalota 30 %*;
- Modul pružnosti stříkaného betonu: *15 GPa, vliv zraní podrobněji nezaváděn*;
- Typ ostění: *elastický*;
- Vliv kotvení: *v horninách modelováno (zlepšená soudržnost v prokotvené oblasti), v zeminách většinou nemodelováno (podle přístupu v RDS)*;
- Použití kontaktních prvků: *ano, bez změny parametrů*;
- Vliv podzemní vody: *zaveden v případě snížení hladiny podzemní vody ražbou tunelu*;
- Zohlednění tloušťky ostění v jeho patě: *v případě potřeby zavedeno pomocí trojúhelníků pod patami ostění*.

Analýza dostupných výsledků geotechnického monitoringu byla stěžejní částí studie. Téměř v žádném případě nebylo možné výsledky pouze odečíst z dostupných grafů. Vždy musel být zkontrolován čas referenčních (nulových) měření ve vztahu k průběhům ražeb, přičemž nastaly i případy, kdy byly výsledky pozdním provedením nulového měření úplně znehodnoceny a již připravený řez nemohl být použit. Následně bylo provedeno porovnání všech dostupných typů měření v daném místě a zároveň byl analyzován nárůst deformací v čase v závislosti na průběhu ražeb pro případné zachycení a odfiltrování měřičských chyb. Na základě takto zpracovaných informací byl stanoven nejlepší možný odhad reálného deformačního chování.

Aby bylo možné úspěšnost modelování číselně vyhodnotit, byly určeny konkrétní parametry pro srovnávání. Porovnávané hodnoty musely být zejména dostupné z běžně prováděného monitoringu a zároveň dostatečně reprezentativní. Tyto podmínky splňují tři následující parametry:

- Maximální pokles na povrchu – jedná se o maximální sedání povrchu bez ohledu na přesné místo jeho výskytu.

PROCESSING THE CROSS-SECTIONS BEING SOLVED

The objective of the study was conducting a larger quantity of practical tests lying in modelling selected tunnels in well monitored cross-sections. In concrete, ten cross-sections were selected in various tunnels constructed using the New Austrian Tunnelling Method in the Czech Republic during the past ten years. The cross-sections were thoroughly selected from the aspect of both the accessibility of the monitoring data (in particular the presence of extensometers) and on the basis of suitability for the two-dimensional model, for example cross-sections without changes in their vicinity or step changes in the overburden.

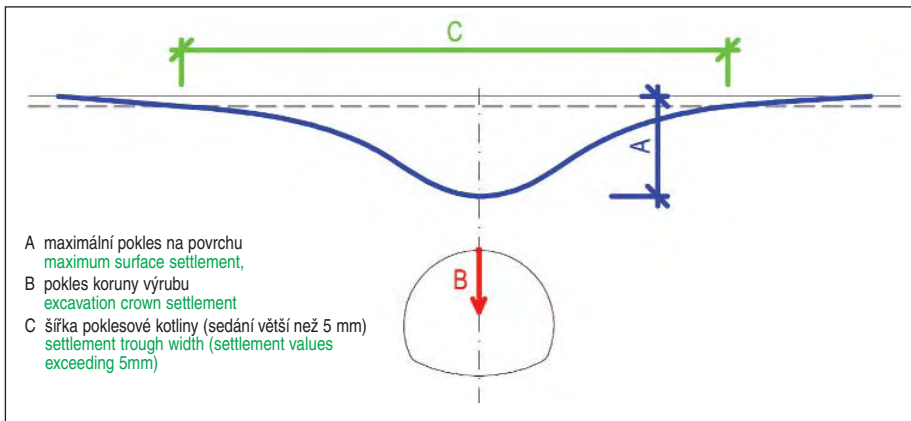
The analysis of each of the cross-sections consisted of three basic steps – the calculation of deformations, the analysis of monitoring results and the comparison of the obtained values. The numerical model was at the beginning carried out and analysed for each cross-section; only then was the analysis of the monitoring carried out so that the setting of the calculation could not be influenced by the knowledge of the correct result.

The geotechnical parameters of the ground environment were set on the basis of information from detailed geotechnical investigation, without the knowledge of the results of various supplementary investigations and monitoring carried out after the commencement of the excavation of the main tunnels. Anyway, it was necessary for securing the agreement of results with reality to go through the records of the excavation carried out in the surroundings of the cross-section so that the actually applied excavation sequence and excavation support were introduced into the models.

The objective was to carry out calculations in a way in which an “average” structural engineer would determine them in a Czech designing office. For that reason a small enquiry was carried out among several structural engineers from various companies (Mott MacDonald CZ, spol. s r.o., PRAGOPROJEKT, a.s., SUDOP PRAHA a.s., SATRA, spol. s r.o.) and the models were set on the basis of their answers and author's experience (3G Consulting Engineers s.r.o.) in the following way:

- Software applied: *Plaxis 8.2 2D, Finite Element Method*;
- Material model: *Mohr-Coulomb*;
- Loads acting on the unsupported excavation: *Top heading 30%*;
- Modulus of elasticity of shotcrete: *15GPa, the influence of ageing not introduced in more detail*;
- Lining type: *Elastic*;
- Influence of anchoring: *Modelled in rock (improved cohesion in the area stabilised with anchors), in soils mostly not modelled (depending on the approach in the detailed design)*;
- Application of contact elements: *Yes, without changing the parameters*;
- Influence of groundwater: *Introduced in the case of lowering the water table as a result of the tunnel excavation*;
- Taking the thickness of the lining at its footing: *Introduced in the case of necessity by means of triangles under lining footings*.

