

NÁVRH, REALIZACE A PODMÍNKY PROVÁDĚNÍ NEVYZTUŽENÉHO DEFINITIVNÍHO OSTĚNÍ KONVENČNĚ RAŽENÝCH TUNELŮ

DESIGN, CONSTRUCTION AND CONDITIONS OF APPLICATION OF UNREINFORCED CONCRETE FINAL LINING IN CONVENTIONALLY DRIVEN TUNNELS

JIŘÍ HOŘEJŠÍ, LIBOR MAŘÍK, PAVEL RŮŽIČKA, ANDREAS SCHAAB

ABSTRAKT

Cestou k ekonomickému návrhu definitivního ostění konvenčně ražených tunelů je jeho dimenzování na základě skutečně zastižených geotechnických podmínek. Pro železobetonové konstrukce existuje v České republice řada norem a předpisů, které slouží jak pro návrh a provádění konstrukce, tak pro její převzetí objednatelem před uvedením do provozu a před koncem záruční doby. Pokud to místní poměry dovolují, je možné definitivní ostění navrhnout jako nevyztužené. V takovém případě je třeba zohlednit odlišnosti ve statickém návrhu i možnostech chování ostění a nastavit kritéria pro přejímku ostění tak, aby jeho použití bylo možné. Nastavení příliš přísných kritérií vzniku trhlin může vést k nárůstu ceny díla buď z důvodu nutného vyztužení ostění, nebo z důvodu snížení rizika zhotovitele započtením předpokládaných sanací do celkové ceny. Článek popisuje základní rozdíly v přístupu k železobetonovému a nevyztuženému betonovému ostění, možnosti omezení vzniku trhlin návrhem betonové směsi, volbou technologického postupu prací i způsobem ošetřování po odbednění. V textu je uvedeno srovnání kritérií pro hodnocení povrchu nevyztuženého ostění se zahraničními předpisy.

ABSTRACT

The way to an economic design of the final lining in conventionally driven tunnels lies in structural analysing based on the actually encountered geotechnical conditions. Regarding reinforced concrete structures, many standards and regulations applicable to designing and building structures and taking them over by the client before their commissioning and before the end of the warranty period respectively exist in the Czech Republic. If the local conditions allow it, it is possible to design the final lining as an unreinforced concrete structure. In such a case it is necessary to take the differences into consideration in the structural design and in the possibilities of the lining behaviour and to set criteria for taking over the lining allowing for its use. Setting too stringent criteria for cracking can lead to an increase in the contract price, either because of the necessity for reinforcing the lining or because of the fact that the contractor reduces the risk by incorporating the assumed cost of repairs into the total cost. The paper describes basic differences in the approach to reinforced concrete and unreinforced concrete linings, the possibilities of limiting formation of cracks by means of the concrete mix design, by selection of the technological procedure of the work and the method of curing after stripping. The text contains a comparison of criteria for assessing the surface of an unreinforced concrete lining with criteria in foreign regulations.

1. ÚVOD

Používání nevyztuženého definitivního ostění je v současné době zpravidla spojeno s konvenčně raženými tunely, u kterých primární ostění tvoří stříkaný beton a definitivní ostění je prováděno jako monolitické. V České republice v oblasti konvenčně ražených tunelů převládá NRTM, na jejichž principech byly s výjimkou Březenského tunelu raženého metodou obvodového vrubu vyraženy všechny tunely novodobé tunelářské historie. Její nasazení umožnil až převrat v roce 1989, který otevřel hranice a dal zelenou technologii, které doposud nebyly používány. Projektanti postupně získali přístup k výkonné výpočetní technice a programovému vybavení, stavební firmy ke strojnímu vybavení a stavebním materiálům a obě skupiny společně možnost čerpat ze zahraničních zkušeností.

V souvislosti s NRTM často slyšíme, že se jedná o tunelovací metodu, která umožňuje operativně reagovat na skutečně zastižené geotechnické podmínky a vynakládat jen takové finanční prostředky, které jsou nezbytné z hlediska dodržení požadavků na kvalitu díla a bezpečnost jeho provádění. Aby tomu tak mohlo být, je třeba vytvořit prostor nejen pro zmiňované vybavení moderní technikou a získávání potřebných znalostí i zkušeností, ale také vytvořit technický a právní rámec, který by bez velkých překážek umožnil oběma smluvním stranám legálně a operativně provádět změny

1. INTRODUCTION

The use of unreinforced concrete final lining is currently usually associated with conventionally driven tunnels, where the primary lining is formed by shotcrete and the final lining is cast-in-place. The NATM prevails in the Czech Republic in the area of conventionally excavated tunnels. All tunnels in the modern tunnelling history, with the exception of the Březno tunnel driven using the Mechanical Pre-cutting Method, were driven using the NATM principles. The NATM application was made possible only after the revolution in 1989, which opened borders and gave the green light to technologies which had not been used until then. Designers gradually gained access to high performance computer technology and program equipment, construction companies access to mechanical equipment and building materials and both groups jointly gained the possibility to draw on foreign experience.

In the context of the NATM it is often mentioned that it is a tunnelling method allowing operative responding to the actually encountered geotechnical conditions and expending only such financial means that are necessary for adhering to the quality requirements and requirements for construction work safety. To make it possible, it is necessary to create space not only for the above-mentioned modern technological equipment and for obtaining the knowledge and experience necessary, but also to create the technical and legal framework

během výstavby. Pod pojmem optimalizace technického řešení s ohledem na složitost geotechnických podmínek je větší myšlena ražba tunelu a způsob zajištění stability výrubu. Neméně významnou roli v oblasti pracnosti, minimalizace rizik při provádění a konečné výše investičních nákladů hraje technické řešení definitivního ostění. I v tomto případě lze mluvit o NRTM jako o observační metodě. Na základě výsledků geotechnických měření prováděných v průběhu ražby, pasportizace čeleb jednotlivých záběrů a odpovědného stanovení geotechnických parametrů horninového masivu lze vytvořit matematický model blízcí se reálným podmínkám a získat tak vnitřní síly potřebné pro návrh nutného množství výztuže, případně provedení ostění bez výztuže.

2. ROZDÍLY V NAVRHOVÁNÍ VYZTUŽENÉHO A NEVYZTUŽENÉHO OSTĚNÍ

2.1 Dva přístupy k funkci primárního a definitivního ostění

Na nosnou funkci primárního a definitivního (sekundárního) ostění v řadách technické veřejnosti není jednoznačný názor. Na jedné straně stojí stoupenci základní nosné funkce primárního ostění, kteří mu přisuzují ve spolupůsobení s prokoteným horninovým prstencem schopnost přenášet horninový tlak po celou dobu životnosti tunelu. V takovém případě plní definitivní ostění pouze úlohu obkladní a estetickou, neboť je zatíženo pouze vlastní vahou a účinky objemových změn. Pouze v případě tlakově izolovaných tunelů musí vzdorovat i hydrostatickému zatížení. Za těchto předpokladů byl v ČR postaven Pisárecký tunel v Brně, kdy byly používány pro vyztužení horninového prstence sklolaminátové kotvy s vysokou životností. Na druhé straně stojí stoupenci teorie úplné degradace primárního ostění, které dříve, než je předpokládána životnost tunelu, zcela ztratí svou nosnou funkci a veškeré zatížení musí přenést definitivní ostění.

Základní otázkou životnosti primárního ostění je vliv agresivity prostředí nejen na jednotlivé prvky primárního ostění (stříkaný beton, výztužné rámy a sítě), ale i prvky vyztužující horninový prstenc v okolí výrubu. V České republice je při návrhu definitivního ostění zpravidla postupováno podle druhého přístupu a definitivní ostění plně přebírá zatížení z primárního ostění, které je považováno za dočasné. Odpověď na míru degradace primárního ostění po desítkách let od provedení mohou dát výzkumy prováděné v současné době v Rakousku, kde jsou v rámci zvýšení bezpečnosti provozu raženy druhé tunelové trouby tunelů, které byly uvedeny do provozu před více než 30 lety. Při provádění tunelových propojek, nebo při sanaci ostění stávajících tunelových trub lze odebírat vzorky primárního ostění a podrobit je analýze. Dosavadní výsledky laboratorních zkoušek ukazují, že degradace stříkaného betonu primárního ostění nepostupuje zdaleka tak rychle, jak se předpokládalo a jak beton, tak ocel plní stále svou nosnou funkci [10]. Odpověď na životnost ostění ze stříkaného betonu lze nalézt také na řadě skandinávských tunelů, kde se monolitické sekundární ostění prakticky nepoužívá. I přes přímé vystavení vlivům prostředí jak ze strany horninového masivu, tak dopravního prostoru je i po mnoha letech stále v požadované kvalitě. Další text se však bude zabývat nevyztuženým definitivním ostěním jako jediným nosným prvkem zajišťujícím stabilitu tunelu po dobu jeho životnosti (100 let).

2.2 Princip návrhu železobetonového ostění

Při návrhu ostění a též i při určování kritérií, jimž má ostění z nevyztuženého betonu vyhovovat, je potřeba vzít do úvahy rozdíly ve statickém působení mimostředně tlačené konstrukce

which would allow both parties to the contract to carry out changes during the construction legally and operatively. The excavation of a tunnel and the method of stabilising the excavation is what we mostly understand under the term "optimisation of a technical solution with respect to geotechnical conditions". Not less important role in terms of laboriousness, minimisation of risks during works execution and the final amount of investment costs is played by the technical solution of the final lining. Even in this case is it possible to speak about the NATM as an observational method. It is possible to create a mathematical model approximating realistic conditions on the basis of the results of geotechnical measurements conducted during the underground excavation, condition surveys of the faces of individual excavation advance rounds and responsible determination of geotechnical parameters of the ground mass, thus obtaining the inner forces required for the design of the amount of reinforcement or for the application of an unreinforced concrete lining.

