

T A

Č R

Program **Doprava 2020+**

**ZVÝŠENÍ SPOLEHLIVOSTI A ŽIVOTNOSTI OSTĚNÍ TUNELŮ VYUŽITÍM
INFORMAČNÍCH MODELŮ
A NOVÝCH PŘÍSTUPŮ**

Etapa I/III - 2023

**Metodika k získávání podkladů pro vyhodnocení namáhání a stavu
ostění tunelů pro zjišťování příčin jeho porušení
po uvedení do provozu**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ**



**FAKULTA
STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE**

Název: Metodika k získávání podkladů a vyhodnocení namáhání a stavu ostění tunelů pro zjišťování příčin jeho porušení po uvedení do provozu

Zpracovatel: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Autoři: Ing. Jan Faltýnek, Ph.D., MBA, EUR ING
Prof. Ing. Petr Konvalinka CSc., FEng.
Ing. Libor Mařík
Ing. Šárka Pešková, Ph.D.
Prof. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D., DSc.

Oponenti: Doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
katedra geotechniky a podzemního stavitelství
Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava

Ing. Martin Srb, Ph.D.
3G Consulting Engineers, s.r.o.

Výstup projektu: TAČR CK02000175 – Zvýšení spolehlivosti a životnosti ostění tunelů využitím informačních modelů a nových přístupů

Datum: 26. 11. 2023

OBSAH

1. ŘEŠITELSKÝ TÝM	6
2. PŘEDMĚT A CÍLE PROJEKTU	6
3. POUŽITÉ ZKRATKY.....	7
4. POUŽITÁ TERMINOLOGIE.....	7
4.1. Geotechnické podmínky.....	7
4.2. Geotechnický typ horninového masivu	7
4.3. Kvazihomogenní celek	8
4.4. Primární ostění	8
4.5. Sekundární ostění	8
4.6. Funkce ostění.....	8
4.7. Blok betonáže sekundárního ostění.....	8
4.8. Samonosnost horninového masivu	9
4.9. Systém „ostění – hornina“	9
4.10. Spolupůsobení primárního a sekundárního ostění	9
4.11. Tunelové metry.....	9
4.12. Životní cyklus tunelového ostění	9
5. POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU	10
5.1. Fáze provádění geotechnického průzkumu a projektování	10
5.2. Fáze výstavby	10
5.3. Fáze provozování.....	11
5.4. Vyhodnocení stávajícího stavu	11
6. NOVÝ PŘÍSTUP K ZÍSKÁVÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ DAT	12
7. DATA ZÍSKÁVANÁ PRO HODNOCENÍ STAVU PODZEMNÍHO DÍLA	12
7.1. Fáze provádění geotechnického průzkumu a projektování	13
7.2. Fáze výstavby	13
7.2.1. Ověřování vlastností horninového masivu	14
7.2.2. Skutečné provádění ražby a primárního ostění	14
7.2.3. Skutečné provádění sekundárního ostění	14
7.3. Fáze provozování.....	15
8. FAKTORY NEGATIVNĚ OVLIVŇUJÍCÍ STAV A ŽIVOTNOST OSTĚNÍ.....	15
8.1. Neočekávané okolnosti	16
8.2. Chyby návrhu a provádění	16
8.3. Typy trhlin, jejich vznik a šíření	17
8.3.1. Trhliny způsobené statickým zatížením	18
8.3.2. Trhliny způsobené smršťováním betonu.....	18
8.3.3. Trhliny způsobené příliš vysokou odbedňovací pevností	18
8.3.4. Trhliny způsobené teplotním šokem	18
8.3.5. Trhliny vzniklé náhlou změnou tloušťky ostění	19
8.3.6. Trhliny způsobené chybným technologickým postupem	19
8.3.7. Kritéria pro přípustnou šířku, polohu a počet trhlin v bloku betonáže.....	19
9. METODIKA PROVÁDĚNÍ PASPORTIZACE SEKUNDÁRNÍHO OSTĚNÍ	20
10. TYPY VAD TUNELOVÝCH OSTĚNÍ	23
11. PŘÍČINY VZNIKU PORUCH A VAD	24
12. NÁVRH SANACE PODLE CHARAKTERU VADY	27

13.PRAKTICKÉ POUŽITÍ METODIKY	30
14.EKONOMICKÉ ASPEKTY APLIKACE METODIKY V PRAXI	30
15.ZÁVĚR	31
16.LITERATURA.....	32

1. ŘEŠITELSKÝ TÝM

Ing. Jan Faltýnek, Ph.D.

Ing. Marcel Jogl, Ph.D.

Prof. Ing. Petr Konvalinka CSc., FEng.

Ing. Libor Mařík

Ing. Šárka Pešková, Ph.D.

Ing. Vladimír Šáňa, Ph.D.

Doc. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D., DSc.

2. PŘEDMĚT A CÍLE PROJEKTU

Předmětem projektu je vypracování metodiky pro získávání potřebných podkladů a informací o kvalitě a chování horninového masivu, vlastnostech použitých materiálů a geometrických parametrech navržených konstrukcí v průběhu projektování, výstavby a provozování tunelu. Tyto informace a parametry budou sloužit pro vyhodnocení stavu tunelového ostění, zjišťování příčin jeho vad a poruch a na základě vyhodnocení vzniklé situace k návrhu sanací tunelového ostění. Cílem projektu je vypracování jednotného přístupu k získaným informacím, jejich centrálního uchování a zpřístupnění jak správcům tunelů pro potřeby údržby, tak investorům a projektantům za účelem optimalizace návrhu nových tunelů obdobných rozměrů v obdobných geotechnických podmínkách. Optimalizací technického návrhu a správnou volbou sanace tunelového ostění podle zjištěných příčin vzniku poruchy lze dosáhnout jak úspory materiálu, resp. vynaložení jen jeho nezbytně nutného množství, tak zajištění požadované funkce a životnosti.