The analysis of available results of geotechnical monitoring formed the crucial part of the study. It was not possible nearly in any case only to read the results from the graphs available. It was always necessary to check the time of reference (zero) measurements in relation to the excavation courses; cases even occurred where the results were completely devalued as a result of a reference measurement carried out late and the already prepared cross-section could not be used. Subsequently, the comparison of all measurement types available in the particular place and, at the same time, the growth of deformations with time was analysed in dependence on the course of excavation for the purpose of contingent identification of measuring errors and their filtration off. The best possible guessing on the real deformational behaviour was determined on the basis of the information processed in the above-mentioned way.



Obr. 1 Srovnávané parametry řezů

Fig. 1 Parameters of cross-sections being compared

Při zpracování naměřených poklesů je body proložena křivka, kde její maximum vyjadřuje hledanou hodnotu (obr. 1, parametr A).

- Pokles v koruně výrubu – jedná se o pokles těsně nad výrubem tunelové trouby (obr. 1, parametr B). V případě, že se jedná o řez se dvěma troubami (většinou), je uvažován průměr z hodnot nad každou troubou.
- Šířka poklesové kotliny – vzhledem k tomu, že ve skutečnosti není šířka poklesové kotliny nijak přesně ohraničena (poklesy se se zvyšující vzdáleností od výrubu pouze blíží k nule), bylo nutné její konce nějakým způsobem definovat. Za poklesovou kotlinu je tedy považována pouze oblast, kde poklesy překračují hodnotu 5 mm (obr. 1, parametr C).

STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

Podrobný popis výsledků analýzy monitoringu a modelů pro všech deset řezů je k dispozici ve zmíněné disertační práci. V tomto článku jsou shrnuty, vyhodnoceny a diskutovány již jen klíčové údaje a hodnoty jako soubor statistických dat.

Konkrétně byly zpracovány následující příčné řezy (jejich očíslování odpovídá označení v grafech 1 a 3):

- 1 Brusnice, 220 TM;
- 2 Brusnice, 361 TM;
- 3 Brusnice, 74 TM;

Concrete parameters were determined for comparison so that the success of modelling could be evaluated numerically. The values being compared had to be available from commonly carried out monitoring and, at the same time, had to be sufficiently representative. The following three parameters meet the above-mentioned conditions:

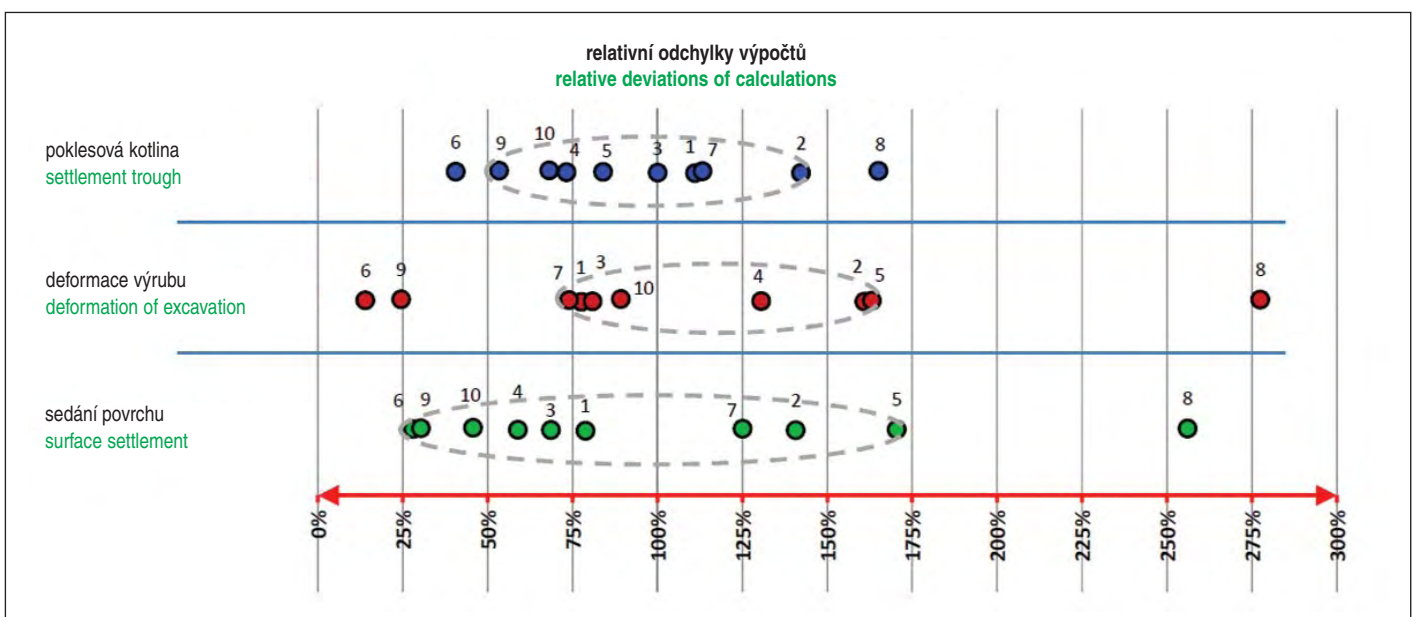
- Maximum surface settlement – it is the maximum settlement of the surface, irrespective of the exact place of its occurrence. When the measured settlement values are being processed, a curve the maximum of which expresses the value being searched for is inset in the points (see Fig. 1, parameter A)
- Settlement above the excavation crown – it is the settlement just above the tunnel tube excavation (see Fig. 1, parameter B). In the case of a cross-section through two tubes (mostly), the average of values above each tube is taken into consideration.
- Settlement trough width – with respect to the fact that, in reality, the width of the settlement trough is not exactly marked out (settlement values only approximate zero with the distance from the excavation growing), it was necessary to define the ends of the trough in some way. Only the area where settlement values exceed 5mm is therefore considered to be a settlement trough (see Fig. 1, parameter C).

STATISTICAL EVALUATION

A detailed description of the results of the analysis of monitoring and all ten cross-sections is available in the above-mentioned thesis. This paper only summarises, evaluates and discusses only key data and values as a set of statistical data.