2. DIFFERENCES IN DESIGNING REINFORCED CONCRETE AND UNREINFORCED CONCRETE LININGS

2.1 Two approaches to the function of primary and final linings

No unambiguous opinion exists among the technical public on the load-carrying function of the primary and final (secondary) linings. Supporters of the basic load-carrying function of the primary lining stand on one side. They assign it, in cooperation with the ground ring stabilised with anchors, the capability of transmitting ground pressure throughout the tunnel design life. In such a case, the final lining fulfils only the facing and aesthetic role because it is loaded only by its own weight and effects of volumetric changes. Only in the cases of pressure insulated tunnels they have to resist hydrostatic pressure as well. The Pisárky tunnel in the Czech Republic was constructed under these assumptions. High-durability fibreglass anchors were used for reinforcing the ground ring. Supporters of the theory of total degradation of the primary lining stand on the other side. In their opinion, the primary lining loses its load-carrying function earlier than the assumed life period ends and all loads have to be carried by the final lining.

A fundamental issue of durability of the primary lining is the effect of aggressive environment not only on the individual components of the primary lining (shotcrete, supporting frames and welded mesh), but also on the elements reinforcing the ground ring in the excavation surroundings. In the Czech Republic the latter approach is usually applied to designing the final lining and the final lining fully takes the loading from the primary lining that is considered to be temporary. An answer regarding the degree of degradation of the primary lining after tens of years can be obtained from a research conducted currently in Austria, where the second tubes of tunnels, which were opened to traffic over 30 years ago, are driven in order to improve operation safety. It is possible to collect samples of the primary lining during the building of cross passages or repairs of linings of existing tunnel tubes and analyse them. Recent results have proved that the speed of degradation of the primary lining shotcrete is far from the assumptions and both the concrete and steel keep fulfilling their load-carrying function [10]. An answer regarding the durability of shotcrete linings can, in addition, be found on numerous Scandinavian tunnels, where cast-in-place secondary lining is virtually unused. The required lining quality remains even after many years

ze železového či nevyztuženého betonu. V případě železobetonového ostění dochází při odpovídajícím využití tažené výztuže v přilehlém betonu ke vzniku a vývoji trhlin, neboť již při malém přetvoření tažených vláken průřezu dochází k překročení tahové pevnosti betonu. Při posouzení průřezu je proto zaveden předpoklad vyloučení taženého betonu a přenos tahových napětí v průřezu pouze samotnou výztuží. K výpočtu vnitřních sil, na něž je ostění navrhováno, však v případě železobetonu postačuje lineární materiálový model, což znamená, že tuhosti průřezů ostění nejsou vznikem a vývojem trhlin ovlivněny a vstupují do výpočtu svými plnými (počátečními, neredukovanými) hodnotami. Výsledná poloha tlakové normálové síly může za těchto okolností být i mimo hranice průřezu.

2.3 Princip návrhu nevyztuženého ostění

Odlišná situace nastává v případě nevyztuženého ostění. Pokud ostění z nevyztuženého betonu je modelováno lineárním materiálovým modelem, je nevyhnutelným výsledkem návrhu nevhodně velká tloušťka ostění. V takové situaci je na vině neuspokojivého výsledku nedostatečný a málo sofistikovaný výpočetní model, při jehož použití je ostění navrhováno podle tahové pevnosti betonu. Ta je o řád nižší než pevnost tlaková, která ale ve skutečnosti o únosnosti rozhoduje. Proto je nutno přikročit k výpočtu s nelineárním modelem ostění, kde je zohledněn vznik trhlin a případná plastifikace průřezů. Úlohu je možno řešit například pomocí MKP s plošnými prvky, nebo též pomocí jednoduššího prutového modelu ostění.

V modelech, v nichž se uvažuje v oblasti trhliny s úplným vyloučením přenosu tahů, leží výslednice normálových napětí vždy uvnitř průřezu, a o únosnosti ostění rozhoduje výhradně tlaková pevnost betonu. To vede k subtilnějšímu ostění, a tedy i hospodárnějšímu návrhu.

V naznačeném způsobu výpočtu nevyztužených ostění se k výsledkům dochází pomocí iteračního procesu. V jeho průběhu se vypočítává stav napjatosti a deformací v průřezu za předem přijatých předpokladů. Například na prutové soustavě s nelineárním materiálovým modelem ostění se po vzniku trhliny předpokládá lineární průběh napětí v tlačené oblasti průřezu; při dalším přitěžování je nejprve dosaženo návrhové pevnosti betonu v tlaku u krajních vlákních a poté začíná fáze postupné plastifikace materiálu, která je ukončena dosažením mezního stavu únosnosti průřezu. Pro vývoj deformací je přijat předpoklad rovinného přetváření průřezu.

Ve výše uvedeném textu je možno shledat některé rozdíly, se kterými lze přistoupit ke statickému návrhu ostění vyztuženého či nevyztuženého. Některé rozdílnosti je potřeba pak uplatnit i ve fázi posuzování a vyhodnocování úspěšnosti návrhu ostění. Důležitou oblastí, které se toto konstatování dotýká, je hodnocení trhlin v ostění.

2.4 Rozdíl v přístupu k šířce trhlin u vyztuženého a nevyztuženého ostění

Jedním z kritérií, podle nichž se funkce či kvalita provedení ostění posuzuje, je šířka trhlin, resp. jejich počet v určité oblasti tunelového profilu (např. vrchol klenby, bok tunelu). V tomto místě je nutno poznamenat, že samotný vznik trhliny způsobený přímým (statickým) zatížením není potřeba považovat za závadu či poruchu. Naopak vznik trhlin je obvyklým jevem a vyplývá z principů a přijatých předpokladů o statickém působení železobetonové či pouze betonové konstrukce. Existují však aspekty, které je v tomto ohledu potřebné sledovat, a ty jsou pro oba typy ostění rozdílné.

V případě železobetonových ostění je šířka trhliny limitována a hodnoty, jež nemají být překročeny, jsou k nalezení v příslušných normách a předpisech. Hlavním smyslem ome-

despite direct exposure to effects of the environment from the side of both the ground mass and the road space. In the text below we will deal with unreinforced concrete final lining as the only load-carrying element providing stability to a tunnel throughout its life (100 years).

2.2 Principle of designing reinforced concrete linings

When a lining is being designed and criteria for the unreinforced concrete lining are being determined, it is necessary to take into account the differences in the static action of an eccentrically compressed reinforced concrete or an unreinforced concrete structure. In case of the reinforced concrete lining, cracks start and develop at adequate exploitation of tensile reinforcement in adjacent concrete because the tensile strength of concrete is exceeded already at a small strain of tensile fibres in the section. For that reason, an assumption is introduced that concrete in tension is excluded and tensile stresses in the section are transmitted solely by reinforcing bars. However, a linear material model is sufficient for the calculation of inner forces for which the lining is being designed; it means that the stiffness values of lining sections are not affected by the formation of cracks and the full (initial, unreduced) values enter the calculation. The resultant position of the normal force can be under these conditions even outside the section boundaries.

2.3 Principle of designing unreinforced concrete lining

A different situation is in the case of an unreinforced concrete lining. If the unreinforced concrete lining is modelled using a linear material model, the unavoidable result of the design is an uneconomically great thickness of the lining. In such a case the insufficiently sophisticated calculation model where the lining is designed according to the tensile strength of concrete is blamed for the unsatisfactory result. Tensile strength is smaller by an order of magnitude than compressive strength. However, the compressive strength is in reality crucial for the bearing capacity. For that reason it is necessary to proceed to calculation with a non-linear model of the lining, where the cracks and potential plastification of the sections are taken into account. The problem can be solved, for example, using the FEM with planar elements or even using a simpler beam-based model of the lining.

In the models where total exclusion of tension is assumed in the area of the crack, the resultant of normal stresses always lies inside the section and the bearing capacity exclusively depends on the compression strength of concrete. It leads to a thinner lining, thus also to a more economic design.

In the method of calculation of unreinforced concrete lining outlined above, the results are arrived at by means of an iteration process. The state of stress and deformations in the section is calculated under predefined assumptions. For example, on a beam-based model of a structure with a non-linear model of the lining, a linear distribution of stress is assumed in the compression zone of the section; during additional loading, the design compression strength of concrete is first reached in the outermost fibres and, subsequently, the phase of gradual plastification of the material starts. It ends by reaching the ultimate limit state of the section. The assumption of planar section deformation is adopted for the development of deformations.

In the text above it is possible to find some differences in the approach to the structural design of a reinforced or unreinforced concrete lining. However, some differences must be applied even in the phase of evaluation of success of the lining design. The assessment of cracks in the lining is an important issue related to this statement.

zení šířky trhliny je v tomto případě ochrana ocelové výztuže a zabránění její koroze. Pro různé typy prostředí, v nichž se ostění může nacházet, a druhy látek, které výztuž mohou ohrozit, jsou doporučeny limitní hodnoty. Při dodržení těchto předepsaných hodnot společně s dostatečným krytím je možno předpokládat, že bude zabráněno průniku škodlivých látek do oblasti výztuže, a nedojde tak k narušení nosné funkce ani trvanlivosti konstrukce, která je v případě tunelových staveb uvažovaná 100 let. Dalším kritériem pro omezení šířky trhlin je případné nepříznivé ovlivnění vzhledu konstrukce.