Metodika definuje:

- a) rozsah a způsob získávání informací v období od zpracování projektové dokumentace přes vlastní výstavbu díla až po informace získané na základě sledování a zkušeností s provozováním podzemního díla do konce jeho předpokládané životnosti,
- b) typy vad tunelových ostění v závislosti na způsobu provádění tunelu, typu ostění a dalších okrajových podmínkách,
- c) možné příčiny vzniku poruch a vad v závislosti na geotechnických podmínkách, typu ostění a charakteru poruchy,
- d) návrh sanací poruch podle jejich charakteru a závažnosti s ohledem na zajištění statické funkce ostění a bezpečnost provozu,

Systematický postup sběru a ukládání informací podle metodiky vede k efektivnímu využití dat získaných ve fázi:

- **provádění a vyhodnocení geotechnického průzkumu** jako podkladu pro návrh technického řešení podzemního díla v rámci zpracování projektové dokumentace,
- **provádění podzemního díla** při ověřování předpokladů projektu o chování horninového masivu v reakci na hloubení a zajišťování stability stavebních jam nebo při ražbě a zajišťování stability

ražených úseků podzemních děl. Jedná se o zajišťování a interpretaci výsledků geotechnického monitoringu (GTM), geotechnickou pasportizaci obnažených svahů stavebních jam a líce výrubu, zjišťování skutečného rozsahu a kvality použitých materiálů (výsledky kontrolního a zkušebního plánu) a geometrických parametrů pro určení skutečné tloušťky monolitického sekundárního ostění nebo polohy jeho líce,

- **provozování podzemního díla**, při kterém v rámci prohlídek probíhá vizuální sledování stavu použitých konstrukcí nebo navazující měření a sledování v rámci monitoringu konstrukcí za provozu. Jedná se např. o pasportizaci vad líce tunelových ostění, sledování deformačních projevů, měření teplotního spádu v ostění nebo dalších měření navazujících na geotechnický monitoring prováděný po dobu výstavby.

3. POUŽITÉ ZKRATKY

GTP	geotechnický průzkum,
GTM	geotechnický monitoring,
KZP	kontrolní zkušební plán,
NRTM	nová rakouská tunelovací metoda,
TMS	Tunnel management systém,
TTV	technologická třída výrubu.

4. POUŽITÁ TERMINOLOGIE

4.1. Geotechnické podmínky

Geotechnické podmínky postihují jak geologické a hydrogeologické vlastnosti horninového masivu, tak jeho chování při ražbě podzemního díla konkrétních rozměrů předpokládanou tunelovací metodou. Zohledňují geostatickou napjatost v hloubce vedení díla pod povrchem, strukturní skladbu masivu, výšku nadloží, orientaci diskontinuit vzhledem ke směru ražby a velikosti dílčích výrubů s ohledem na vznik nadvýrubů a riziko závalu, dobu stability nezajištěného výrubu, velikost přítoků podzemní vody, rozpojitelnost, vrtatelnost, abrazivitu s ohledem na opotřebení vrtného náčiní apod. Jsou zaměřeny nejen na vlastní horninový masiv, ale i na konkrétní podmínky z hlediska tunelování.

4.2. Geotechnický typ horninového masivu

Geotechnický typ definuje charakteristické společné vlastnosti určité části horninového masivu, ke kterým patří např. jeho struktura, vrstevnatost a puklinatost, vzdálenost, rozevření, orientace a typ výplně puklin, geotechnické parametry, propustnost a chování při kontaktu s vodou apod.

4.3. Kvazihomogenní celek

Kvazihomogenní celek je oblast horninového masivu s charakteristickým chováním (reakcí) na ražbu podzemního díla daných tvarů a rozměrů konkrétní tunelovací metodou. Může být tvořen jedním, nebo více geotechnickými typy. Kromě vlastností horninového masivu hraje při stanovení kvazihomogenního celku svou roli i výška nadloží, rozměry a tvar podzemního díla, předpokládaná doba stability nezajištěného výrubu a obecně faktory, které ovlivňují interakci podzemního díla a horninového masivu při provádění i po zajištění jeho stability ostěním.

4.4. Primární ostění

Primární ostění je do výrubu instalováno jako první po provedení záběru. Zpravidla se jedná o ostění ze stříkaného betonu. Instaluje se do výrubu, ve kterém ještě zpravidla probíhá deformace. V případě primárního ostění ze stříkaného betonu deformacím výrubu v počáteční fázi po nástřiku čelí malou tuhostí. S narůstající dobou po nástřiku dochází k nárůstu pevnosti i tuhosti ostění. Po dobu výstavby zajišťuje stabilitu výrubu tunelu a podporuje spolu s případnými dalšími doprovodnými opatřeními integritu nosného horninového prstence. Jeho nosná funkce v systému „ostění-hornina“ závisí na míře samonosnosti horninového masivu a z dlouhodobého hlediska na agresivitě prostředí a schopnosti ostění agresivním účinkům prostředí vzdorovat. Podle konkrétních podmínek plní funkci ostění dočasného nebo trvalého. U tunelů ražených pomocí tunelovacích strojů může být primární ostění tvořeno prefabrikáty (tubinky).

4.5. Sekundární ostění

Sekundární ostění je do výrubu instalováno v projektem definovaném časovém odstupu po provedení primárního ostění. Pokud není projektem stanoveno jinak, je ostění instalováno po odeznění deformací primárního ostění, což je zpravidla charakterizováno maximální rychlostí deformace primárního ostění 2 mm/měsíc. Sekundární ostění může být provedeno z monolitického betonu, stříkaného betonu nebo může být tvořeno prefabrikáty (tubinky).