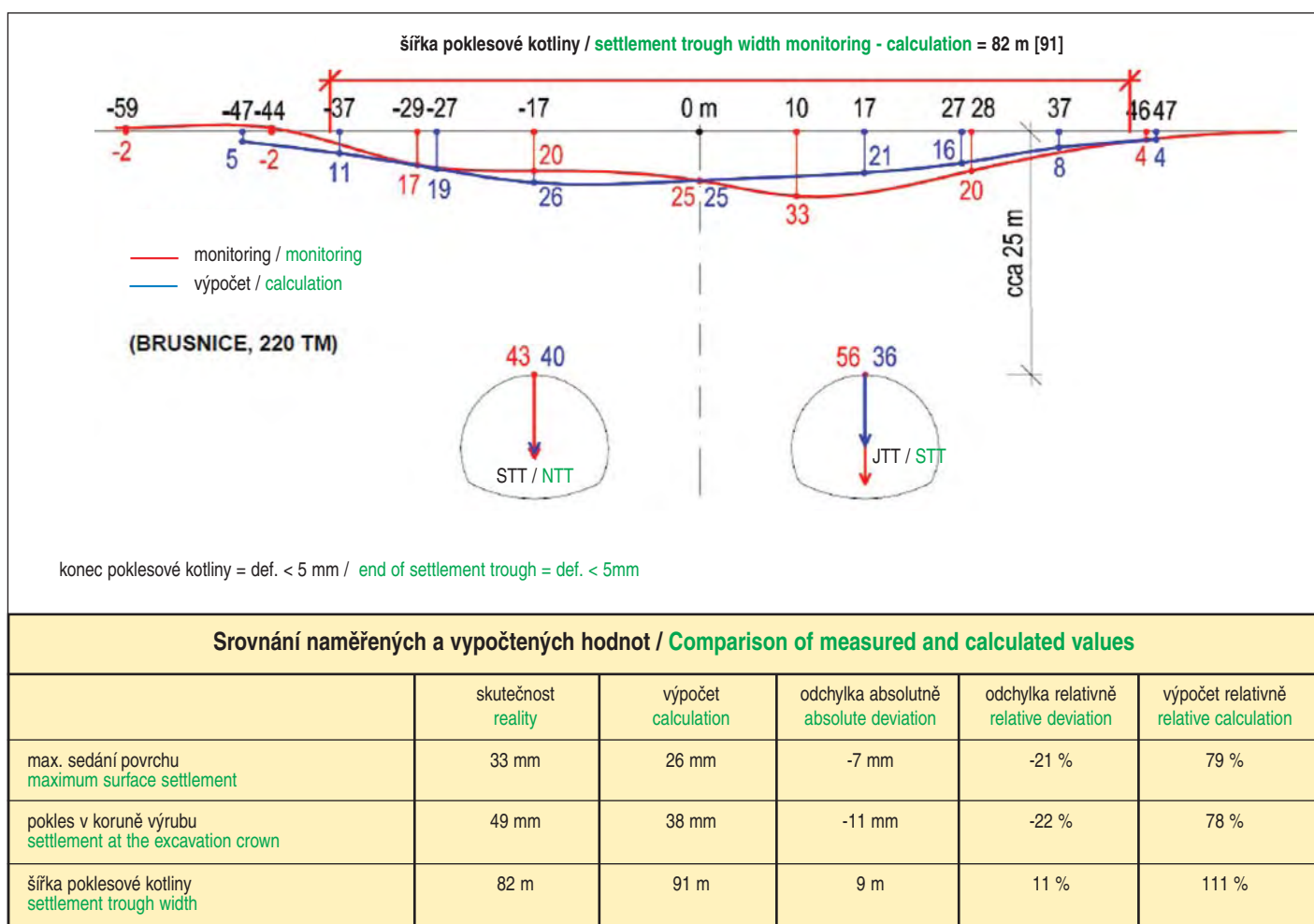
In the concrete, the following cross-sections were processed (their numbering corresponds to the marking in graphs No. 1 and 3):

- 1 Brusnice, tunnel chainage metre 220;
- 2 Brusnice, tunnel chainage metre 361;
- 3 Brusnice, tunnel chainage metre 74;
- 4 Radejčín, tunnel chainage metre 273 ;
- 5 Radejčín, tunnel chainage metre 542;
- 6 Prackovice, tunnel chainage metre 210 ;
- 7 Komořany, tunnel chainage metre 230;
- 8 Lochkov, tunnel chainage metre 165;



Graf 1 Vynesení základních relativních odchylek (číslo u jednotlivých bodů označuje konkrétní řez v seznamu)

Graph 1 Plotting the basic relative deviations (Numbers at individual points mark a concrete cross-section in the list)



Obr. 2 Příklad vyhodnocení jednotlivých řezů

Fig. 2 Example of the evaluation of individual cross-sections

- 4 Radejčín, 273 TM;
- 5 Radejčín, 542 TM;
- 6 Prackovice, 210 TM;
- 7 Komořany, 230 TM;
- 8 Lochkov, 165 TM;
- 9 Valík, 190 TM;
- 10 Bubeneč, 868 TM.

Ve všech vypočtených hodnotách byly stanoveny odchylky od výsledků monitoringu. Pro grafické vynesení byl výsledek výpočtu vyjádřen v procentech měřených hodnot, čímž byly částečně potlačeny různé absolutní rozdíly při nízkých, nebo naopak vysokých deformacích. Shoda výpočtu s měřením byla tedy reprezentována hodnotou 100 %. Při hodnotě menší bylo sedání výpočtem podceněno a výpočet je tak na straně nebezpečné, při hodnotě větší bylo sedání výpočtem přeceněno a výpočet je tak na straně bezpečné. Příklad vyhodnocení jednotlivých řezů je uveden na obr. 2.