K jiné situaci dochází v případě nevyztuženého ostění. Zůstává sice nadále požadavek na ničím nenarušenou nosnou funkci průřezu, tu však zajišťuje jako jediný konstrukční prvek samotný beton. Odpadá zde přenos sil pomocí ocelové výztuže, a kritéria, vztahující se k trhlinám a stanovená pro železobeton, ztrácejí svůj význam. Hlavním požadavkem pro funkci nevyztuženého ostění je bezpečný přenos sil v betonovém průřezu, což musí být zajištěno především dostatečnou výškou tlačené oblasti odpovídající konkrétním napjatostním poměrům v průřezu. Výsledná šířka trhliny tak může v porovnání se železobetonovým průřezem být v různých stavech napjatosti odlišná a větší. Stejně jako u železobetonu může být ale omezena šířka trhlin požadavky na vzhled konstrukce.

Obecně je z hlediska statiky možnost řešení tunelového ostění jako nevyztuženého závislá na několika faktorech.

Především se jedná o spolehlivé ocenění geologických poměrů. I zahraniční předpisy konstatují možnost aplikace ostění z nevyztuženého betonu pouze v příznivých geologických a geotechnických poměrech. V případě geologických poruch s dopadem na velikost a rozdílnou intenzitu zatížení po obvodu tunelu, či v příportálových úsecích se předpokládá použití železobetonu.

Dalším z důležitých faktorů úspěšného návrhu je geometrie tunelového profilu a tvar ostění. Na tento parametr je právě v případě nevyztuženého betonu konečný úspěch návrhu velmi citlivý. Je však zřejmé, že jen málokdy je možno přizpůsobit tvar ostění pouze a jen potřebám z hlediska statiky. Ve výpočtu ostění, jež staticky vyhovuje, je dosaženo konvergence iteračního procesu a výsledné polohy normálové síly uvnitř průřezu. Není-li výpočtem dosaženo rovnováhy (v případě železobetonu je možno řešit přidáním výztuže), je pro nápravu k dispozici pouze jiný tvar ostění, větší tloušťka průřezu, nebo přechod od ostění nevyztuženého k ostění vyztuženému.

Zejména v případě neuzavřených profilů je důležité pečlivě určit okrajové podmínky působení ostění v oblasti uložení klenby na základových pasech. Za vhodné je považováno v takovém případě řešit tunelový profil komplexně, tj. společně klenbu ostění a základový pás (patku).

3. ZÁSADY PŘI NÁVRHU RECEPTURY BETONU NEVYZTUŽENÉHO OSTĚNÍ

Vznik trhlin v prostém betonu je materiálově předurčen především nízkou tahovou pevností materiálu. Jedná se o vlastnost, kterou lze bez použití výztuže jen obtížně ovlivnit. Prostředkem pro omezení vzniku trhlin způsobených objemovými změnami je vhodný návrh receptury betonu s nízkým hydratačním teplem a pomalým nárůstem pevnosti v počátečních hodinách po betonáži. Redukce velikosti hydratačního tepla lze dosáhnout dodržením několika pravidel. Na snížení hydratačního tepla má pozitivní vliv nízký obsah cementu cca v rozmezí 250–280 kg/m³, použití vhodného cementu s nízkým obsahem C₃A, použití popílku jako přísady do betonu (cca 50–80 kg/m³) a návrh takové směsi, která dosahuje při zkouškách v laboratoři na izolovaných kostkách maximálního

2.4 Difference in the approach to the width of cracks in reinforced and unreinforced concrete linings

One of the criteria for assessment of the function and building quality of the lining is the width of cracks and their number in a certain area of the tunnel profile (e.g. the top of arch, a tunnel sidewall). Here it is necessary to note that the formation of a crack caused by direct (static) loading does not have to be considered as a defect or failure. Rather the contrary, the origination of cracks is a usual phenomenon arising from the principles and adopted assumptions regarding the static action of a reinforced concrete or only unreinforced concrete structure. Nevertheless, there are some aspects which must be monitored in this respect and they are different for both of the lining types.

In case of reinforced concrete linings, the crack width is limited and the values which are not to be exceeded can be found in respective standards and regulations. The main purpose of limiting the crack width is in this case to protect the steel reinforcement and to prevent its corrosion. Limit values are recommended for various types of the environment in which the lining may be located and for those kinds of substances which can threaten the reinforcement. When these prescribed values are fulfilled and the concrete cover is sufficient, it is possible to expect that the penetration of harmful matters into the area of the reinforcement will be prevented and neither the load-carrying function nor the durability of the structure, which is planned for 100 years in the case of tunnel structures, will be disturbed. Another criterion for limiting the width of cracks is the potential unfavourable influence on the structure appearance.

Another situation occurs in the case of an unreinforced concrete lining. The requirement for the undisturbed load-carrying function of the section remains the same, but this function is ensured by the concrete itself as the only structural element. The transition of forces by means of steel reinforcement ceases to exist in this case and the criteria relating to cracks and determined for reinforced concrete lose their significance. The main requirement for the function of an unreinforced concrete lining is the safe transition of forces in the concrete section, which has to be ensured mainly by the sufficient depth of the compression zone corresponding to particular stress conditions in the section. The resulting crack width therefore can be different and greater under various stress states in comparison with a reinforced concrete section. Just as with reinforced concrete, this width may be limited by requirements for the structure appearance.

In general, the possibility of designing the tunnel lining as an unreinforced structure depends on several factors.

Above all, it is a reliable assessment of the geological conditions. The possibility of applying unreinforced concrete linings only in favourable geological and geotechnical conditions is accepted even in foreign regulations. It is assumed that reinforced concrete is used in the cases of geological faults with an impact on the magnitude and different intensity of loads acting around the tunnel circumference.

Another factor important for a successful design is the geometry of the tunnel excavation cross-section and the shape of the lining. It is especially in the case of unreinforced concrete that the success of the design is very sensitive to this parameter. But it is obvious that only seldom is it possible to adapt the shape of the lining purely to the needs of statics. The convergence of the iteration process and the final position of the normal force inside the section are achieved in the calculation of a lining which is statically satisfactory. If the

teplotního rozdílu do 15 K. Počáteční teplota směsi by měla být přiměřeně nízká (13 – 18 °C), neměla by být větší než max. 25 °C.

V zahraničí je zcela běžné, že pro dosažení optimálních hodnot navrhované směsi pro nevyztužená ostění se používá kombinace více různých cementů. Dále je třeba volit nízký obsah vody v intervalu cca 170–190 kg/m³, zvýšit podíl jemných částic – cement, popílek, jemné kamenivo <0,125 mm na objem >370 kg/m³, omezit prachové částice, zajistit kamenivo o frakci 4/8 mm v doporučeném množství cca 3–5 %, udržet poměr w/c maximálně na hodnotě 0,63 a používat pokud možno kamenivo s nízkým součinitelem tepelné vodivosti. V případě nevyztuženého ostění se doporučuje použít frakci kameniva D=32 mm.

Z hlediska vzniku trhlin je důležitá i nízká odbedňovací pevnost. Vzhledem k tomu, že betonáž definitivního ostění probíhá zpravidla po ustálení deformací primárního ostění a definitivní ostění není zatíženo horninovým tlakem, není proto ze statického hlediska nutné, aby konstrukce vykazovala konečnou pevnost již po 28 dnech. Lze předpokládat, že statickým výpočtem uvažovaná hodnota zatížení na něj dolehne až po úplné degradaci primárního ostění, pokud k ní vůbec někdy dojde. Pro návrh směsi je výhodné, pokud je možné použít „pomalou“ recepturu betonu s nízkým hydratačním teplem a koncovou pevností po 56, nebo dokonce 90 dnech.

4. POSUZOVÁNÍ KVALITY POVRCHU NEVYTUŽENÉHO OSTĚNÍ A SMLUVNÍ KRITÉRIA

4.1 Příčiny vzniku trhlin a jejich vliv na funkci ostění

Nevyztužené tunelové ostění je v České republice stále ještě spíše raritou, než obecně přijímanou zvyklostí. Často diskutovanou otázkou je počet, směr, hloubka a šířka trhlin, které



foto / photo courtesy of Libor Mařík

Obr. 1 Vertikální trhlina na boku ostění vzniklá smršťováním betonu
Fig. 1 Vertical crack on the side of the lining caused by concrete shrinkage

equilibrium is not achieved in the calculation (in the case of reinforced concrete it is possible to solve it by additional reinforcement), the only way of remedy available is changing the shape of the lining, designing a greater section thickness or a change from unreinforced to reinforced concrete lining.

It is particularly important in the case of unclosed tunnel profiles to thoroughly determine the boundary conditions to describe the contact of the vault and footings. In such a case, we consider it to be correct if the tunnel profile is analysed comprehensively, i.e. jointly with the lining vault and the footing.

3. PRINCIPLES OF DESIGNING CONCRETE MIX FORMULA FOR UNREINFORCED CONCRETE LINING

From the aspect of material, the formation of cracks in unreinforced concrete is predestined first of all by the low tensile strength of the material. It is a property which can be changed only with difficulty without the use of steel reinforcement. The means for limiting the formation of cracks caused by volumetric changes during the initial hours after casting of concrete is a correct design of the concrete mix formula with low hydration heat and slow strength gain. The reduction of the hydration heat magnitude can be achieved by adhering to several rules. Reducing the hydration heat is positively affected by the low content of cement ranging from ca 250 to 280kg/m³ and by the use of suitable cement with low content of C₃A, the use of fly ash as a concrete improving admixture (ca 50–80kg/m³) and the design of such a mixture which reaches the maximum temperature difference up to 15K during laboratory tests on insulated cubes. The initial temperature of the mixture should be moderately low (13–18°C) and it is recommended that the fresh concrete temperature should not be higher than 25°C.

It is quite common abroad that a combination of several different cement types is used to achieve optimum values of the mixture being designed for unreinforced concrete linings. In addition, it is necessary to choose low water content within the interval of ca 170–190kg/m³ to increase the proportion of fine particles – cement, cinder, fine aggregate <0.125mm to the volume >370kg/m³, to limit the amount of silt particles, to provide 4/8mm fraction aggregates in the recommended amount of ca 3–5%, to maintain the w/c ratio at 0.63 as the maximum and to use aggregates with a low coefficient of thermal conductivity as much as possible. The use of aggregate fraction D=32mm is recommended in the case of an unreinforced concrete lining.

