

OPRAVA ZAVALENÉHO TUNELU V TURECKU

REPAIR OF COLLAPSED TUNNEL IN TURKEY

Matouš Hilar¹, Martin Srb², Jakub Nosek³

ABSTRAKT

V roce 2015 byla uvedena do provozu vodní elektrárna na severu Turecka. Součástí elektrárny byl i 12 km dlouhý vodovodní tunel. Dolní (výtoková) část tunelu délky 8 km byla vybudována dvojitým štítem se segmentovým železobetonovým ostěním mocnosti 400 mm s vnitřním průměrem 8,7 m. Vzhledem k problémům s TBM ražbou byla horní (vtoková) část tunelu délky 4 km vybudována metodou Drill and Blast (D&B) s jednoplášťovým ostěním ze stříkaného drátkobetonu. V říjnu 2016 byly v provozovaném tunelu zjištěny výrazné problémy (cca rok po zprovoznění). Provoz elektrárny musel být zastaven a voda z přehrady nad tunelem a z tunelu byla vypuštěna. Následný průzkum odhalil tři velké závaly a řadu dalších poškození v D&B části tunelu, výraznější lokální poruchy ostění byly zjištěny i v TBM části tunelu. Veškeré opravy byly dokončeny v říjnu 2017, tedy jeden rok po zjištění problémů, což je vzhledem k rozsahu poškození a oprav považováno za značný úspěch. Tento příspěvek je zaměřen na veškeré činnosti od průzkumu poškození tunelu k návrhu a realizaci oprav tunelu.

ABSTRACT

An operation of a water power station in North Turkey started in 2015. The power station included 12 km long water tunnel. 8 km long lower (output) tunnel section was excavated by double shield with 400 mm thick and 8.7 m ID segmental lining reinforced by steel cages. Due to problems with TBM excavation 4 km long upper (input) tunnel section was excavated by Drill and Blast (D&B) method with single shell lining generated from fibre reinforced sprayed concrete. Significant problems were observed in the tunnel in October 2016 (about one year after its opening). An operation of the power station had to be stopped and water from a dam above the tunnel and from the tunnel had to be discharged. Consequent investigation revealed three major collapses and many various damages in the D&B section of the tunnel, significant damages were also observed in the TBM tunnel section. Reconstruction of the tunnel was completed in October 2017 (about one year after detection of problems) which was considered as significant success taking into account scale of damages. This paper is focused on all activities from investigation of damages to design and realisation of repairs.

1 Úvod

Opravovaný vodovodní tunel slouží pro vodní elektrárnu o výkonu 102 MW. Elektrárna využívá vodu z řeky Kizilirmak (nejdelší řeka v Turecku délky 1355 km) před jejím ústím do Černého moře (Obr. 1). Z geologického hlediska se tunel nachází v prostoru Severoanatolského zlomu na styku litosférických desek (Euroasijské a Anatolské).

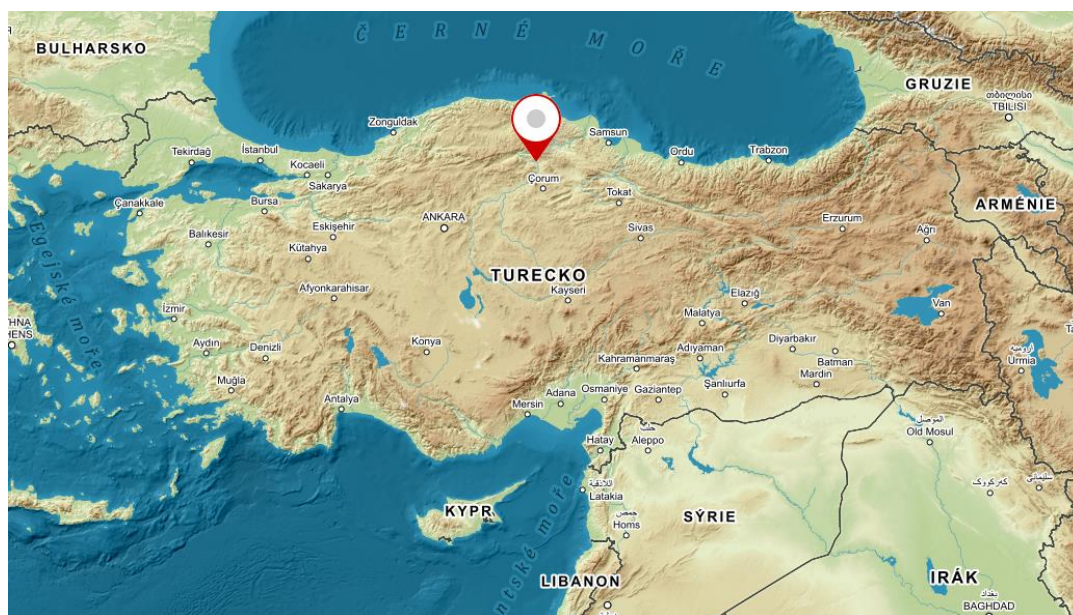
Spodní část tunelu je geologicky velmi pestrá, v masivu se nachází ofiolitické horniny, slepence, vápence, mramory, pískovce, jílovce, atd. Horní část tunelu je v tektonicky rozrušených vulkanických horninách, kde jsou zastoupeny především basalty a andezity.