Vynesení základních hodnot

Cílem takovéto studie by mělo být vynesení histogramu, kterým bude proložena křivka reprezentující funkci hustoty pravděpodobnosti výskytu určité chyby. Lze se domnívat, že by tomuto souboru dat mělo odpovídat logaritmickeo-normální rozdělení. Podle tvaru křivky by bylo možné odhadnout jeho parametry (střední hodnotu μ a směrodatnou odchylku σ). Tím by byla číselně definována funkce hustoty pravděpodobnosti i distribuční funkce a bylo by možné určit, s jakou pravděpodobností se bude chyba výpočtu pohybovat v jakémkoliv zvoleném intervalu. Provedený počet testů (výpočtů) ovšem není k vynesení plynulého histogramu dostatečný. Z toho důvodu

- 9 Valík, tunnel chainage metre 190;
- 10 Bubeneč, tunnel chainage metre 868.

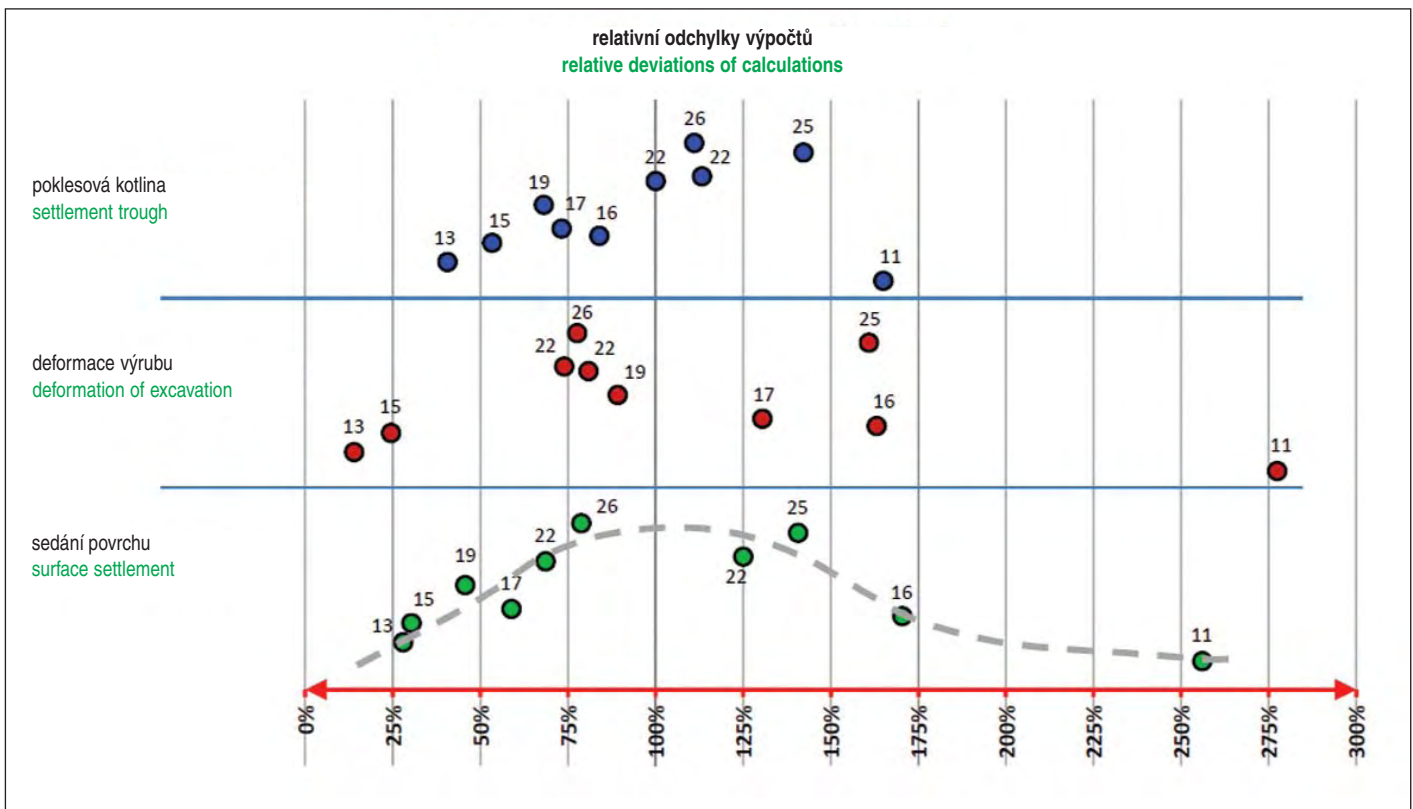
Deviations from the monitoring results were determined for all of the calculated values. The calculation result was expressed in percentage of the measured values. In this way the various absolute differences in low or, conversely, high deformation levels were partially suppressed. The agreement of a calculation with the measurement was therefore represented by the value of 100%. When the value is lower, the settlement was underestimated by the calculation, therefore the calculation is on the unsafe side, whilst when it is higher, the settlement was overestimated by the calculation, therefore the calculation is on the safe side. An example of the evaluation of individual cross-sections is presented in Fig. 2.

Plotting the basic values

The objective of such a study should be plotting of a histogram with a curve representing the frequency function for the occurrence of a certain error inset through it. It is possible to assume that the logarithmic-normal distribution should correspond to this set of data. It would be possible to estimate its parameters (mean value μ and standard deviation σ) according to the curve shape. In this way the frequency function and distribution function would be defined numerically and it would be possible to determine the probability with which the calculation error will fluctuate within any chosen interval. Of course, the number of the conducted tests (calculations) is not sufficient for plotting a fluent histogram. For that reason the calculated deviations are presented only in basic graphs and one basic confidence region can be assessed.