Even the low concrete strength at formwork stripping is important as far as the formation of cracks is concerned. With respect to the fact that the final lining concrete is usually cast after the stabilisation of the primary lining deformations and the final lining is not loaded by ground pressure, it is not necessary from the static point of view for the structure to exhibit the required terminal strength value already after 28 days. It is possible to expect that the value of loading assumed by the calculation will act on the lining later, after the complete degradation of the primary lining, if ever. It is advantageous for the mixture design if it is possible to use a “slow” concrete formula with low hydration heat and the terminal compressive strength is reached after 56 or even 90 days.

v ostění vznikají. Lze je rozdělit do několika typů, těmto typům přisoudit význam a s určitou mírou zjednodušení i příčinu vzniku. První příčinou vzniku jsou objemové změny betonu, ke kterým patří jednak smršťování, jednak teplotní změny v době betonáže vlivem hydratačního tepla a v průběhu životnosti tunelu vyvolané střídáním teplot podle ročních období. Druhou příčinou vzniku trhlin je statické zatížení působící na konstrukci.

Trhliny způsobené objemovými změnami betonu jsou buď vertikální trhliny zpravidla na bocích tunelu, které mohou v některých případech probíhat přes celou klenbu ostění, nebo všesměrné „pavučinové“ trhliny na celé ploše konstrukce. Příklad smršťovací, vertikální trhliny ukazuje obr. 1. Trhliny od statického zatížení jsou zpravidla orientované ve směru osy tunelu (horizontální). Obvykle se tvoří ve vrcholu klenby, v závislosti na velikosti zatížení a poměru svislého a bočního tlaku se mohou vyskytovat i na bocích tunelu. Skutečnost je taková, že obě příčiny vzniku trhlin nejde od sebe striktně oddělit. Velikost trhliny od statického působení ovlivňuje i napjatost ostění vlivem smršťování betonu a naopak.

Dvojitý je i přístup k posuzování trhlin z hlediska funkčnosti ostění. Je třeba rozlišit především směr trhliny. Vertikální trhliny neovlivňují zásadním způsobem statické působení ostění. Jejich funkci je možné si představit jako rozdělení ostění na kratší bloky, jejichž statická funkce se v příčném směru nemění. Hlavní kritérium je v tomto případě estetické. Je to dohoda mezi zhotovitelem a objednatelům o tom, jakou má představu o vzhledu povrchu ostění. Naproti tomu trhliny od statického zatížení mohou přímo ovlivňovat statickou funkci ostění. Při jejich vzniku se v ostění vytváří částečný kloub, dochází ke změně statického schématu konstrukce a změně průběhu vnitřních sil, zejména ohybových momentů. Při prakticky nezměněné normálové síle se zmenšuje tlačенá oblast průřezu ostění. V takovém případě je nutné konstrukci posoudit a přípustnou šířku i hloubku trhliny stanovit na základě statického výpočtu. Kromě posouzení tlačенé oblasti průřezu je nutné posoudit i nebezpečí vzniku druhotných trhlin, které vznikají v ostění kolmo na směr radiálních trhlin a mohou způsobit vypadávání takto poškozených částí. Zde vzniká riziko především z hlediska bezpečnosti provozu. Tento jev je popsán např. v literatuře [9].

4.2 Posuzování kvality nevyztuženého ostění v České republice

Zatímco v Rakousku nebo Německu je problematika posuzování trhlin známá a obsažená ve směrnících a předpisech,



foto / photo courtesy of Libor Mařík

Obr. 2 Povrchové dutiny v dolní části ostění
Fig. 2 Surface cavities in the lower part of the lining

4. ASSESSING THE QUALITY OF THE SURFACE OF UNREINFORCED CONCRETE LINING AND CONTRACTUAL CRITERIA

4.1 Causes of the formation of cracks and their influence on the function of linings

An unreinforced concrete tunnel lining is still rather a rarity than a generally established practice in the Czech Republic. An often discussed issue is the number, orientation, depth and width of cracks in a lining. We can divide the cracks into several types, assign significance to these types and, with a certain degree of simplification, even the cause of their origin. The first cause of their formation lies in volumetric changes of concrete – shrinkage, temperature changes during concrete casting due to hydration heat and, during the tunnel life, due to the temperature changes corresponding to the seasons. Another cause of the formation of cracks lies in the static loads acting on the structure.

Cracks due to volumetric changes of concrete are either vertical cracks usually on the tunnel sides, which can in some cases run across the whole lining vault, or directionless “cobwebby” cracks in the whole area of the structure. An example of a vertical shrinkage crack is presented in Fig. 1. Cracks due to static loading are usually oriented in the direction of the tunnel axis (horizontal). They are usually created in the vault crown; they can appear even on the tunnel sides, depending on the loading intensity and proportion between the vertical and lateral pressure. In reality, the two causes of the formation of cracks cannot be strictly distinguished one from the other. The size of a crack due to a static action is affected by the state of stress in the lining due to concrete shrinkage and vice versa.

The approach to assessing cracks from the point of view of the lining functionality is also double. First of all, it is necessary to distinguish the crack direction. Vertical cracks do not fundamentally influence the static action of the lining. It is possible to imagine their function as splitting of the lining into shorter blocks, the static function of which does not change in the transverse direction. The main criterion in this case is aesthetic. It is a matter of an agreement between the contractor and the client about the client's idea of the lining surface appearance. On the contrary, cracks due to static loading may directly affect the static function of the lining. When they start, an imperfect hinge develops in the lining, the statical schema of the structure changes as well as the distribution of inner forces, mainly bending moments. With the normal force almost unchanged, the compression zone of the lining section is reduced. In such a case it is necessary to assess the structure and determine the allowable width and depth of the crack on the basis of a structural analysis. Apart from assessing the compression zone of the section it is necessary to assess also the danger of secondary cracks formation in the lining perpendicularly to the direction of radial cracks, which may cause falling of the parts thus damaged from the lining. It is dangerous first of all with respect to the operation safety. This phenomenon is described in Reference [9].

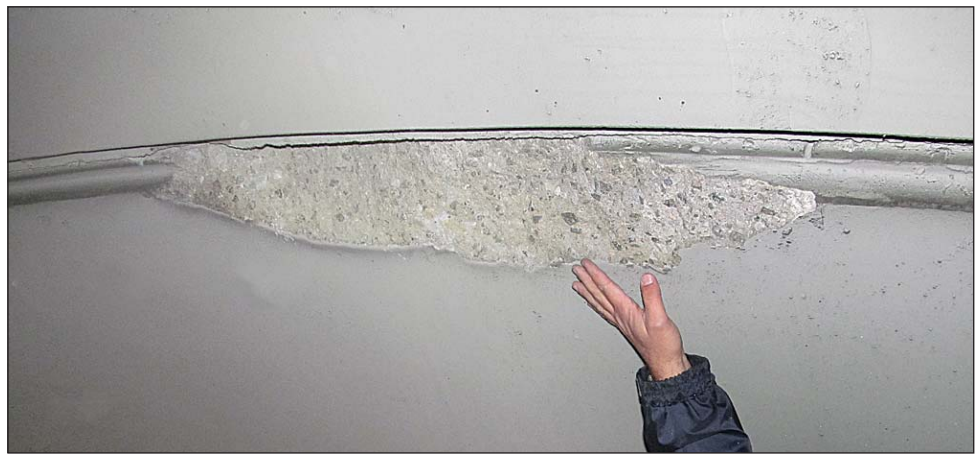
4.2 Assessing the quality of unreinforced concrete linings in the Czech Republic

Whilst in Austria and Germany the problems of assessing cracks are known and contained in directives and regulations, no regulation defining the relationship between the client and the contractor during the final acceptance at the end of the warranty period existed in the Czech Republic until the end of 2015. In a better case, the allowable parameters of the lining

neexistoval v České republice do konce roku 2015 předpis, který by v této oblasti smluvně upravoval vztah mezi investorem a zhotovitelem při přebírání díla na konci jeho záruční doby. V lepším případě byly přípustné parametry povrchu ostění a trhlin definovány v zadávací dokumentaci, v horším případě byla pravidla stanovena až v průběhu výstavby. V takovém případě jde zhotovitel tunelu do rizika předem nedefinovaného rozsahu případných sanačních prací. Při zodpovědném přístupu si toto riziko v nabídce na realizaci díla ocení, čímž dochází ke zbytečnému zvyšování investičních nákladů.