¹prof. Ing. Matouš Hilar, M.Sc., Ph.D., 3G Consulting Engineers s.r.o. a FSv ČVUT, e-mail: hilar@3-g.cz

²Ing. Martin Srb, Ph.D., 3G Consulting Engineers s.r.o., tel.: +420241443411, e-mail: srb@3-g.cz

³Ing. Jakub Nosek, Ph.D., 3G Consulting Engineers s.r.o., tel.: +420241443411, e-mail: nosek@3-g.cz

Maximální nadloží tunelu je cca 600 m, rozdíl hladin horní a dolní nádrže je 80 m, před elektrárnou byla zbudována vyrovnávací šachta.



Obr. 1 Poloha projektu
Fig. 1 Project location

2 Výstavba tunelu

Výstavba vodovodního tunelu byla zahájena od spodního (výtokového) portálu v únoru 2012 pomocí dvojitého štítu. Bylo používáno tradičně vyztužené segmentové ostění mocnosti 400 mm (6+1) s vnitřním průměrem 8,7 m a délkou prstenců 1,5 m. Segmentové ostění mělo těsnící pásy, vodící tyče a plastové spojovací čepy ve styčných spárách. Původně bylo plánováno, že celý tunel bude vyražen pomocí štítu od spodního (výtokového) portálu, segmentové ostění bylo předpokládáno pouze na prvních 3 km, kde byly očekávány horší geologické podmínky. Velmi brzy po zahájení ražby byl pohyb štítu zablokovan a štít musel být vyproštěn pomocí obchvatové stoly. Uvedený scénář se při ražbě štítem opakoval celkem sedmkrát. Vzhledem k výrazným problémům s ražbou štítem bylo rozhodnuto o konvenční protiražbě od horního (vtokového) portálu metodou Drill and Blast (D&B) s jednoplášťovým ostěním ze stříkaného drátkobetonu. Ražba probíhala na celý profil, ke kotvení byly použity svorníky CT. Z celkové délky 12 km byly 4 km vyraženy metodou Drill and Blast (včetně demontážní komory pro štít) a 8 km bylo vyraženo štítem, přičemž segmentové ostění bylo využito na celé této délce. K prorážce došlo v červnu 2014 po 27 měsících ražeb.

3 Průzkum rozsahu škod

Vodní elektrárna byla uvedena do provozu v srpnu 2015. V září 2016 byly zjištěny problémy ve vodovodním tunelu (pokles tlaku, zakalená barva vody, kameny na výtoku) a provoz elektrárny musel být zastaven. Koncem září 2016 byla provedena kontrola napuštěného tunelu pomocí dálkově ovládaného plavidla (Remotely Operated Vehicle - ROV), pomocí kterého bylo provedeno 3D skenování tunelu. Průzkum odhalil různá poškození tunelu včetně větších závalů, úsek mezi km 3+280 a km 4+000 byl vzhledem k zablokování tunelu závalem nepřístupný (staničení je uváděno od vtokového portálu). Vzhledem k rozsahu poškození bylo rozhodnuto o vypuštění nádrže nad tunelem i z tunelu. Následně byl zbudován přístup z vtokového portálu (zbudování rampy a odstranění ocelové mříže - česlí).