Surface settlement

It is obvious from Graph No. 1 that in the particular case the distribution of the points does not indicate the log-normal distribution



Graf 2 Vynesení relativních odchylek v závislosti na výšce nadloží (číslo u jednotlivých bodů označuje výšku nadloží, konkrétní řez je možné vyčíst z grafu 1, pořadí bodů zůstalo stejné)

Graph 2 Plotting the relative deviations in dependency on the overburden height (Numbers at individual points mark the overburden height; the particular cross-section can be found in Graph 1; the order of points remained unchanged)

jsou vypočtené odchylky prezentovány pouze v základních grafech a je odhadnut jeden základní interval spolehlivosti.

Sedání povrchu

Při pohledu na graf 1 je zřejmé, že rozložení bodů neindikuje v daném případě log-normální rozdělení, které by se dalo očekávat. Hodnoty jsou rozmístěny přibližně rovnoměrně v oblasti mezi 30 % a 175 % (označené šedým oválem). Vzhledem k tomu, že hustota bodů není nikterak vyšší kolem středu intervalu (spíše naopak), je možné usuzovat, že výsledky u jeho krajů jsou stejně pravděpodobné, jako ty kolem středu. Takové hodnocení přesnosti numerického modelování vyznívá spíše negativně.

Aritmetický průměr hodnot při vyloučení maxima a minima je 90 %. Odchylka 10 % je při tomto počtu hodnot zanedbatelná. Minimálně lze tedy říci, že při výpočtu sedání na povrchu nemají numerické modely tendenci vytvářet systematickou chybu na jednu či druhou stranu.

Deformace výrubu

O kategorii výše v grafu 1 jsou znázorněny relativní odchylky výpočtu svislé deformace těsně nad výrubem. Na první pohled zaujme, že pořadí ani oblasti shluku nejsou stejné jako v případě sedání povrchu. Například bod 10, reprezentující tunel Bubeneč 868 TM, dokládá, že ani v případě relativně přesného určení deformací v oblasti výrubu (89 %) není zaručen dobrý odhad sedání povrchu (46 %). Body číslo 4 (Radejčín 273 TM) a 7 (Komořany 230 TM) ukazují na možné výrazně opačné odchylky, kdy se oba mezi grafy sedání povrchu a deformací výrubu přemístily z pravé na levou, resp. z levé na pravou stranu od přesné hodnoty (100 %).

Pohled na graf může působit alespoň o něco pozitivněji, co se důvěry v numerické modelování týče. V případě, že se nebude věnovat pozornost extrémním hodnotám, ale za standardní výstup z výpočtu bude považována oblast bodů z výraznější

which could be expected. The values are distributed approximately equally within the area between 30% and 175% (highlighted by a grey oval). With respect to the fact that the density of the points is nowise higher around the interval centre (rather the opposite), it is possible to assume that the probabilities of the results at its edges and around the centre are identical. Such the evaluation of the numerical model accuracy looks rather negatively.

The arithmetical mean value with the maximum and minimum excluded is 90%. The deviation of 10% is negligible at this number of values. It is therefore at least to state that numerical models do not have a tendency to create a systematic error to one or the other side.

Excavation deformation

Relative deviations of the calculation of vertical deformations just above the excavation are displayed by a category higher in the graph. The fact will capture at first sight that neither the order nor the cluster areas are identical with those in the case of the surface settlement. For example, point No. 10 representing the Bubeneč tunnel, the tunnel chainage m 868, documents that a good estimation of the surface settlement (46%) is not guaranteed even in the case of relatively accurate determination of deformations in the excavation area (89%). Points No. 4 (Radejčín, tunnel chainage m 273) and 7 (Komořany, tunnel chainage m 230) point to the possibility of significantly opposite deviations, where both of them move between the graphs of surface settlement and excavation deformation from the right side to the left side, respectively from the left side to the right side of the accurate value (100%).

A view of the graph may impress at least a little more positively as far as the confidence in numerical modelling is concerned. In the case that we do not address extreme values and consider the area of points highlighted by the grey oval to be the standard output, we can say that the successfulness of the calculation commonly fluctuates between 75% and 165%. But it is necessary to realize that 3 of 10 points, i.e. 30%, were excluded

šedým oválem, lze říci, že se úspěšnost výpočtu běžně pohybuje mezi 75 % a 165 %. Je ale třeba si uvědomit, že byly vynechány již 3 z 10 bodů, tedy 30 %.

Aritmetický průměr hodnot při vyloučení maxima a minima je přesně 100 %, což stejně jako v případě sedání povrchu dokládá, že při výpočtu svislé deformace bezprostředně nad výrubem nemají numerické modely tendenci vytvářet systematickou chybu.

Šířka poklesové kotliny

Ve vrchní třetině grafu 1 jsou znázorněny relativní odchylky výpočtu šířky poklesové kotliny na povrchu. Podle předpokladu výsledky relativně slušně korelují s grafem maximálních sedání povrchu. Téměř všechny body zůstávají ve stejném pořadí, jen se více sesunuly směrem ke střední hodnotě, z čehož se může zdát, že odhadnout šířku poklesové kotliny je pro model jednodušší než určit přesné maximální hodnoty poklesů.

Oblast běžné úspěšnosti výpočtu je opět zvýrazněna šedivým oválem, kdy došlo pouze k vynechání krajních hodnot. V číselném vyjádření je tedy možné říci, že přesnost výpočtu šířky poklesové kotliny se v 80 % případech pohybuje mezi 55 % a 145 % skutečných hodnot.

Aritmetický průměr hodnot při vyloučení maxima a minima je 93 %. Znovu lze tedy konstatovat, že při výpočtu šířky poklesové kotliny nemají numerické modely tendenci vytvářet systematickou chybu.

Chyby v závislosti na ostatních parametrech

Současně se základním výzkumem přesnosti výpočtů byla provedena studie, v jakých případech vznikají chyby více nebo méně. Za tímto účelem byly odchylky výpočtů vyneseny do grafů postupně v závislosti na výšce nadloží, velikosti skutečných deformací nebo s vyznačením, zda v daném případě byla před ražbou hlavních tunelů provedena průzkumná štola.