V případě železničních tunelů tento stav stále trvá, u silničních a dálničních tunelů došlo ke změně po vydání revize technických kvalitativních podmínek (TKP) Ministerstva dopravy č. 18 – Betonové konstrukce a mosty v lednu 2016. Text předpisu připouští použití nevyztuženého betonu jako konstrukčního materiálu a obsahuje nejen kritéria přípustného vzniku trhlin, ale i požadavky na kvalitu povrchu nevyztuženého ostění. Na povrchu nevyztuženého ostění jsou přípustné dutiny (bubliny) s uzavřeným povrchem max. o průměru 25 mm, nebo plochy max. 5 cm² a hloubky max. 10 mm. Příklad těchto dutin je na obr. 2. Dutiny na povrchu ostění je nutno sanovat, pokud jeden z jejich rozměrů (průměr, plocha, hloubka) přesáhne daný limit. Pro návrh opravy platí, že povrchová oprava betonu, například broušením, pokud je možná, je lepší a trvanlivější, než tenká vrstva sanační hmoty. Ta může v případě odtržení od podkladu způsobit pádem na projíždějící automobil daleko větší škodu, než kterou představuje nedokonalý povrch ostění. To platí zejména pro oblast vrcholu klenby tunelu nad komunikací. Lom betonu na hranách pracovních nebo dilatačních spár a/nebo blízko trhlin se posuzuje z hlediska jeho polohy v ostění. Jde-li trhlina neznámé hloubky ve vzdálenosti 200 mm nebo menší od pracovní nebo dilatační spáry nebo jiné nejbližší trhliny, je nutné předpokládat možnost odlomení části betonu ostění. Tvoří-li trhlina a pracovní nebo dilatační spára a/nebo více trhlin spojitý uzavřený tvar, vymežující možnost odlomení nebo uvolnění části betonu (obr. 3), bude se šířka trhliny (včetně nekonstrukční trhliny) sledovat při běžných prohlídkách nejméně 1x ročně, pokud její šířka nepřesáhne 0,2 mm. Při šířce trhliny od 0,2 do 0,8 mm se bude sledovat při mimořádných prohlídkách 1x za 3 měsíce a při šíři nad 0,8 mm je nutno navrhnout a provést opatření (např. opravu dotčeného úseku ostění). Odštěpky a uvolněné části betonu, zejména na hranách pracovních nebo dilatačních spár a/nebo trhlin, jsou považovány za vadu bránící bezpečnému provozu a musí být opraveny před uvedením do provozu.

U nevyztuženého ostění je maximální hloubka konstrukčních trhlin dána požadavkem na minimální tloušťku tlačené zóny účinného průřezu betonu a musí být stanovena na základě statického výpočtu pro konkrétní případ. Hloubka nekonstrukčních trhlin vyztuženého ostění není omezena a může procházet přes celou tloušťku ostění. Trhliny v ostění žádného z uvedených typů nesmí procházet kotvami do betonu, které slouží například pro upevnění technologického vybavení tunelu. V případě nevyztuženého ostění je nutné trhliny vyplňovat v případě, kdy není prokázána jejich nezávadnost z hlediska



Obr. 3 Uvolněná část ostění u spáry mezi bloky betonáže

Fig. 3 Loosened part of the lining at the joint between concrete casting blocks

foto / photo courtesy of Viktor Petráš

surface were defined in tender documents, whilst, in a worse case, the rules were set later, in the course of the construction. In such a case, the contractor takes the risk of an undefined scope of potential rehabilitation work. In case of a responsible attitude, the contractor evaluates this risk and incorporates it in the bid for execution of the works, thus the investment cost is unnecessarily increased.

In case of railway tunnels this situation still exists, in case of road and motorway tunnels it changed after the issuance of a review of Technical Specifications of the Ministry of Transportation No. 18 – Concrete Structures and Bridges in January 2016. The regulation allows use of unreinforced concrete as a structural material and contains not only criteria for the allowable formation of cracks, but also requirements for the quality of the unreinforced concrete lining surface. Cavities (bubbles) with closed surface and maximum diameter of 25mm or maximum area of 5cm² and maximum depth of 10mm are permissible on the surface of an unreinforced concrete lining. An example of these cavities is presented in Fig. 2. Cavities in the lining surface have to be treated if one of their dimensions (diameter, area, depth) exceeds the respective limit. The repair of concrete surface in the repair design, for example by grinding, if possible, is better and more durable than a thin layer of a repair material. Such a layer may cause a far greater damage if it breaks away from the substrate and falls on a passing vehicle than an imperfect surface of the lining. It applies first of all to the area at the tunnel vault crown above the roadway. Breaking of concrete at the edges of construction or expansion joints and/or in the vicinity of cracks is assessed from the point of view of its location in the lining. If a crack of unknown depth is located at a distance of 200mm or smaller from a construction or expansion joint or another closest crack, it is necessary to assume that a part of the lining concrete can break off. If the crack and the construction or expansion joint and/or more cracks form a continuous closed shape delimiting the possibility of breaking away or loosening a part of concrete (see Fig. 3), the crack width (including a non-structural crack) will be monitored during regular inspections at least once a year, unless the width exceeds 0.2mm. At the width ranging from 0.2 to 0.8mm the crack will be monitored during extraordinary inspections 1x in 3 months and, at the width over 0.8mm, it is necessary to design and implement measures (for example a repair of the particular section of the lining). Spalls and loosened parts of concrete, first of all those loosened from the edges of construction or expansion joints and/or cracks, are considered to be a defect

Tab. 1 Maximálně přípustné hodnoty trhlin nevyztuženého ostění
 Table 1 Maximum permitted values for cracks in unreinforced concrete linings

maximální přípustné hodnoty sledovaných parametrů poruch ostění z nevyztuženého betonu maximum permitted values of monitored parameters of defects of unreinforced concrete linings	jednotka unit	stav při převzetí criterion at final acceptance	stav na konci záruční doby criterion at the end of warranty	stav na konci životnosti criterion at the end of design life	
trhliny konstrukční structural cracks	šířka trhlin (horizontálních) width of cracks (horizontal)	[mm] [mm]	0,5 0.5	1 1	1,5 1.5
	hloubka trhlin depth of cracks	[mm] [mm]	určí statický výpočet to be determined by structural analysis		
	svislý posun (kolmo k ose tunelu) vertical displacement (perpendicularly to tunnel axis)	[mm] [mm]	1 1	2 2	3 3
	vodorovný posun (kolmo k ose tunelu) horizontal displacement (perpendicularly to tunnel axis)	[mm] [mm]	1 1	2 2	3 3
	počet trhlin v sekci délky 12 m (horizontálních) number of cracks (horizontal) in a 12m long section	[ks] [pcs]	3 3	4 4	5 5
trhliny nekonstrukční non-structural cracks	šířka trhlin (vertikálních) width of cracks (vertical)	[mm] [mm]	2 2	3 3	3 3
	hloubka trhlin depth of cracks	[mm] [mm]	až na plnou tloušťku ostění up to the full lining depth		
	počet trhlin na délku sekce délky 12 m (vertikálních, které probíhají přes celou klenbu) number of cracks in a 12m long section (vertical, running across the whole vault)	[ks] [pcs]	2 2	2 2	2 2

únosnosti a použitelnosti konstrukce a/nebo jejich rozměry překračují povolené hodnoty uvedené v tab. 1.

4.3 Příklady kritérií ze zahraniční praxe

V České republice je v současné době nevyztužené definitivní ostění použito na Pisáreckém tunelu v Brně, tunelu Libouchec na dálnici D8 spojující Prahu a Drážďany, na obou troubách Vítkovských železničních tunelů v Praze a na tunelech Olbramovickém, Tomickém I. a Sudoměřickém na čtvrtém železničním koridoru, který vede z Prahy směrem na Lince. Na těchto tunelech probíhají sledování vzniku trhlin bez výrazných negativních zkušeností. Dlouhodobé sledování však zatím není k dispozici.

Relativně malá zkušenost s použitím nevyztuženého ostění v ČR ve srovnání s alpskými zeměmi, kde jsou ekonomicky navrhované tunely nutností pro zajištění dopravní infrastruktury, zřejmě vede ke stanovení podrobnějších kritérií pro posuzování trhlin v ostění. Jedná se především o definování počtu trhlin na blok betonáže, ale i o podrobné definování času, ke kterému se šířka trhliny vztahuje. Výhodou je transparentní vztah mezi objednatel a zhotovitelem při případných reklamních řízeních. V zahraničních předpisech jsou kritéria stanovena podstatně jednodušším způsobem, neboť zkušenosti ukazují, že použití nevyztuženého ostění není z hlediska provozování tunelu, nebo dokonce zajištění jeho stability rizikem.

Rakouský předpis [3] nepovažuje trhliny od objemových změn, nebo mechanických vlivů do šířky 1 mm za vady. Při větší šířce musí být trhliny posouzeny z hlediska trvanlivosti ostění, těsnosti a statického působení. Tento předpis však především uvádí možné vady vyztuženého i nevyztuženého ostění včetně fotodokumentace. Předepisuje také způsob jejich sanace.

Podle německého předpisu DB853 [7] je nutné injektovat nerozvětvené radiální trhliny širší než 2 mm, podélné trhliny na bocích nebo ve vrcholu klenby širší než 1,5 mm a trhliny

preventing safe operation and have to be repaired before opening to traffic.

In the case of unreinforced concrete lining the maximum depth of structural cracks is defined by the requirement for the minimum compression zone depth of the concrete section. It has to be determined on the basis of a structural analysis for the particular case. The depth of non-structural cracks in a reinforced concrete lining is not limited and can run throughout the lining thickness. Cracks in linings of all of the above-mentioned types must not pass across anchors to concrete serving, for example, to fix tunnel equipment. In the case of the unreinforced concrete lining it is necessary to fill cracks when their full load-carrying capacity and usability of the structure are not proved and/or when their dimensions exceed the permitted values presented in Table 1.

4.3 Examples of criteria from foreign practice

In the Czech Republic, the unreinforced concrete lining is at the moment found in the Pisárky tunnel in Brno, the Libouchec tunnel on the D8 motorway linking Prague and Dresden, both tubes of the Vítkov railway tunnels in Prague and the Olbramovice, Tomice I and Sudoměřice tunnels on the fourth railway corridor leading from Prague to Linz. The formation of cracks is being monitored in these tunnels without significantly negative experience. However, long-term monitoring is not available yet.