V této době byla k projektu přizvána firma 3G Consulting Engineers s.r.o., která investorovi projektu asistovala se všemi důležitými činnostmi souvisejícími s opravami (zjištění rozsahu oprav, projekt oprav a úpravy projektu během provádění oprav, supervize oprav, atd.). V průběhu oprav byli následně zástupci firmy 3G trvale přítomni na stavbě a významně přispěli k rychlosti rozhodovacích procesů a provádění oprav, což byl pro investora zcela zásadní parametr. S geodetickými pracemi na projektu průběžně asistovala česká firma Angermeier Engineers s.r.o.

První inspekční cesta do D&B části tunelu z vtokového portálu se uskutečnila 15. 11. 2016, chůze byla umožněna do km 2+160, do km 3+280 bylo možné dojet na člunech (vzhledem ke vzdutí hladiny způsobenému zablokováním tunelu závalem). Výška hladiny vody v tunelu před závalem byla 5,5 m (Obr. 2). Přístup do TBM části tunelu byl umožněn ze spodního (výtokového) portálu tunelu z prostoru elektrárny skrz průlez do ocelového potrubí přiváděče vody před turbínami. Inspekce TBM části proběhla 30. 11. 2018, bylo možné projít celou TBM část a byly zjištěny další dva velké závaly v D&B části tunelu v km 3+885 (zával 2) a km 3+905 (zával 3). Prostor mezi závaly 1 a 2 byl rovněž zaplavený, inspekce dané části byla provedena na člunech začátkem prosince 2016 z vtokového portálu. Přístup do tunelu byl postupně zlepšován (odčerpávání vody v tunelu zadržené závaly, zlepšování přístupu pro techniku a stroje, lepší osvětlení, odvoz překážejícího materiálu z tunelu, atd.), s lepším přístupem byly postupně zpřesňovány informace o rozsahu škod.



Obr. 2 Inspekce závalu 1 z člunu
Fig. 2 The collapse 1 inspection from a boat

4 Rozsah oprav

Po provedení úvodních inspekcí začaly postupně opravy tunelu, které postupovaly směrem od horního (vtokového) portálu, tedy od staničení km 0+000. V této D&B části tunelu s jednoplášťovým ostěním ze stříkaného drátkobetonu s CT svorníky bylo zjištěno velké množství poruch, na řadě míst došlo k poškození ostění a vypadnutí bloků hornin do tunelu, řada obdobných poruch byla v řádu několika desítek m³ vypadlé horniny. Zjištěné poruchy byly zpravidla zajištěny pomocí stříkaného betonu, galvanizovaných SN svorníků

profilu 26 nebo 32 mm délky 6 m a pomocí ocelových sítí 6/150/150. U větších dutin byl k jejich vyplnění použit monolitický samozhutnitelný beton, bednění bylo prováděno ze stříkaného betonu a ocelových sítí.

Stav původního ostění byl podrobně zaznamenán, na základě vyhodnocení dostupných údajů (stav ostění, záznamy z ražby, geologické poměry, atd.) bylo rozhodnuto o zesilování ostění v některých úsecích, celkem bylo ostění zesíleno přibližně na třetině délky D&B části tunelu. Zesilování bylo zpravidla prováděno pomocí jedné vrstvy ocelových sítí 6/150/150, vrstvy stříkaného betonu mocnosti 10 cm a galvanizovaných SN svorníků profilu 26 délky 6 m v rastru 2 x 2 m.

Hlavním cílem prováděných prací byla sanace tří velkých závalů, kterou bylo možné provádět až po jejich zpřístupnění. Dále také bylo nezbytné opravit TBM část tunelu, kam byl od spodního (výtokového) portálu obtížný přístup, tudíž hlavní opravy mohly být provedeny až po zajištění průjezdu skrz D&B část tunelu (sanace velkých závalů).