Vynesení odchylek v závislosti na výšce nadloží

V obr. 2 jsou vyneseny odchylky výpočtu (na ose x) v závislosti na průměrné výšce nadloží obou tunelových trub v řešeném řezu (na ose y). Přesná výška nadloží v metrech je vždy uvedena v popisku každého bodu.

Z grafů, a to zejména u sedání povrchu, je vcelku jasně patrná tendence vyšší přesnosti výpočtu při vyšším nadloží. Naopak body s nejvyšší chybou vždy reprezentují řez s nejmenším nadložím v řádu těsně nad 10 m. Je nutno upozornit, že se ve všech případech jedná o tunely dálniční s velkým profilem výrubu, kde šířka každé trouby je právě 10 m a více. Je patrné, že při výšce nadloží přesahující přibližně 20 m je úspěšnost numerických modelů významně vyšší. V grafech deformace výrubu a šířky poklesové kotliny lze tuto tendenci pozorovat také, ale již není zdaleka tak zřejmá.

Negativní zpráva z tohoto vyhodnocení plyne, jak bylo zmíněno, pro tunely s nízkým nadložím. Nejistota ohledně výsledků z jejich modelování se zdá být neúměrně vysoká. Zároveň situaci znepřehledňuje výskyt výrazných odchylek rovnoměrně na obou stranách od správné hodnoty. Jinými slovy, vyskytuje se zároveň výrazné podhodnocení i nadhodnocení deformací. V kontrastu s tímto zjištěním je zjevně fakt, že právě oblasti s nízkým nadložím jsou často pro výstavbu tunelů kritické, a proto je v nich predikce chování masivu při ražbě numerickým modelem obzvláště žádaná.

Vynesení odchylek s vyznačením provedení průzkumné štoly

V grafu 3 jsou vyneseny odchylky výpočtu s vyznačením, zda v řešeném řezu byla v předstihu provedena průzkumná štola. Body označující řezy s průzkumnou štolou jsou znázorněny žlutou barvou.

The arithmetical mean of the values when the maximum and minimum are excluded is exactly 100%, which, much as in the case of the terrain settlement, documents that numerical models where the vertical deformation immediately above the excavation is being calculated do not have the tendency to produce a systematic error.

Settlement trough width

Relative deviations of the calculation of the settlement trough width on the surface are shown in the upper half of Graph No. 1. According to the assumption, the results relatively fairly correlate with the graph of the maximum surface settlement. Nearly all points remain in the same order; they only slid more toward the mean value. It may seem from this fact that it is simpler for the model to estimate the settlement trough width than to determine exact maximum settlement values.

The area of the common successfulness of calculation is again highlighted by the grey oval, where only the limiting values are omitted. It is therefore possible in numerical expression to say that the accuracy of the calculation of a settlement trough oscillates between 55% and 145% of real values in 80% of cases.

The arithmetical mean of the values with the maximums and minimums excluded is 93%. It is therefore again possible to state that numerical models do not have the tendency to create the systematic error in the settlement trough width calculation.

Errors depending on the other parameters

A study of the cases in which more or less errors originate was conducted concurrently with the basic investigation of the accuracy of calculations. For this purpose the deviations of calculations were step by step plotted in graphs, depending on the dependence on the overburden height, the size of actual deformations or marking whether an exploratory gallery was carried out prior to the main tunnel excavation in the particular case.

Plotting the deviations in dependence on overburden height

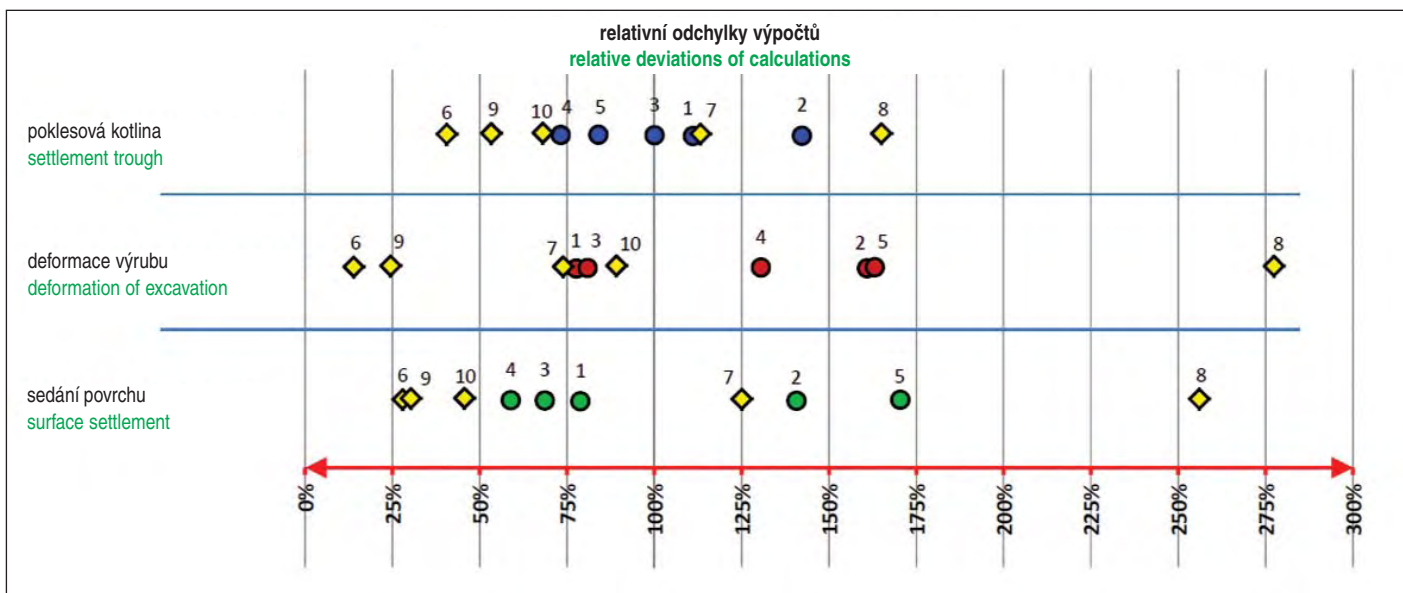
In Fig. 2, calculation deviations are plotted (on x-axis) in dependence on the average height of the overburden of both tunnel tubes (on y-axis) in the cross-section being solved. The exact overburden height in metres is always presented in a legend to each point.