4.6. Funkce ostění

Jedná se o schopnost ostění při dodržení technicko-kvalitativních požadavků přenášet po celou dobu životnosti tunelu veškerá předpokládaná zatížení, zajistit tvarovou stálost a dostatečný prostor z hlediska průjezdného průřezu, instalovaných zařízení a konstrukcí.

4.7. Blok betonáže sekundárního ostění

Jedná se o blok monolitického sekundárního ostění, který je betonován v jednom pracovním cyklu. Ostění může být v závislosti na geotechnických podmínkách buď z vyztuženého nebo nevyztuženého betonu. Jednotlivé bloky betonáže jsou od sebe oddělené příčnou pracovní nebo dilatační spárou. Příčná spára musí být v základové konstrukci a horní klenbě průběžná, Výztuž jednotlivých bloků betonáže není zpravidla propojená. V případě železničních tunelů se blok betonáže nazývá také „tunelový pás“.

4.8. Samonosnost horninového masivu

Samonosnost horninového masivu je jeho schopnost přenášet při ražbě podzemního díla daných rozměrů v daných geotechnických podmínkách určitou část nebo celé zatížení horninovým tlakem. Samonosnost horninového masivu je v předstihu nebo při ražbě zvyšována doprovodnými opatřeními, ke kterým patří zlepšování vlastností masivu (např. injektování, zmrazování, vakuování), šetrné rozpojování horninového masivu s minimalizací vzniku nadvýrubů (např. vhodným členěním výrubu, volbou optimální délky záběru, vhodně voleným vrtným schématem pro provádění trhacích prací, časování roznětu, jehlováním obrysu líce výrubu, použitím mikropilotových deštníků apod.) a vyztužení nosného horninového prstence systémovým kotvením a primárním ostěním.

4.9. Systém „ostění – hornina“

Systém ostění – hornina je základní nosný systém tunelu, který zajišťuje dostatečnou únosnost a tvarovou stálost výrubu v průběhu ražby i po uvedení tunelu do provozu. Rozdělení schopnosti přenášet zatížení mezi ostění a horninu závisí na stupni samonosnosti horninového masivu. V případě horninového masivu s vysokou samonosnou funkcí přenáší větší část zatížení horninový masiv, v případě horninového masivu bez samonosné funkce přenáší veškeré zatížení tunelové ostění. Únosnost systému a volba vhodného okamžiku instalace primárního ostění závisí na geotechnických vlastnostech horninového masivu, rozměrech podzemního díla a technologickém postupu výstavby (viz např. Fenner-Pacherova křivka).

4.10. Spolupůsobení primárního a sekundárního ostění

Spolupůsobení primárního a sekundárního ostění umožňuje v případě únosnosti primárního ostění zaručené po celou dobu životnosti tunelu dosáhnout ekonomického návrhu sekundárního ostění. V případě, že u primárního ostění nelze prokázat zachování celkové nebo částečné únosnosti po dobu životnosti tunelu, nelze spolupůsobení primárního a sekundárního ostění v návrhu nosného systému zohlednit, viz lit. [10].

4.11. Tunelové metry

Pro potřeby výstavby tunelu je zaveden pojem "tunelový metr" (označení TM), který v ose tunelu definuje vzdálenost v převládajícím směru ražby nebo postupu výstavby. Tunelový metr 0,000 je zpravidla definován jako průsečík projektované roviny portálu s osou tunelu. Staničení v tunelových metrech v tunelové trubě jednoznačně definuje polohu od portálu, usnadňuje orientaci pracovníků během výstavby a minimalizuje vznik chyb.

4.12. Životní cyklus tunelového ostění

Životním cyklem tunelového ostění je časové období od vzniku záměru přes návrh, realizaci a užívání až do uložení a recyklace. Po této době se již nepředpokládá, že by dílo bylo schopné dál plnit svou funkci.

5. POPIS STÁVAJÍCÍHO STAVU

Většina silničních, dálničních a železničních tunelů v ČR v novodobé tunelářské historii je a bude realizována pomocí konvenčních tunelovacích metod s monolitickým betonovým či železobetonovým ostěním. U dlouhých železničních tunelů (VRT) a tunelů metra lze předpokládat ražbu pomocí tunelovacích strojů a nasazení segmentového ostění, i když i v těchto případech jsou ze zahraniční praxe známé případy použití monolitického nebo stříkaného betonu ostění. Podle stávajících předpisů se předpokládá životnost nevyměnitelných součástí tunelu, tj. i tunelových ostění 100 let. Základním problémem stávajícího stavu získávání a uchovávání informací je zcela nesystematické získávání a uchovávání informací o horninovém masivu a konstrukci podzemního díla. Problematice správy a údržby tunelů se věnují např. předpisy [3], [4], [5] nebo [6].

5.1. Fáze provádění geotechnického průzkumu a projektování

První informace o vlastnostech horninového masivu jsou získávány v jednotlivých etapách geotechnického průzkumu (GTP), který je ve spolupráci s projektantem podzemního díla zpracováván jako podklad pro návrh technického řešení tunelu v odpovídajícím stupni projektové dokumentace. V rámci průzkumu by měly být zjištěny geotechnické parametry jednotlivých geotypů, popsána stavba horninového masivu a provedeno jeho rozdělení do kvazihomogenních celků. Projektová dokumentace na základě interpretace výsledků geotechnického průzkumu navrhne technické řešení podzemního díla, tj. příslušným kvazihomogenním celkům přisoudí technologický postup výstavby, geometrické tvary, materiálové charakteristiky a dimenze konstrukce ostění.