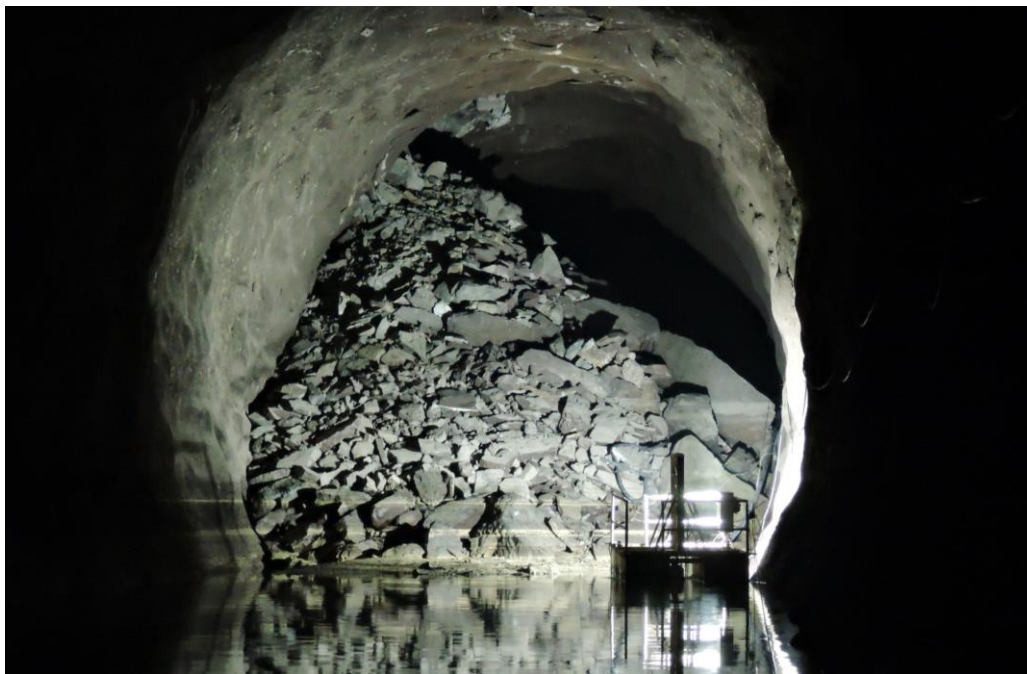
Obr. 3 Obtížně přístupný povrch nad závalem 1 pro provádění vrtů a následnou betonáž
Fig. 3 Surface in mountains above the collapse 1 for drilling and concreting

5 Sanace závalu 1

Největší byl zával 1 (km 3+280), zavaleno bylo cca 30 m tunelu, zával blokoval cca $\frac{3}{4}$ profilu tunelu. Po zpřístupnění bylo zahájeno přečerpávání vody z prostoru před závalem na jeho druhou stranu. Před vyplněním a zneprůchodněním oblasti závalu, umožňující zahájit zaplňování vzniklé kaverny nad tunelem, byly do pravé strany závalu umístěny hadice pro čerpání vody a plastová trubka profilu 1,2 m umožňující pro průlez pro pracovníky a ventilaci. Zaslepení tunelu bylo provedeno pískem a konce závalu byly utěsněny PU pěnou. Následně byla provedena betonáž prostoru nad závalem z tunelu. Z obtížně přístupného povrchu nad tunelem (Obr. 3) byly postupně provedeny tři vrty délky přes 200 m, kterými se podařilo navrtat kavernu nad tunelem. Kaverna byla vyplněna samozhutnitelným betonem. Pro sanaci závalu 1 bylo celkem použito 3500 m³ betonu (500 m³ z tunelu a 3000 m³ z povrchu).

Po úvodním vyplnění dutin začalo zmáhání závalu s využitím principů konvenčního tunelování. Ražba byla rozdělena na kalotu a lavici. Při ražbě kaloty byly pravidelně prováděny průzkumné vrty, zastižené dutiny byly zainjektovány cementovou směsí. Délka záběrů byla zpravidla 1 m. Výrub byl zajištěn ostěním ze stříkaného betonu mocnosti 350 mm s příhradovými rámy, se dvěma vrstvami ocelových sítí 8/150/150 a s pogalvanizovanými SN nebo IBO svorníky délky 6 m. Částečně byly využity deštníky ze svorníků IBO průměru 51 mm délky 8 m. Přes počáteční obavy ražba kaloty proběhla bez výraznějších problémů, naměřené deformace ostění nepřekročily 20 mm. Relativně bezproblémová ražba kaloty byla