The tendency to higher accuracy of the calculation at a higher overburden is relatively clearly obvious from the graphs, first and foremost in the cases of surface settlement. Conversely, points with the highest error always represent a cross-section with the lowest overburden closely over 10m. It is necessary to warn that motorway tunnels with large cross-sections, where the width of each tunnel tube is 10 metres and greater, are dealt with. It is obvious that at the overburden height exceeding approximately 20 metres the successfulness of numerical models is significantly higher. It is also possible to observe this tendency in graphs of deformation of the excavation and the width of the settlement trough, but it is far from so obvious.

As mentioned above, a negative news follows from this evaluation for tunnels with low overburden. The uncertainty regarding the results obtained from their modelling seems to be inadequately high. At the same time, the situation is made confused by the occurrence of significant deviations uniformly on both sides of the correct value. In other words, underestimation and overestimation of deformations occur concurrently. The fact that areas with low overburden are frequently critical for tunnel construction and for that reason the prediction of the massif behaviour in the case of tunnelling using a numerical model is especially sought, is in contrast with the above finding.

Plotting the deviations with the marking of the execution of an exploratory gallery in the graph

Calculation deviations with marking whether an exploratory gallery was carried out in the cross-section being solved are plotted on Graph No. 3. Points marking the cross-sections with an exploratory gallery are highlighted by yellow colour.



Graf 3 Vynesení relativních odchylek v závislosti na provádění průzkumné štoly (číslo u jednotlivých bodů označuje konkrétní řez v seznamu, řezy, kde byla prováděna průzkumná štola, jsou vybarveny žlutě)

Graf 3 Plotting the relative deviations in dependency on the execution of an exploratory gallery (Numbers at individual points mark the particular cross-section in the list; cross-sections where an exploratory gallery was carried out are coloured in yellow)

Výsledky zobrazení této závislosti jsou zřejmě nejvíce překvapující. Investoři tunelů vydávají značné prostředky na provádění průzkumných štol v (z různých důvodů) rizikových případech plánované ražby. Účelem takto vynaložených prostředků by mělo být ověření nebo upřesnění informací z geotechnického průzkumu o zeminovém/horninovém prostředí, které má být zažito ražbou. Tyto investice by se měly vrátit v relativně přesné predikci chování masivu při ražbě založené na kalibraci numerického modelu průzkumné štoly, jak uvádí Pruška (2014) [2].

Pohled na vykreslená data ukazuje paradoxně opačnou situaci. Ze všech tří grafů je zřejmé, že v řezech bez provádění průzkumné štoly jsou výsledky modelů přesnější než tam, kde průzkumná štola provedena byla. Nejmarkantněji je tato tendence vidět v grafu sedání povrchu. Kromě bodu 7 (Komořany 230 TM) obsazují žluté body s ražbou štoly jen krajní pozice.

Odchylky byly vyneseny také v závislosti na skutečných deformacích. V tomto případě se však žádnou závislost vypořádat nepodařilo.

ZÁVĚR

Z prezentovaných grafů je zřejmé, že výsledky nejsou pro numerické modelování příliš příznivé. V případě všech tří sledovaných parametrů jsou body rozptýleny relativně rovnoměrně na ose x a nelze pozorovat žádné tendence k jejich shlukování kolem správné hodnoty.

Ke zhodnocení přesnosti modelování je v tomto případě vhodné použít intervaly spolehlivosti. V tab. 1 je pro každý parametr uveden nejvhodnější interval s vysokou pravděpodobností, že se v něm bude hodnota realizovat. V posledním sloupci této tabulky je uváděna střední hodnota spočítaná jako průměr s vyloučením minimální a maximální hodnoty.

Intervaly jsou relativně široké, ovšem jejich další zužování na základě této statistiky nemá významný přínos. Jak již bylo zmíněno, hodnoty jsou v rámci těchto intervalů rozptýleny přibližně rovnoměrně, a tak při zužování intervalů velmi rychle klesá podíl realizací.

Podstatná informace plyne z výpočtu střední hodnoty. Pokud se přijme, že 10% odchylka je při tomto objemu zpracovaných dat zanedbatelná, lze konstatovat, že numerické výpočty ražeb tunelů nemají ve sledovaných parametrech tendenci vytvářet systematickou chybu.

The results of the depiction of this dependency are obviously the most surprising. Owners of tunnel construction projects expend significant financial means for the execution of exploratory galleries in risky (for various reasons) cases of planned tunnel excavation. The purpose of the means expended in this way should be the verification or refinement of the information from the geotechnical investigation into the soil/rock environment to be encountered by the excavation. These investments should be returned in the form of a relatively accurate prediction of the massif behaviour during excavation based on the calibration of the numerical model of the exploratory gallery (Pruška 2014) [2].

A view of the plotted data shows a paradoxically opposite situation. It is obvious from all of the three graphs that the results of models in cross-sections without the execution of an exploratory gallery are more accurate than cross-sections where an exploratory gallery was carried out. This tendency is most markedly seen in the graph of surface settlement. With the exception of point No. 7 (Komořany, tunnel chainage m 230) yellow points with the exploratory gallery excavation occupy positions only at the ends.

The deviations depending on real deformations were also plotted. However, no dependency was observed in this case.