5.2. Fáze výstavby

V průběhu výstavby se v rámci geotechnického monitoringu (GTM) ověřuje prognóza rozdělení horninového masivu do geotypů a kvazihomogenních celků. Požadavky na návrh a provádění GTM definuje předpis [7]. V případě použití observační metody může dojít na základě skutečně zastižených podmínek k úpravě technologického postupu výstavby. V případě konvenčních tunelovacích metod může dojít k úpravě rozdělení trasy tunelu do technologických tříd výrubu (TTV) a úpravě dimenzí sekundárního ostění. Výsledky těchto rozhodnutí se dokladují ve např. ve stavebním deníku, formou záběrových listů apod. Zpravidla již nejsou prováděny žádné laboratorní ani in-situ zkoušky pro zjištění geotechnických parametrů hornin zastižených geotypů. Proto se v případě přepočtu geotechnických výpočtů vychází z výsledků GTP.

Formát dat geotechnického monitoringu prováděného při výstavbě je určen konkrétním programem zpracovatele GTM a „živá“ data mimořádně ceny tak zůstávají v jeho systému. Objednatel a majitel těchto dat je zpravidla odkázán na dílčí závěrečné zprávy GTM zpracovávané ve formátu PDF s přílohami, které jsou opět PDF tisky z příslušných programů zhotovitele GTM. S těmito daty již nelze v budoucnu dále aktivně pracovat a provádět vyhodnocení za účelem zjištění případné příčiny vzniku poruchy nebo atypického chování tunelového ostění za provozu podzemního díla.

V průběhu výstavby kromě sledování a měření prováděných v rámci GTM vznikají např. v rámci kontrolního a zkušebního plánu další data, která uvádějí materiálové charakteristiky primárního nebo sekundárního ostění, provádí se zaměření skutečné polohy líce primárního ostění jako podkladu pro rozhodování případné přeprofilování výrubu, zjišťování odchylky od projektované tloušťky sekundárního ostění nebo zjištění křivosti primárního ostění pro posouzení podmínek pro instalaci hydroizolační fólie. Tato měření a sledování se provádí na základě různých předpisů a smluvních požadavků a nejsou systematicky digitálně ukládána v databázi u objednatele stavby, nebo následně správce podzemní stavby. Stávající cíle a prostředky GTM jsou primárně nastaveny pro potřeby výstavby, i když značná část získaných dat je použitelná i pro interpretaci chování konstrukcí tunelu po jeho uvedení do provozu.

5.3. Fáze provozování

Ve fázi provozování tunelu neexistuje jednotný předpis, který by zajišťoval návaznost GTM na monitoring probíhající po uvedení podzemního díla do provozu a určoval, jaká měření a sledování mají být s ohledem na zjištění stavu nosných konstrukcí a posouzení dlouhodobého chování horninového masivu prováděna. Správce tunelu při hodnocení zpravidla vychází z dokumentace skutečného provedení stavby, která však většinou obsahuje pouze zásadní změny, ke kterým v průběhu výstavby došlo, které jsou zakresleny do realizační dokumentace daného objektu. Dokumentace skutečného provedení stavby většinou neobsahuje výsledky GTP, GTM, zkoušek prováděných v rámci KZP, zaměření polohy ostění a další případné informace, které mohou při komplexním vyhodnocení být podkladem pro zjištění příčiny poruchy.

5.4. Vyhodnocení stávajícího stavu

Při projektování, výstavbě a provozování tunelu probíhá celá řada sledování, zkoušek a měření, jejichž výsledkem je značné množství informací a dat, která nemají systematicky určenou vazbu na daný úsek podzemního díla a v něm použitou nosnou konstrukci, u které se předpokládá životnost 100 let.

Tato „živá“ data zpravidla končí u konkrétní firmy, která měření a sledování provádí, ať se jedná o zpracovatele GTM, zkušebny materiálů použitých při výstavbě, geodety provádějící skenování primárního ostění apod. Formát ukládaných dat GTM i způsob jejich prezentace je závislý na informačním systému zhotovitele GTM a k investorovi či správci tunelu se v dlouhodobě použitelné formě nedostanou.

„Dočasné konstrukce“, ke kterým bývá zařazeno i primární ostění, nejsou mnohdy předmětem skutečného provedení stavby, ačkoli právě způsob zajištění stability výrubu primárním ostěním a jeho chování při výstavbě může signalizovat atypické chování horninového masivu a příčinu problémů po uvedení tunelu do provozu.

Geotechnický monitoring prováděný za provozu má jen minimální nebo nemá žádnou vazbu na výsledky geotechnického průzkumu upřesněné na základě měření a sledování v rámci geotechnického monitoringu při výstavbě. Protože nelze zaručit, že monitoring při výstavbě a za provozu bude provádět stejná firma, není vzhledem k nekompatibilitě jednotlivých programových systémů možné zaručit návaznost měření a vyhodnocování dlouhodobého chování konstrukce i horninového masivu.

Zcela chybí jednotný systém, který by definoval, které údaje jsou pro případné zjišťování příčin poruch ostění nebo atypického chování podzemního díla relevantní, jakým způsobem se mají uchovávat a jak zajistit vazbu těchto informací na konkrétní část tunelu a jeho ostění.

6. NOVÝ PŘÍSTUP K ZÍSKÁVÁNÍ A VYHODNOCOVÁNÍ DAT

Cílem metodiky je sloučení veškerých dostupných informací potřebných pro posuzování stavu horninového masivu a tunelového ostění do jednoho databázového systému. Protože je většina novodobých dopravních tunelů prováděna buď pomocí NRTM s monolitickým sekundárním ostěním nebo jako hloubených s ostěním délky bloku betonáže 10 m až 12,5 m, je jako základní informační prvek zvolen právě blok betonáže ostění. Ten má v případě silničních, dálničních nebo železničních tunelů své jedinečné číslo a jednoznačně tak určuje polohu bloku betonáže v rámci tunelové trouby.