příznivě ovlivněna kvalitním vyplněním vzniklé kaverny samohutnícím betonem. Ražba kaloty byla zahájena 23. 3. 2017 a proražena byla 27. 4. 2017. Následné odtěžení lavice proběhlo bez výraznějších problémů, což bylo příznivě ovlivněno skutečností, že původní ostění v prostoru lavice závalu 1 nebylo výrazněji porušeno. I tak bylo ostění v prostoru lavice zesíleno, výsledné zajištění korespondovalo se zajištěním kaloty (příhradové rámy, 2 vrstvy sítí, 350 mm stříkaného betonu, galvanizované SN svorníky délky 6 m).



*Obr. 4 Zával 2 po částečném odčerpání vody před ním
Fig. 4 The collapse 2 after partial water discharge*

6 Sanace závalu 2

Prorážka kaloty závalu 1 (km 3+280) umožnila přístup k závalu 2 (km 3+885). Prostor mezi danými závaly byl zaplaven, tudíž nejprve bylo nezbytné odčerpání vody. Po vyčištění přístupu k závalu 2 (Obr. 4) bylo možné zesílit ostění v prostoru před závalem. V rámci inspekce závalu bylo zjištěno, že nad závalem se vytvořila svislá kaverna výšky cca 34 m o průměru cca 5 m. Před prostorem závalu byla vytvořena rampa, aby úvodní práce probíhaly z úrovně dna kaloty. Napadaná rubanina pod závalem byla odtěžena do úrovně dna kaloty a okolí závalu bylo zesíleno vrstvou stříkaného betonu. Ústí kaverny bylo zajištěno vysokopevnostní ocelovou sítí MINAX 80/3, která je obecně používána k zajištění skalních svahů. Ohledně betonáže kaverny byly zvažovány dvě možnosti – použití standardního bednění nebo bednění pomocí primárního ostění. Nakonec bylo rozhodnuto využít druhou možnost vzhledem k dostupnosti materiálu a jednoduchosti instalace.

Primární ostění pod ústím závalu se skládalo ze 13 příhradových rámců, dvou vrstev sítí 8/150/150 a stříkaného betonu. Mimo ústí kaverny bylo primární ostění zajištěno pogalvanizovanými svorníky SN délky 6m. Pro betonáž byly v ostění ponechány dva otvory (beton a vzduch). Následně byla zahájena betonáž samozhutnitelným betonem C35. Betonáž byla zpočátku prováděna pomaleji. Po dosažení úrovně 2 m nad vrcholem klenby tunelu byla rychlost betonáže zvýšena na cca 50 m³ za den. Betonáž ve vyšších úrovních byla provedena pomocí ocelových trubek, které byly postupně nastavovány trubkami menšího průměru (byly použity trubky tří průměrů). Obdobným způsobem byly nastavovány i trubky pro únik vzduchu. Po dokončení betonáže byl doinjektován vrchlík kaverny a trubky. Pro vyplnění kaverny závalu 2 bylo celkem použito 800 m³ betonu.

7 Sanace závalu 3

Zajištění ústí závalu 2 (km 3+885) vysokopevnostní sítí umožnilo bezpečný přístup k závalu 3 (km 3+905). Nejprve byla prodloužena rampa v úrovni dna kaloty, následně bylo zesíleno ostění tunelu v okolí závalu. Ústí závalu bylo zablokováno větším horninovým blokem, a proto bylo třeba zjistit tvar dutiny v masivu pomocí průzkumných vrtů. Celkem bylo provedeno 22 průzkumných vrtů délek od 6 m do 32 m. Pomocí vrtů nebyla zastižena žádná větší dutina, pouze byla zjištěna relativně velká zóna rozvolněného masivu v okolí tunelu. Vrtů byly využity k tlakové injektáži rozvolněné oblasti. Pro injektáž bylo využito přes 300 m³ cementové směsi. Po sanaci závalů 2 a 3 byla odtěžena rampa v dané oblasti (snížení úrovně z kaloty na dno tunelu), ostění tunelu v úrovni lavice bylo zesíleno.