CONCLUSION

It is obvious from the presented graphs that the results are not too favourable for numerical modelling. The points are scattered relatively uniformly on the x-axis in the case of all three parameters being monitored; no tendencies to clustering around the correct value can be observed. Confidence limits are in this case suitable for the assessment of the modelling accuracy. Table 1 presents the limits most suitable for each parameter, where the probability that the value will be between is high. The last column of this table contains the mean value calculated as the arithmetical mean with the minimum and maximum values excluded.

The intervals are relatively wide, but reducing the width further on the basis of this statistics has no significant merit. As mentioned above, values are scattered within these intervals approximately uniformly which means that the proportion of realisations drops very rapidly when the width of the intervals is reduced.

Substantial information follows from the calculation of the mean value. If the fact is accepted that the 10% deviation is negligible in the case of the volume of the processed data, it is possible to state that

Tab. 1 Intervaly spolehlivosti a střední hodnoty
Table 1 Confidence limits and mean values

Parametr výpočtu The parameter of calculation	Zvolený interval spolehlivosti The chosen confidence limits	Podíl realizací v intervalu spolehlivosti Proportion of realizations of the confidence limits	Střední hodnota Mean value
Sedání povrchu Surface settlement	30-175%	90%	90%
Deformace výrubu Deformation of excavation	75-165%	70%	100%
Šířka poklesové kotliny Settlement through width	55-145%	80%	93%

Ačkoliv prezentované výsledky místy vyznívají vzhledem k numerickému modelování kriticky, je nutné konstatovat, že jde stále o nejučinnější nástroj, který v současné době existuje pro predikci deformačního chování horninového masivu při ražbě tunelů k dispozici. Vzhledem k omezenému množství provedených testů je nutné výsledky studie považovat spíše za indikativní a není možné je brát za všeobecně platné.

V rámci zpracování rozsáhlého množství dat z monitoringu tunelů bylo možné provést vyhodnocení dalších zajímavých ukazatelů při ražbě tunelů NRTM v ČR, jako je v tunelovém stavitelství často sledovaný parametr „ztráty objemu zeminy“. Téměř všechny hodnoty na analyzovaných řezech se pohybují mezi 0,25 % a 0,70 %, přičemž střední hodnota při vyloučení obou extrémů je rovna 0,5 %.

Poděkování

Príspevek byl zpracován za podpory programu Centra kompetence Technologické agentury České republiky (TA ČR) v rámci projektu Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI), číslo projektu TE01020168.

Ing. JAKUB NOSEK, Ph.D., nosek@3-g.cz,
3G Consulting Engineers s.r.o.

Recenzovali/Reviewed by: Ing. Tomáš Louženský,
Ing. Petr Makásek, Ph.D., Ing. Josef Kuňák

Vyjádření Redakční rady k článku Ing. Jakuba Noska, Ph.D.

Redakční rada se rozhodla publikovat článek i přes nesouhlas recenzenta Ing. Petra Makásky, Ph.D. Redakční rada pokládá článek za původní a nové poznatky přinášející příspěvek k problematice výstižnosti a přesnosti řešení podzemních staveb rovinnou variantou metody konečných prvků, která je jednou z používaných metod statických výpočtů těchto staveb. Článek nelze pokládat za obecně platný návod pro obdobné výpočty. Předkládané výsledky mají platnost za podmínek, které autor specifikoval s ohledem na poměrně častý přístup uživatelů k numerickému modelování podzemních staveb sledovanou variantou MKP. Redakční rada vítá případné další příspěvky k tématu spolehlivosti numerického modelování podzemních staveb.

prof. Ing. Jiří Barták, DrSc., předseda RR

numerical calculations for the excavation of tunnels do not have the tendency to create systematic errors in the parameters being observed.

Despite the fact that the presented results locally look critically in relation to numerical modelling, it is necessary to state that numerical modelling is still the most effective tool which we currently have got available for the prediction of the deformational behaviour of ground massif during the excavation of tunnels available. It is necessary with respect to the limited quantity of the conducted tests to consider the study results rather as indicative and it is not possible to take them as generally valid results.

It was possible within the framework of processing a vast amount of data from the monitoring of tunnels to evaluate other interesting parameters existing during the excavation of tunnels in the CR using the NATM, such as the “loss of ground”. Nearly all values of the loss of ground in the analysed cross-sections oscillate between 0.25% and 0.70%, with the mean value with both extremes excluded, is equal to 0.5%.

Acknowledgement

The paper was carried out with the support by the program of the Competence Centre of the Technology Agency of the Czech Republic (TA CR) within the framework of the project the Centre for effective and sustainable transport infrastructure (CESTI), project number TE01020168.

Ing. JAKUB NOSEK, Ph.D., nosek@3-g.cz,
3G Consulting Engineers s.r.o.

Opinion of the Editorial Board on the paper by Ing. Jakub Nosek, Ph.D.

The Editorial Board decided to publish the paper despite the disagreement by the reviewer Ing. Petr Makásek, Ph.D. The Editorial Board considers the paper to be original, new findings bringing contribution regarding aptness and accuracy of solving underground structures using a 2D variant of the Finite Element Method, which is one of the methods used for structural analyses for these structures. The paper can be considered to be a guidance generally applicable to similar analyses. The assumed results are applicable under the condition the author specified taking into consideration the relatively frequent approach of users to numerical modelling of underground structures using the FEM variant being observed. The Editorial Board will welcome other contingent contributions to the topic of reliability of numerical modelling of underground structures.

prof. Ing. Jiří Barták, DrSc.,
Chairman of the Editorial Board

LITERATURA / REFERENCES

- [1] NOSEK, J. Vyhodnocení spolehlivosti statických výpočtů tunelů v ČR na základě analýzy výsledků monitoringu. Disertační práce. Praha: FSv ČVUT, 2015
- [2] PRUŠKA, J. Zpětná analýza při návrhu tunelů. In: Zakládání staveb Brno 2014. Brno: Česká geotechnická společnost Českého svazu stavebních inženýrů, 2014, s. 143-148. ISBN 978-80-87920-01-5