Každému bloku betonáže je v databázi přiřazen „rodný list“, který obsahuje informaci o výšce nadloží, skladbě horninového masivu, jeho geotechnických parametrech určených geotypy a kvazihomogenními celky, chování horninového masivu při ražbě včetně výsledků pasportizace čelby a geotechnických měření, informace tvorbě nadvýrubů a použitým způsobu zajištění stability výrubu, o skutečné poloze primárního ostění, skutečné tloušťce sekundárního ostění, způsobu vyztužení, průběhu jeho betonáže a způsobu ošetřování, materiálových parametrech primárního a sekundárního ostění apod.

Cílem není komplexní vyhodnocení všech dostupných informací pro každý blok betonáže, ale systematický sběr všech dostupných údajů pro vyhodnocení až v případě, že v daném bloku betonáže dojde k určitému typu vady sekundárního ostění. Podle charakteru vady by tak bylo možné vyhodnotit relevantní vstupní hodnoty, najít její příčinu a optimální způsob sanace.

7. DATA ZÍSKÁVANÁ PRO HODNOCENÍ STAVU PODZEMNÍHO DÍLA

Základní myšlenkou metodiky sběru a archivace dat je zajištění maximálního množství podkladů, které jsou zpravidla v průběhu životního cyklu podzemního díla vytvářeny, pouze nejsou systematicky ukládány v centrální databáze a nejsou vztaženy ke konkrétnímu bloku betonáže ostění. Tato data lze průběhu životního cyklu tunelu využít při hledání příčin atypického chování podzemního díla.

Následující metodika se věnuje výstavbě tunelů pomocí konvenčních tunelovacích metod. V České republice jsou tyto metody nejvíce zastoupené Novou rakouskou tunelovací metodou (NRTM). V případě výstavby tunelů pomocí tunelovacích strojů (např. TMB), nebo v případě hloubených tunelů je nutné rozsah a obsah sbíraných dat odpovídajícím způsobem upravit.

Nedílnou součástí této metodiky je dokument „Databázová struktura pro shromažďování dat tunelového ostění po dobu životního cyklu“, který podrobně popisuje stavbu základní databázové struktury, která je vhodná pro sběr základních dat souvisejících s tunelovým ostěním od počáteční fáze geotechnického průzkumu jako podkladu pro vypracování projektové dokumentace, přes geotechnický monitoring, zkoušky a sledování prováděná v průběhu realizace, monitoring po uvedení tunelu do provozu, až po pasportizaci jednotlivých bloků betonáže tunelového ostění v průběhu provozování podzemního díla.

7.1. Fáze provádění geotechnického průzkumu a projektování

Fázi geotechnického průzkumu a projektování nelze z hlediska získávání informací oddělit, neboť jsou prováděné v úzké spolupráci. Geotechnický průzkum musí být zaměřen na konkrétní projekt podzemního díla, aby projektantovi poskytl maximum informací o vlastnostech horninového masivu a jeho chování při provádění díla. Na základě výsledků geotechnického průzkumu je horninovým masiv rozdělen do geotypů a kvazihomogenních celků. Projektant na základě interpretovaných výsledků GTP přiřadí předpokládaným geotechnickým podmínkám konkrétní postupy výstavby a vytvoří blokové schéma tunelu, tj. rozdělení tunelové trouby na bloky betonáže s konkrétním tvarem a materiálovými charakteristikami. V této etapě životního cyklu je vytvořena na základě známých informací z GTP a projektové dokumentace v rámci TMS (Tunnel management systém) databázová struktura tunelu se základní jednotkou blok betonáže, která je v dalších fázích životního cyklu tunelu upravována a doplňována.

Bloku betonáže jsou podle prognózy geotechnických podmínek v databázi přiřazeny informace o:

- výšce nadloží,
- výšce skalního nadloží,
- geotypech a jejich geotechnických parametrech získaných na základě laboratorních a in-situ zkoušek,
- zatřídění horninového masivu do kvazihomogenních celků,
- hydrogeologických podmínkách (úroveň hladiny podzemní vody, agresivita, předpokládané přítoky)
- tvaru a dimenzích ostění,
- údaje o použití vyztuženého nebo nevyztuženého ostění,
- materiálových parametrech ostění,
- přípustných odchylkách od předepsané tloušťky, tolerancích atd.

7.2. Fáze výstavby

Ve fázi výstavby se databáze upřesňuje o informace týkající se:

- skutečně zastížených geotechnických podmínek a chování horninového masivu,
- záznamy o ražbě a skutečně prováděných opatření k zajištění stability výrubu,
- prováděných geodetických měření k zjištění skutečné polohy primárního ostění po ustálení jeho deformací,
- skutečné tloušťce a způsobu vyztužení sekundárního ostění,
- informace o parametrech použitých materiálů (stříkaný beton primárního ostění, monolitický beton sekundárního ostění, horninových kotev atd.) získané na základě výsledků kontrolního a zkušebního plánu,
- informace získané v rámci provádění GTM, přičemž výsledky měření se bloku betonáže přisoudí na základě předpokladu stejného chování v daném úseku tunelu podle pasportizace čeleb a zařazení do kvazihomogenního celku,

- informace o deformaci primárního ostění v době betonáže sekundárního ostění (odezdná deformace nebo rychlost deformace v mm/měsíc),
- časových snímků jednotlivých činností (provádění ražby a primárního ostění, betonáž sekundárního ostění včetně množství skutečného objemu betonu, doby betonáže, termínu odbednění a odbedňovací pevnosti, ošetřování po odbednění proti teplotnímu šoku apod.).

7.2.1. Ověřování vlastností horninového masivu

Jedná se o sledování a měření prováděná na základě GTM. Konkrétně se jedná o pasportizaci čelby a líce výrubu, měření deformací primárního ostění a další měření prováděná podle požadavků projektanta podzemního díla k ověření prognózy geotechnických podmínek a předpokladů návrhu technického řešení v projektové dokumentaci. Typicky se může jednat např. o zjišťování rozsahu rozvolněné oblasti v okolí výrubu a nebo šíření deformační vlny před čelbou pomocí extenzometrů nebo inklinometrů.