The relative lack of experience with the use of unreinforced concrete linings in the Czech Republic in comparison with the Alpine countries, where economically designed tunnels are necessary for securing the transport infrastructure, probably leads to the determination of more detailed criteria for assessing the cracks in linings. Above all, it is defining the number of cracks per concrete casting block, but also detailed defining the time to which the crack width is related. An

půlměsícového tvaru v blízkosti pracovních spár a kotevních prvků širší než 0,5 mm. V porovnání s tímto předpisem se kritérium přípustné šířky trhliny 0,5 mm uvedené v předpise [1] pro konstrukční, horizontální trhliny v době převzetí díla objednatelům jeví jako velmi přísné. Může být limitující v rozhodování o vyztužení, či nevyztužení tunelu a tím negativně ovlivnit cenu díla. Vhodnější by bylo nastavit kritérium stejné, jako na konci záruční doby, nebo stejně, jako v případě posuzování hloubky trhliny, požadovat statické posouzení. Důvodem je možný vznik druhotných trhlin, který uvádí literatura [8]. Dalším důvodem je skutečnost, že pokud ke vzniku trhliny nedojde bezprostředně po odbednění, je zpravidla způsobena zatížením konstrukce horninovým tlakem.

5. OPATŘENÍ PRO OMEZENÍ POVRCHOVÝCH VAD A VZNIKU TRHLIN NEVYZTUŽENÝCH OSTĚNÍ

V případě vyztuženého ostění lze šířku i hloubku trhliny do jisté míry řídit vhodným návrhem výztuže. V případě nevyztuženého ostění nelze u hospodárně navržených průřezů vzniku trhlin zabránit. Z hlediska statické funkce i použitelnosti konstrukce to není ani potřebné, pokud parametry trhliny nepřekročí staticky nebo smluvně definované meze. Vznik trhlin lze však při betonáži ostění omezit vhodně navrženou recepturou směsi, dodržováním konstrukčních zásad, technologickým postupem betonáže i vhodným ošetřováním ostění po odbednění.

Opatření pro omezení vzniku trhlin v pořadí bez váhy důležitosti:

1. zachování co možná nejplynulejšího tvaru líce primárního ostění bez zazubení;
2. použití mezilehlé izolace nebo separační fólie mezi primárním a definitivním ostěním;
3. zkrácení vzdálenosti mezi betonáží patek/spodní klenby a horní klenby ostění na technologicky možné minimum (optimálně 2 až 3 dny, přijatelné do 7 dní);
4. použití betonové směsi s nízkým hydratačním teplem;
5. použití betonové směsi s pomalým náběhem pevnosti v počátečním období po betonáži;
6. odbedňování bloku ostění při nízké pevnosti betonu (1,5 MPa až max. 3 MPa) s dobou odbednění cca 12 hod;
7. ošetřování betonu po odbednění se zaměřením na omezení vysychání a zmírnění tepelného šoku („klíma“ vozy);
8. použití bednicího vozu s pláštěm s dobrou tepelnou vodivostí (ocel);



foto / photo courtesy of Libor Mařík

Obr. 4 Trhлина tvaru půlměsíce ve vrcholu klenby
Fig. 4 Crescent crack at the vault crown

advantage is a transparent relationship between the client and the contractor in potential claim enforcing procedures. In foreign regulations the criteria are set in a substantially simpler way because of the fact that experience shows that use of an unreinforced concrete lining is not a risk from the point of view of the tunnel operation or even securing its stability.

The Austrian regulation [3] does not consider cracks due to volumetric changes or mechanical effects up to the width of 1mm to be defects. When the width is greater, the cracks have to be assessed in terms of durability of the lining, tightness and static function. First of all, this regulation defines possible defects of reinforced concrete and unreinforced concrete lining including photodocumentation. It, in addition, prescribes the way of their treatment.

According to a German regulation DB853 [7] it is necessary to treat unbranched radial cracks wider than 2mm, longitudinal cracks in the sidewalls or in the vault crown wider than 1.5mm and crescent cracks in the vicinity of construction joints and anchoring elements wider than 0.5mm by injecting grout into them. In comparison with this regulation the criterion for the permissible width of crack of 0.5mm contained in the regulation [1] for horizontal structural cracks at the moment of the final acceptance by the client appears to be very strict. It may be limiting when the decision about use of reinforced or unreinforced concrete is being made, thus negatively affecting the cost of the works. It would be more appropriate to set the same criterion as that for the end of the warranty period or, as in the case of assessing the crack depth, to require a static assessment. The reason is the possibility of formation of secondary cracks, which is described in Reference [8]. Another reason is the fact that when a crack does not start immediately after stripping, it is usually caused by the action of ground pressure on the structure.

5. MEASURES RESTRICTING SURFACE DEFECTS AND FORMATION OF CRACKS IN UNREINFORCED CONCRETE LINING

In the case of a reinforced concrete lining it is possible to a certain degree to control the width and depth of a crack by a suitable design of reinforcement. In the case of unreinforced concrete lining it is impossible to prevent from the formation of cracks in economically designed cross-sections. From the aspect of the static function and usability of the structure it is even unnecessary, unless the crack parameters exceed the statically or contractually defined limits. Nevertheless, the formation of cracks can be limited during the concrete casting process by designing a suitable formula, adhering to construction principles, a suitable concrete casting procedure and curing of the concrete lining after stripping.

Measures designed to limit the formation of cracks in an order without considering the weight of importance:

1. maintaining the geometry of the primary lining surface smooth and unbroken as much as possible (without toothing, edges);
2. using intermediate waterproofing or a separation membrane between the primary and final linings;
3. reducing the time lag between the casting of concrete for footings/invert and the lining upper vault to a technologically possible minimum (best between 2 and 3 days, acceptable up to 7 days);
4. using concrete mixture with low hydration heat;
5. using concrete mixture with slow gain of strength in the initial period after casting the concrete;

9. nízká počáteční teplota betonové směsi od 13 °C do 18 °C, za řízených podmínek je přípustných max. 25 °C;
10. doporučená délka bloku betonáže do 12,5 m.

5.1 Přípustné odchylky od teoretické tloušťky ostění

Nevyztužené ostění se zpravidla používá v úsecích tunelu situovaných v horninovém masivu, který umožňuje ražbu s delším záběrem, případně použití primárního ostění bez výztužných ráků. Tím dochází k technologicky podmíněným nadvýrubům a větším odchylkám od projektovaného tvaru výrubu. Výplň nadvýrubů se v rámci přípustných tolerancí provádí monolitickým betonem definitivního ostění. Při použití nevyztuženého ostění je třeba se vyvarovat příliš rychlé změny jeho tloušťky a zazubení primárního a definitivního ostění, které by mohlo do ostění vnášet nežádoucí složky tangenciálního napětí. V případě použití mezilehlé izolace většinou podmínky pro její pokládku současně splňují i požadavky na rovinatost povrchu líce primárního ostění. Druhým omezujícím kritériem, které zajišťuje plynulou změnu tloušťky definitivního ostění, je jeho přípustná odchylka od projektované tloušťky. Ta je například podle rakouské směrnice pro definitivní ostění 100 % teoretické tloušťky. Vzhledem k tomu, že teoretická tloušťka nevyztuženého ostění se zpravidla pohybuje od 200 mm do 300 mm, je maximální reálná tloušťka definitivního ostění do 600 mm. Všechny nerovnosti, které nesplňují tato dvě kritéria, jsou před betonáží definitivního ostění, resp. instalací hydroizolační fólie vyplněny stříkaným betonem. Tím je zaručeno, že se skutečná tloušťka definitivního ostění nebude měnit skokově a proměnné zatížení hydratačním teplem ve fázi betonáže a krátce po odbednění nebude příčinou nadměrného vzniku trhlin.

5.2 Opatření při bednění

Z hlediska bezpečnosti provozu je důležité zachovat celistvost konstrukce v oblasti spár mezi bloky betonáže. Ty jsou prováděny buď jako pracovní s betonáží na sraz, nebo jako dilatační, s vložením pružné vložky. I v tomto případě hraje významnou roli rovinatost povrchu čela bloku betonáže, který by měl být ideálně hladký. Obecně platí, že veškeré konstrukční spáry mezi bloky musí být před betonáží následného bloku dokonale vyčištěny.

Častou vadou nevyztuženého ostění bývá vytvoření trhliny tvaru ploché paraboly ve vrcholu klenby (obr. 4). Její příčinou je nešetrná manipulace s bednicím vozem, kdy se část pláště bednění opře o čerstvě odbedněný blok betonovaný v předchozím kroku. V kombinaci s nevyplněným vrcholem klenby vede tento postup k porušení vrchlíku klenby. Opatřením k zamezení tohoto jevu je pečlivá manipulace s bednicím vozem a instalace měkkého pásu na styčný plech na konci bednicího vozu, aby se omezilo jeho lokální zatížení.

Pro dosažení požadovaného vzhledu povrchu ostění je nutno věnovat pozornost přípravě povrchu bednění. Samotná konstrukce bednění musí být navržena tak, aby byla dostatečně tuhá a vodotěsná. Veškeré příložné vibrátory na formě musí být uchyceny tak, aby se vibrace přenášela především do betonované oblasti. Je žádoucí, aby veškeré spáry pláště byly kvalitně zpracovány. Nejvhodnější povrchová úprava pláště formy je ocelová. Před samotnou betonáží musí být forma vyčištěna a ošetřena vhodným separačním nástřikem, který zajistí, že vnější povrch betonu nepřilne k bednění a dojde tak k hladkému odbednění. Separací nástřik musí být nanesen po celé ploše rovnoměrně v tenkých vrstvách a musí být zvolen tak, aby nedošlo k fyzickému nebo chemickému poškození povrchu betonu. Významnou roli hraje kompatibilita separačního nástřiku s následně prováděnými ošetřovacími nástřiky, případně barevnými a ochrannými nátěry prováděnými na již hotové sekundární ostění.

6. stripping the lining block when the concrete strength is low (1.5MPa to maximum 3MPa), with the stripping time of ca 12 hours;
7. curing of concrete after stripping with focus on restricting drying and moderating the thermal shock (temperature conditioned travelling scaffolding);
8. the use of tunnel form travellers with good thermal conductivity skin (steel);
9. low initial temperature of concrete mixture ranging from 13°C to 18°C, under controlled conditions max 25°C can be acceptable;
10. recommended length of a concrete casting block up to 12.5m.