8 Sanace TBM části tunelu

Opravy TBM části tunelu se segmentovým ostěním byly výrazně ovlivněny omezeným přístupem. Vzhledem k závalům v D&B části tunelu byl z počátku přístup umožněn jen od spodního (výtokového portálu), a to buď malým průlezem z prostoru elektrárny nebo skrz vyrovnávací šachtu před elektrárnou. V rámci inspekce TBM části bylo zjištěno větší množství poruch ostění (např. průsaky vody skrz spáry či injektážní otvory, trhliny, odprysky oprav či nové odprysky, geometrické nepřesnosti, atd.). Na několika úsecích celkové délky cca 120 m byly zjištěny významnější deformace (ovalizace) ostění, ve všech případech měly deformace obdobný vertikální charakter (protažení ve svislém směru a zkrácení ve vodorovném směru). Na některých úsecích deformace přesahovaly 10 cm, na nejvíce poškozené části (km 10+470) byla naměřena svislá deformace 37 cm (Obr. 5).



*Obr. 5 Nejhůře poškozená část TBM tunelu
Fig. 5 Major damages in the TBM section*

Práce v TBM tunelu začaly jádrovými vrty délky 5 m v problematických úsecích (kontrola kvality masivu a injektáže za segmentovým ostěním). Vrtů byly prováděny v 5 polohách (9:00, 10:30, 12:00, 1:30, 3:00). Po odebrání jader byly vrtů použity pro penetrační zkoušky tlakovou vodou (pressure water tests). Následně proběhla tlaková injektáž (kontaktní

a konsolidační) prostoru za ostěním pomocí cementové směsi. Poškozené segmenty byly opraveny. V případě nejvíce poškozené části (km 10+470) byly poškozené segmenty podskruženy pomocí pogaľvanizovaných profilů HEB 260 a zajištěny pomocí pogaľvanizovaných SN svorníků délky 6 m.

9 Závěr

Řešený problém byl velmi nestandardní (závaly provozovaného tunelu o objemu tisíců m³ a potřeba dalších oprav). Nestandardní byly i související aspekty (velký důraz na rychlost zprovoznění, lokalita, místní zvyklosti, atd.). V roli projektanta oprav asistovala firma 3G Consulting Engineers s.r.o. investorovi stavby se všemi důležitými činnostmi souvisejícími s opravami (zjištění rozsahu oprav, projekt oprav a úpravy projektu během oprav, supervize oprav, atd.). V průběhu oprav byli zástupci firmy 3G Consulting Engineers s.r.o. trvale přítomni na stavbě a významně přispěli k rychlosti oprav, což byl pro investora zcela zásadní parametr. Opravy byly dokončeny v říjnu 2017, přerušeni provozu trvalo přibližně jeden rok. V uvedené době byla provedena příprava (vypuštění přehrady a tunelu, zjištění problémů a jejich příčin, variantní návrhy řešení, projektová příprava, zajištění zhotovitele, zasmluvnění vztahů, stavební příprava, zajištění materiálů a mechanizace, atd.). Následně bylo nezbytné provést vlastní opravy (sanace 3 velkých závalů, sanace menších problémů, zesilování D&B tunelu, opravy TBM tunelu, atd.). Provedené opravy patrně nejsou konečným řešením, ve střednědobém horizontu bude třeba provést důkladnější a trvalejší opravy. V blízké budoucnosti bude celý tunel kontrolován v pravidelných intervalech pomocí dálkově ovládané ponorky ROV. Celá D&B část tunelu a problematické části TBM tunelu byly zaměřeny a naskenovány geodety české firmy Angermeier Engineers s.r.o., tudíž po vypuštění tunelu bude možné ověřit vývoj deformací ostění. Před opravami v budoucnu bude třeba provést podrobnou projektovou a stavební přípravu tak, aby výsledné řešení bylo optimální z hlediska navrženého konstrukčního řešení (funkčnost, kvalita, životnost) a rychlosti provádění, neboť do ekonomických kalkulací je třeba zahrnout i ztráty z důvodu přerušeni provozu elektrárny.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantu TAČR TE01020168.