Na základě komplexní interpretace výsledků GTM je upraveno původní rozdělení horninového masivu do geotypů (geotechnické parametry jsou zpravidla přebírány z výsledků GTP) a kvazihomogenních celků, do kterých jsou doplněny informace o měřených deformacích. K příslušnému bloku betonáže jsou přiřazeny odpovídající pasporty čelby s uvedením vrstevnatosti a puklinatosti, hustotě, orientaci a výplni puklin.

V rámci doplnění informací o horninovém masivu by měly být v databázi uvedeny všechny relevantní informace, které by mohly v budoucnu dát představu o stavu horninového masivu za tunelovým ostěním a odhalit možnou příčinu jeho atypického chování nebo příčinu vzniku vady.

7.2.2. Skutečné provádění ražby a primárního ostění

Sledování prováděná při ražbě a zajišťování stability výrubu úzce souvisí se stanovením vlastností horninového masivu. Jedná se zejména o časové snímky průběhu ražeb od provedení záběru k zajištění stability výrubu primárním ostěním, záběrové listy uvádějící skutečně použité prvky pro zajištění stability výrubu (tloušťka primárního ostění a jeho vyztužení, způsob systémového kotvení výrubu, použití předstihových opatření a opatření k zajištění stability čelby, tvorbu nadvýrubů a způsob jejich vyplnění atd.). Dále je databáze doplňována o výsledky zkoušek náběhu pevnosti stříkaného betonu, tahové zkoušky kotev, klimatické podmínky při nástřiku betonu atd.

Velmi důležitou roli hraje zaměření skutečné polohy primárního ostění před betonáží sekundárního ostění. Tak je možné kromě získání informace o křivosti podkladu pro instalaci hydroizolační fólie získat informaci o skutečné tloušťce sekundárního ostění. Tu lze pak porovnat s kritériem přípustné odchylky od teoretické tloušťky ostění.

7.2.3. Skutečné provádění sekundárního ostění

Na případný vznik poruch může mít zásadní vliv materiál a způsob provádění sekundárního ostění. V této etapě výstavby je databáze doplňována zejména o:

- skutečnou tloušťku sekundárního ostění (na základě zaměření polohy primárního ostění),

- skutečný objem betonu bloku sekundárního ostění,
- způsobu vyztužení/nevyztužení sekundárního ostění,
- informace o betonové směsi (receptura, konzistence) a podmínkách při ukládání do bednění,
- časový průběh betonáže (zahájení, ukončení),
- dobu odbednění po dokončení betonáže a odbedňovací pevnost ve vrcholu klenby,
- použitý způsob ošetřování (použití „klíma“ vozu proti teplotnímu šoku) a okamžik ukončení ošetřování,
- časový interval od dokončení betonáže bloku a zahájení injektáže/výplně vrchlíku klenby, množství použitého materiálu a injektážní tlak,
- výsledky měření pevnosti nebo modulu pružnosti, měření rychlosti náběhu pevnosti betonu v čase,
- výsledky měření průběhu teploty po tloušťce ostění (měřické profily jsou v ostění tunelu instalovány v oblasti portálů a zhruba uprostřed délky tunelové trouby).

Po dokončení etapy výstavby již zpravidla nelze získat žádné další informace o vlastnostech horninového masivu a parametrech primárního ostění. Informace o parametrech sekundárního ostění lze získat buď destruktivními metodami nebo velmi omezenými nedestruktivními metodami (např. zjišťování pevnosti betonu Schmidovým kladivem). Proto je nutné věnovat doplnění veškerých relevantních informací do databáze maximální péči a pozornost.

7.3. Fáze provozování

Při provozování podzemního díla se měření a sledování omezují na:

- vizuální pasportizaci stavu povrchu sekundárního ostění,
- měření deformací sekundárního ostění a sledování vývoje těchto deformací v čase,
- případně lze v rámci monitoringu po uvedení do provozu sledovat další veličiny (např. měření napětí pomocí tenzometrů osazených v ostění při betonáži, měření průběhu teploty po tloušťce ostění, měření kontaktního napětí mezi primárním a sekundárním ostěním atd.). Přípravu pro tyto typy měření je nutné provádět podle připraveného projektu monitoringu již ve fázi výstavby, neboť dodatečné osazení čidel není možné.

Atypické chování ostění podzemní stavby lze po uvedení tunelu do provozu identifikovat pouze na základě těchto vnějších projevů, přičemž bez dostatečných informací získaných ve fázi projektování a zejména výstavby tunelu je zjištění příčiny velmi obtížné. Na tunelové ostění může působit celá řada faktorů a jejich kombinací, které mohou atypické chování ostění, resp. jeho vady a poruchy vyvolat.

8. FAKTORY NEGATIVNĚ OVLIVŇUJÍCÍ STAV A ŽIVOTNOST OSTĚNÍ

Většina dopravních tunelů je prováděna podle principů observační metody. Na základě prognózy geotechnických podmínek je navržen způsob výstavby a technické řešení jednotlivých konstrukcí stavby. Při výstavbě jsou v rámci geotechnického monitoringu prováděna měření a sledování, která by měla umožnit postupy výstavby a technické řešení optimalizovat podle skutečně zastižených podmínek. Kvalitu

provádění zajišťují jednak požadavky norem a předpisů, jednak autorský dozor projektanta a technický dozor objednatele. Faktory, které mohou negativně ovlivnit stav a tím i životnost tunelového ostění lze obecně rozdělit do dvou kategorií.