5.1 Permissible deviations from the theoretical thickness of lining

An unreinforced concrete lining is usually used in tunnel sections located in ground mass allowing excavation with longer advance rounds or the application of a primary lining without support frames. As a result, technologically conditioned overbreaks and larger deviations from the designed excavation geometry occur. The overbreaks within allowable tolerances are backfilled with cast-in-place concrete of the final lining. When unreinforced concrete is used, it is necessary to avoid too rapid changing of the thickness and creating toothing in the primary and final linings, which could introduce undesirable components of the tangential stress into the lining. When intermediate waterproofing is used, the conditions for its installation mostly meet also the requirements for smoothness of the inner surface of the primary lining. Another limiting criterion securing fluent changing of the final lining thickness is the permissible deviation from the design thickness. It is, for example, according to the Austrian directive on the final lining, 100% of the theoretical thickness. With respect to the fact that the theoretical thickness of an unreinforced concrete lining usually ranges from 200mm to 300mm, the maximum real thickness of the final lining is up to 600mm. All irregularities failing to meet the two criteria are filled with shotcrete prior to installation of the waterproofing membrane and casting of the final lining concrete. This way it is guaranteed that the real thickness of the final lining will not vary sharply and the variable loading by hydration heat in the concrete casting phase and shortly after stripping will not be a cause of excessive formation of cracks.

5.2 Measures on formwork

From the point of view of operation safety it is important to maintain integrity of the structure in the area of joints between concrete casting blocks. They are carried out either as butt construction joints or as expansion joints containing an elastic strip. An important role is played also in this case by the flatness of the surface of the concrete casting block front end, which should be ideally smooth. In general, all construction joints between the blocks must be perfectly cleaned up.

The creation of a crack having the shape of a flat parabola in the vault crown (see Fig. 4) is a frequent defect. It is caused by rough handling of the tunnel form traveller, where a part of the skin leans against the freshly stripped block cast in the previous step. In combination with the unfilled top of the vault, this procedure leads to damaging the top of the vault. A measure for preventing this phenomenon is careful handling of the tunnel form traveller and installation of a soft strip on the contact steel sheet at the end of the form traveller to reduce the local load acting on the traveller.

5.3 Opatření při dopravě betonové směsi a betonování

Celkovou kvalitu ostění ovlivňuje výroba, přeprava a ukládka betonu do bednění. Pokud je to možné, měla by být teplota čerstvého betonu v rozmezí mezi 13 °C a 18 °C. Čerstvý beton pro betonáž horní klenby o teplotě menší než 10 °C a větší než 25 °C se nepovažuje za vhodný do nevyztužených ostění. Je třeba proto pružně reagovat na sezónní výkyvy teplot a vlhkostních podmínek. Během přepravy čerstvé betonové směsi musí být zajištěna ochrana před vnějšími klimatickými vlivy. Je třeba také zvolit vhodnou dobu zpracovatelnosti betonu s ohledem na vzdálenost betonárny od stavby a ukládku betonu provádět na stavbě včas. Obecně platné pravidlo při ukládce směsi do formy je, že rychlost betonáže by měla být maximálně 2 m/h a horizontální vzdálenost mezi otvory pro betonáž by neměla být větší než 3 m. Je třeba dbát také na kontinuální přísun směsi na stavbu tak, aby nedošlo k vytvoření nechtěných pracovních spár.

5.4 Opatření z hlediska technologického postupu a odbednění

Pomocí vhodného technologického postupu betonáže lze omezit vznik jak svislých, tak vodorovných trhlin. Svislé smršťovací trhliny vedoucí od základů přibližně do středu horní klenby lze nejlépe omezit krátkým rozestupem mezi betonážemi patek a horní klenby. Toho lze docílit vhodně zvoleným postupem prací ve výrobním proudu definitivního ostění. Obecně doporučení spočívá v omezení časového rozestupu betonáže základů od betonáže klenby do 48 hodin. Tím je dosaženo přibližně stejného smršťování v obou částech konstrukce. Vodorovné trhliny, které se krátce po odbednění většinou objevují na části nebo celé délce betonovaného bloku, nejsou způsobeny horninovým tlakem. Definitivní ostění se betonuje do primárního ostění zpravidla za podmínky odeznění jeho deformací, resp. za předem definovaného velmi nízkého nárůstu deformace v čase. Nejvýznamnější příčinou vzniku těchto vodorovných trhlin je pozdní odbedňování, kdy je pevnost betonu již příliš vysoká. Podle rakouské směrnice [2] se doporučuje odbedňovat tunelová ostění z nevyztuženého betonu při dosažení pevnosti betonu v tlaku 1,5 až maximálně 3 MPa, a to v čase cca 12 hodin po betonáži. Hodnoty odbedňovací pevnosti větší než 3 MPa jsou již ve směrnici označovány jako případ se zvýšeným rizikem vzniku trhlin. Odbedněním konstrukce při nízké pevnosti v tlaku je zaručeno, že „mladý“ beton odbedňovaného bloku vyvodí vlastní vahou v ostění



foto / photo courtesy of Vladimír Prajzler

Obr. 5 Ocelová konstrukce ošetřovacího „klima“ vozu
Fig. 5 Steel structure of the temperature conditioned travelling scaffold

For achieving the required appearance of the lining surface it is necessary to pay attention to preparation of the formwork surface. The formwork structure must be designed to be sufficiently stiff and watertight. All external vibrators installed on the formwork must be fixed in a way ensuring that the vibration is transmitted first of all to the concrete casting area. It is desirable that the quality of processing all joints in the formwork skin is high. The most suitable surface material for the formwork skin is steel. Prior to the casting of concrete, the formwork must be cleaned up and treated with a suitable separation spray, which ensures that the external surface of concrete does not adhere to the form and smooth stripping is possible. A separation spray must be applied uniformly in thin layers on the whole surface and must be chosen with respect to the necessity of preventing physical or chemical damage to the concrete surface. An important role is played by the compatibility of the separation spray with subsequently applied curing sprays or coloured and protective coats applied to the already finished secondary lining.

5.3 Measures regarding transport of concrete mixture and casting concrete

The overall quality of the lining is influenced by the production, transport and placement of concrete behind formwork. If possible, the temperature of fresh concrete should range from 13°C to 18°C. Fresh concrete for casting the upper vault with the temperature lower than +10°C and higher than +25°C is not considered to be suitable for unreinforced concrete linings. It is therefore necessary to respond flexibly to seasonal fluctuations of temperatures and humidity conditions. Protection against external climatic effects must be ensured during the transport of a fresh concrete mixture. In addition, it is necessary to choose suitable concrete workability time taking into consideration the distance of the batching plant from the construction site and to place concrete on site in time. A rule generally applicable to pouring concrete mixture behind formwork is that the maximum concrete casting rate should be 2m/h and the horizontal spacing of concrete casting gates should not be greater than 3m. It is necessary to take care of continual supply of concrete mixture to the construction site so that undesired construction joints are not formed.

5.4 Measures regarding technological procedure and stripping

The formation of both vertical and horizontal cracks can be limited by a suitable technological procedure of casting the concrete. Vertical shrinkage cracks running from the foundation approximately up to the centre of the upper vault can be best limited by a short time lag between casting of the concrete footings and the upper vault. This can be achieved by a suitably selected procedure of the work in the streamlined system of the construction of the final lining. A general recommendation is reducing the time lag between casting the concrete footings and casting the tunnel vault so that it does not exceed 48 hours. This way, an approximately identical shrinkage is achieved in both parts of the structure. The horizontal cracks which mostly appear on a part or the whole length of the concrete block shortly after stripping are not caused by ground pressure. The final lining concrete is attached to the primary lining usually under the condition of stabilisation of deformations and when a predefined very low rate of the deformation increase is achieved. The most important cause of the origination of the horizontal cracks is delayed stripping, when the concrete strength is already too high. According to the Austrian directive [2] it is recommended that unreinforced concrete tunnel linings are stripped when the



foto / photo courtesy of Vladimír Prajzler

Obr. 6 Nafukovací manžety a tepelně izolační plášť „klíma“ vozu

Fig. 6 Inflatable rims and thermally insulating cover of the temperature conditioned travelling scaffold

dostatečně velká tlaková napětí, která přispějí ke včasnému uzavření vznikajících trhlin.

5.5 Opatření při ošetřování po odbednění

Každou betonovou konstrukci je potřeba s ohledem na výslednou kvalitu povrchu po odbednění náležitě ošetřovat a při samotné betonáži zajistit potřebné klimatické podmínky. V tunelu by se měla při betonáži omezit rychlost proudění vzduchu na maximálně 1 m/s a vlhkost vzduchu by neměla klesnout pod 90 %. Vznik trhlin lze významně omezit eliminací teplotního šoku po odbednění.

Kromě standardních opatření, jako je uzavření portálů, snížení rychlosti proudění vzduchu nebo nástřiku přípravků proti vysychání se úspěšně používají „klíma“ vozy. Jedná se o další vůz v celkovém výrobním proudu definitivního ostění, který je nasazen těsně za bednicím vozem. Jeho délka se pohybuje od dvou do tří délek bloku betonáže, takže při modelovém příkladu s betonáží 5 bloků za 7 dnů připadá na jeden cyklus cca 34 hodin a každý blok je po odbednění chráněn 68 až 102 hodin. Za tuto dobu odezní významná část hydratačního tepla a riziko vzniku trhlin od prudkého ochlazení se tím minimalizuje.

Konstrukce „klíma“ vozu se liší v závislosti na možnostech ošetřování. Ty nejjednodušší se skládají pouze z ocelové konstrukce potažené tepelně izolační fólií, která udržuje přirozené teplo a vlhkost v mezeře mezi čerstvě odbedněným betonem a konstrukcí „klíma“ vozu.