- Neočekávané okolnosti
- Chyby návrhu a provádění

K negativním faktorům mohou patřit i odlišné fyzikální nebo chemické podmínky od podmínek předpokládaných v návrhu konstrukce.

8.1. Neočekávané okolnosti

Základním stavebním materiálem podzemního díla je větší či menší části horninový masiv. Jeho zapojení do nosné funkce systému „ostění-hornina“ přímo odpovídá jeho samonosné funkci, tj. přenášet zatížení horninovým tlakem a spolu s tunelovým ostěním zajistit dostatečnou stabilitu a statickou funkci podzemního díla po celou dobu jeho životnosti. Kvalitu a chování horninového masivu lze zjistit geotechnickým průzkumem upřesněným při provádění jak hodnocením skutečného stavu horninového masivu na čelbě, tak prostředky geotechnického monitoringu. Každá podzemní stavba je zatížena určitým geotechnickým rizikem, které je závislé na případných odchylkách od předpokládaného stavu. Jedná se o neočekávané okolnosti, které mohou být způsobené např.:

- zhoršením geotechnických parametrů horninového masivu zjištěných v rámci GTM vlivem výstavby. Jedná se např. o rozvolnění horninového masivu v okolí výrubu vlivem uvolnění geostatické napjatosti nebo vlivem seismických účinků trhacích prací. V případě členění výrubu na dílčí výrubu k těmto situacím dochází opakovaně,
- zhoršením geotechnických vlastností horninového masivu vlivem zvýšeného proudění podzemní vody, neboť tunel po dobu výstavby a případně i po uvedení do provozu působí v horninovém masivu jako „drén“, který může ovlivnit režim podzemní vody. To může způsobit degradaci hornin citlivých na styk s vodou nebo vymývání výplně puklin porušeného horninového masivu,
- při výstavbě nezastiženými anomáliemi v okolí výrubu, které ražbou nebyly zastiženy. Může se jednat o podzemní dutiny (krasové oblasti), nebo nehomogenity způsobené nesymetrickým zvětráváním horninového masivu,
- aktivací bobtnacích procesů v horninách nebo zeminách náchylných při styku s vodou k bobtnání.

Tyto anomálie se mohou projevit až s časovým odstupem od provedení stavby v průběhu provozování tunelu a mohou způsobit nepředpokládaná zatížení tunelového ostění nebo nerovnoměrné sedání sousedních bloků betonáže.

8.2. Chyby návrhu a provádění

Kromě neočekávaných okolností může při výstavbě dojít k selhání lidského faktoru jak při návrhu technického řešení podzemního díla, tak při jeho provádění. Vždy se jedná o selhání kontrolních mechanismů.

K nejčastějším faktorům, které mohou negativně ovlivnit vznik vad a životnost ostění patří:

- chybná volba typu konstrukce (se spodní klenbou nebo na patkách),
- chybné dimenzování konstrukce ostění,
- překročení přípustné odchylky od předepsané tloušťky sekundárního ostění nedostatečnou výplní nadvýrubů a nepřipustnou křivostí primárního ostění,
- použití betonové směsi špatné konzistence nebo receptury (hutnění, pevnost, hydratační teplo),
- nepřipustné přerušení betonáže (vznik neošetřených „pracovních“ spár),
- nedodržení krycí vrstvy výztuže (např. podrcením distančních prvků při manipulaci s bednicím vozem),
- nevhodná konstrukce a materiál bednicího vozu, chybně provedená aktivace plechu bednicího vozu ve vrcholu klenby při jeho posunu na následující betonovaný blok,
- nekázeň při montáži výztuže a napadané předměty do bednění,
- nedodržení technologického postupu betonáže sekundárního ostění (rychlost betonáže, příliš nízká nebo příliš vysoká odbedňovací pevnost, ošetřování po odbednění apod.),
- nedostatečné vyplnění dutiny ve vrchlíku klenby nebo použití příliš velkého injektážního tlaku.

Různé typy konstrukcí jsou různě citlivé na chyby způsobené technickým návrhem a nekázní při provádění.

8.3. Typy trhlin, jejich vznik a šíření

Nepředvídané chování tunelového ostění se zpravidla projevuje vznikem trhlin, které jsou zjištěné při prohlídkách tunelu a pasportizaci ostění. Trhlina je vadou až v okamžiku, kdy její šířka, poloha nebo orientace překročí kritéria daná normami a předpisy. Stejně, jako při sledování deformačního chování tunelového ostění však hraje při hodnocení trhliny sledování jejího vývoje v čase. Pokud se šířka nebo délky trhliny v čase zvětšuje a tento proces se zrychluje, mohou být varovným signálem neočekávaného stavu i parametry trhliny pod stanoveným kritériem.

Při pasportizaci ostění po uvedení tunelu do provozu se vizuálně kontroluje stav líce ostění zejména se zaměřením na vznik a šíření trhlin a jeho odprisky v pracovních a dilatačních spárách.

Příčin vzniku a šíření trhlin v sekundárním ostění je celá řada. Zpravidla se jedná o:

- a) Trhliny způsobené statickým zatížením od horninového tlaku,
- b) Trhliny způsobené smršťováním betonu,
- c) Trhliny způsobené v nevyztuženém ostění příliš vysokou odbedňovací pevností,
- d) Trhliny způsobené teplotním šokem po odbednění (hydratačním teplem),
- e) Trhliny způsobené náhlou změnou tloušťky (tuhosti) sekundárního ostění,
- f) Trhliny způsobené v průběhu betonáže chybným technologickým postupem.

Trhliny podle příčiny vzniku a charakteru mohou vznikat buď krátce po odbednění ještě před předáním díla objednateli, nebo s výrazným časovým odstupem. Proto je nezbytně nutné v pasportizaci vad a trhlin v ostění dokumentovat nejen polohu a šířku trhliny, ale i její vývoj v čase. Stejně tak je třeba rozlišovat kritéria pro vyztužené a nevyztužené ostění nebo ostění, které zároveň plní hydroizolační funkci v případě, že není použita hydroizolační fólie.