Příkladem je vůz pro ošetřování betonu (ošetřovací vůz) na obr. 5 před portálem dálničního tunelu Považský Chlmec na dálnici D3 u Žiliny na Slovensku. Jedná se o lehkou ocelovou konstrukci potaženou tepelně izolační fólií. Na obr. 6 je vidět nafukovací manžety, které slouží k utěsnění prostoru mezi lícem ostění a pláštěm vozu. Délka ošetřovacího vozu je 25 m, což odpovídá délce dvou bloků betonáže.

Složitější „klíma“ vozy mají do systému přivedenou vodu a vzduch a pomocí rozprašovacích trysek vytvářejí studenou mlhu, čímž je zajištěna dostatečná vlhkost povrchu betonu. Nejsložitější „klíma“ vozy jsou plně řízené a lze na nich regulovat vlhkost i teplotu v mezeře mezi „klíma“ vozem a povrchem betonu, případně aktivně betonovou konstrukci propařovat. Konstrukce „klíma“ vozu je u těchto typů většinou navíc izolovaná například polystyrenovou vrstvou. Veškeré parametry ošetřování je možné nastavit a regulovat podle potřeby v závislosti na měnících se vnějších podmínkách. Vždy by však mělo platit, že maximální teplota u povrchu zrající betonové konstrukce by neměla přesahovat 45 °C.

concrete compression strength reaches 1.5 to 3MPa as a maximum, during ca 12 hours after casting the concrete. Strength values at stripping higher than 3MPa are indicated in the directive as a case with increased risk of the formation of cracks. It is guaranteed by stripping the structure in the moment when the compressive strength is still low that the "young" concrete of the block being stripped will induce sufficiently high compressive stresses in the lining through its own weight, which will contribute to timely closing of originating cracks.

5.5 Measures regarding curing after stripping

It is necessary to duly cure each concrete structure after stripping and secure the required climatic conditions during the concrete casting work with respect to the resultant quality of the surface. The airflow velocity in the tunnel should be reduced to 1m/s as a maximum and the humidity of air should not drop under 90%. The formation of cracks can be significantly limited by eliminating the thermal shock after stripping the formwork.

Temperature conditioned travelling scaffolds are successfully used apart from the standard measures, such as closing the portals, reducing airflow velocity or applying spray against drying. It is another traveller in the overall final lining production flow. It is deployed just behind the travelling form. Its length ranges from two up to three lengths of the concrete casting block, which means that in a model example with casting 5 blocks in 7 days ca 34 hours are allotted to one cycle and each block is protected after stripping for 68 up to 102 hours. During this time a significant part of hydration heat fades away, thus the risk of the cracks formation due to rapid cooling is minimised.

The structure of the temperature conditioned travelling scaffold differs depending on the possibility of curing. The simplest scaffolds consist only of a steel structure covered with a thermally insulating membrane, which maintains natural temperature and humidity in the gap between the just stripped concrete and the scaffold structure.

The concrete curing travelling scaffold standing in front of the Považský Chlmec motorway tunnel on the D3 motorway near Žilina, Slovakia (see Fig. 5) is presented as an example. It is a light-weight steel structure covered with a thermally insulating membrane. Inflatable rims serving to seal the space between the inner surface of the lining and the cover of the traveller are presented in Fig. 6. The length of the curing scaffold is 25m, which corresponds to the length of two concrete casting blocks.

More complex temperature conditioned travelling scaffolds have water and air brought to the system and create a cold mist by means of spraying jets. In this way sufficient moisture of the concrete surface is secured. The most complex temperature conditioned travelling scaffolds are fully controlled and they allow regulating the humidity and temperature in the gap between the temperature conditioned travelling scaffold and the concrete surface or, as the case may be, to actively cure the concrete structure with steam. The temperature conditioned travelling scaffold structure is in the case of these scaffold types in addition insulated, for example by a polystyrene layer. All parameters of curing can be set and regulated as needed, depending on the changing external conditions. Nevertheless, in any case the maximum temperature at the surface of the curing concrete structure should not exceed 45°C.

6. ZÁVĚR

Nevyztužený beton má jako materiál definitivního ostění konvenčně ražených tunelů své nezastupitelné místo. Ve vhodných geotechnických podmínkách představuje cestu ke snížení investičních nákladů při dodržení požadované kvality. Jako bonus lze navíc považovat minimalizaci rizika poškození mezilehlé izolace, které montáž výztuže bez sporu představuje, a úplné vyloučení problémů s karbonatací betonu. Zatímco vznik trhlin a povrchových nerovností nehraje z hlediska údržby a statické funkce významnou roli, je nutno věnovat zvýšenou pozornost výplni vrchlíku klenby a případně tvorbě trhlin v blízkosti pracovních nebo dilatačních spár mezi bloky betonáže, které by mohly být příčinou ohrožení bezpečnosti provozu.

Stejně jako v počátcích NRTM bylo nutné začít myslet „jinak“, vyrovnat se s představou samonosnosti horninového masivu a horninu začít vnímat jako stavební materiál, tak je u nevyztuženého betonu nutné respektovat jeho vlastnosti, a to především nízkou pevnost v tahu a s tím související vznik trhlin. Odlišný přístup v myšlení je nutné uplatnit na všech stupních od návrhu ostění přes jeho provádění až po převjímkou díla objednatelem. Projektant musí při návrhu zohlednit nelineární chování konstrukce jako celku a posoudit existenci trhlin z hlediska funkce ostění, zhotovitel musí přizpůsobit návrh směsi betonu, technologický postup provádění i ošetřování, investor musí definovat reálně možné požadavky na kvalitu. Jedině synergií všech těchto složek může dojít k ekonomickému návrhu konstrukce a potvrzení principu NRTM jako observační metody, která dokáže reagovat na skutečně zastížené podmínky nejen v oblasti zajištění stability výrubu, ale i v oblasti dimenzování definitivního ostění.

*Ing. JIŘÍ HOŘEJŠÍ, jiri.horejsi@hochtief.cz,
Ing. LIBOR MAŘÍK, libor.marik@hochtief.cz,
Ing. PAVEL RŮŽIČKA, pavel.ruzicka@hochtief.cz,
HOCHTIEF CZ, a.s.
Dipl.-Ing. ANDREAS SCHAAB,
andreas.schaab@hochtief.de,
HOCHTIEF Engineering GmbH*

*Recenzovali / Reviewed: prof. Ing. Jan Víték, CSc.,
doc. Ing. Matouš Hilar, M.Sc., Ph.D., C.Eng., MICE*

6. CONCLUSION

Unreinforced concrete has its irreplaceable position as a material for final linings of conventionally driven tunnels. In suitable geotechnical conditions it represents a way to reduce investment costs with the required quality maintained. In addition, minimisation of the risk of damaging the intermediate waterproofing layer, which the placing of reinforcement undoubtedly is, and the complete exclusion of problems with concrete carbonation, can be considered as a bonus. Whilst the formation of cracks and surface irregularities plays no important role in terms of maintenance and the static function, it is necessary to pay special attention to filling of the top of the vault and possibly to creation of cracks in the vicinity of construction or expansion joints between concrete casting blocks, which could pose a threat to the operation safety.

As in the beginnings of using the NATM when it was necessary to start thinking "outside the box" and to cope with the idea of the self-supporting capacity of rock mass and begin to perceive ground as a building material, it is necessary to respect properties of unreinforced concrete, first of all, the low tensile strength and the formation of cracks associated with it. A different approach in thinking must be applied in all stages, from the lining design through the construction up to the takeover by the client. The designer must take into account the non-linear behaviour of the structure as a whole and assess the existence of cracks in terms of the lining function; the contractor must adapt the concrete mixture design, the technological procedure for building and curing; the client must define realistically possible quality requirements. Only through synergy of all of the above-mentioned components an economic design of the structure can be reached and the NATM principle can be confirmed as an observational method capable of responding to the actually encountered conditions not only in the field of securing the excavation stability, but also in the solution of final lining.

*Ing. JIŘÍ HOŘEJŠÍ, jiri.horejsi@hochtief.cz,
Ing. LIBOR MAŘÍK, libor.marik@hochtief.cz,
Ing. PAVEL RŮŽIČKA, pavel.ruzicka@hochtief.cz,
HOCHTIEF CZ, a.s.
Dipl.-Ing. ANDREAS SCHAAB,
andreas.schaab@hochtief.de,
HOCHTIEF Engineering GmbH*

LITERATURA / REFERENCES

- [1] *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací*. Kapitola 18 Betonové konstrukce a mosty. Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací, leden 2016
- [2] *Richtlinie Innenschalenbeton*. Österreichische Bautechnik Vereinigung, Dezember 2012
- [3] *Richtlinie Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen*. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, April 2009
- [4] *Empfehlungen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen*. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) – Arbeitskreis „Unbewehrte Tunnelinnenschalen“ – Stand: 24. April 2007
- [5] *Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. *Brücken- und Ingenieurbau*, Heft B92, April 2013
- [6] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING*. Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise, Bundesanstalt für Bauwesen, Dezember 2007
- [7] *Richtlinie DB853 Eisenbahn Tunnel planen, bauen und instand halten*. DB Netz AG, 2013
- [8] Kupfer, H. B., Kupfer, H., Steckbaner, A. *Tragfähigkeit von schlanken Druckgliedern aus unbewehrtem Beton*. Springer-Verlag, 1984
- [9] Pöttler, R. Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau – Standsicherheit und Verformung im Rissbereich. *Beton- und Stahlbetonbau*, Juni 1993
- [10] Vogel, F., Sovják, R., Holčapek, O., Mařík, L., Šach, J. Experimental Study of Primary Lining Tunnel Concrete after Thirty Years of Operation. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 732, pp. 403-406, Feb. 2015