8.3.1. Trhliny způsobené statickým zatížením

Jedná se zpravidla o zatížení horninovým nebo hydrostatickým tlakem. Trhliny jsou zpravidla rovnoběžné s osou tunelu. Pokud není ostění zatíženo asymetrickým horninovým tlakem, trhlinka vzniká zpravidla ve vrcholu klenby. Může být doprovázena paralelními trhlinkami na bocích ostění. V případě asymetrického zatížení horninovým tlakem se trhlinka posouvá od osy tunelu směrem k jeho boku.

8.3.2. Trhliny způsobené smršťováním betonu

Autogenní smrštění a smrštění od vysychání způsobují objemové změny, které snadno vedou k napětím dosahující tahové pevnosti betonu. Směr trhlin je zpravidla subvertikální a vyskytují se zhruba v polovině, nebo ve třetinách délky bloku betonáže. V případě vyztuženého ostění je při správném návrhu výztuže vznik těchto trhlin omezen, u nevyztužených ostění se trhlinka může otevírat při správné volbě receptury betonové směsi a správném ošetřování betonu až do šířky cca 0,5 mm.

8.3.3. Trhliny způsobené příliš vysokou odbedňovací pevností

Tento typ trhlin se u nevyztuženého ostění vytváří v průběhu hydratace betonu v bednicím voze. Cyklus betonáže sekundárního ostění v ražené části tunelu probíhá relativně rychle a za 7 dní je zpravidla provedeno cca 5 bloků betonáže. Provádění sekundárního ostění ražených úseků tunelů probíhá systémem 24 hod./7 dnů v týdnu. Doporučená odbedňovací pevnost nevyztuženého ostění je cca 2 až 3 MPa ve vrcholu klenby. Při betonáži do ocelového bednicího vozu může docházet k rychlému odvodu tepla pláštěm bednicího vozu a v ostění se mohou vytvářet podélné trhliny obdobného směru, jako v případě trhlin způsobených statickým zatížením horninovým tlakem. Při odbednění ostění při nízké odbedňovací pevnosti se trhliny vlivem dotvarování betonu mohou uzavřít. Při vyšších odbedňovacích pevnostech již může docházet k „zakonzervování“ trhliny v betonu a k jejímu uzavření po odbednění již nemusí dojít.

8.3.4. Trhliny způsobené teplotním šokem

Tento typ trhlin je charakteristický pro tunelová ostění ražených úseků tunelu, u kterých dochází k odbednění po krátké době od betonáže zpravidla po 6 až 8 hod. po dokončení betonáže. V okamžiku odbednění ještě nedošlo k výraznému poklesu hydratačního tepla a při velkém rozdílu teploty ostění a prostředí tunelu může teplotní zatížení způsobit vznik trhlin. Tento jev je možné omezit použitím ošetřovacího „klima“ vozu, který je tažen bezprostředně za bednicím vozem a podle zahraničních předpisů by měl mít délku 3 bloků betonáže. Ošetřovací vůz je tvořen tepelným izolačním pláštěm a vzduchovými manžetami, po jejichž nafouknutí se uzavře prostor mezi ostěním a pláštěm ošetřovacího vozu. Tak vznikne mikroklima, které brání rychlému ochlazení a vysychání betonu ostění po jeho odbednění.

8.3.5. Trhliny vzniklé náhlou změnou tloušťky ostění

Tento typ trhlin opět souvisí s ostěním ražených úseků tunelu, s přípustnou odchylkou od projektované tloušťky sekundárního ostění, tvorbou nadvýrubů a jejich výplní. S ohledem na ekonomiku výstavby tunelů se zpravidla připouští, aby se nadvýrubu vyplňovaly drahým stříkaným betonem pouze v takové míře, aby odchylka od projektované tloušťky sekundárního ostění nepřesáhla 30 až 50%. Další podmínkou, která omezuje prudký skok v tloušťce sekundárního ostění je požadavek na rovinatost podkladu pro pokládku hydroizolační fólie. Pokud tyto podmínky nejsou splněny, tj. tloušťka sekundárního ostění přesahuje projektovanou tloušťku o více než 50 % a ke změně tloušťky dochází skokem, může nerovnoměrné oteplování ostění různých tlouštěk hydratačním teplem způsobit vznik trhlin v ostění.

8.3.6. Trhliny způsobené chybným technologickým postupem

Dalším typem trhlin s výskytem u ražených úseků tunelu je trhlinka parabolického tvaru, která se vyskytuje poblíž spáry mezi bloky betonáže. Příčinou vzniku tohoto typu trhliny je aktivace plechu na konci bednicího vozu, který zamezuje vylití betonové směsi na rozhraní právě odbedněného a betonovaného bloku betonáže. Pevnost betonu právě odbedněného bloku betonáže je ve vrcholu klenby poměrně nízká a pokud je plech vůči tomu to bloku vyklínován s příliš vysokou kontaktní silou, může tato síla způsobit ve vrcholu klenby odtržení části bloku betonáže. Tato skutečnost je mimořádně nebezpečná u nevyztužených ostění, kdy by při vytvoření trhliny přes celou tloušťku ostění a jejímu spojení s pracovní spárou mezi bloky betonáže mohlo dojít k vypadnutí takto ohraničeného kusu ostění. Řešením je buď vložení pryžové vložky mezi ostění a těsnící plech bednicího vozu, nebo šachovnicová betonáž „ob blok“. Ta však vyžaduje buď použití dvou bednicích vozů, což je vzhledem k ceně bednicího vozu dost nákladné, nebo po dokončení betonáže lichých bloků ostění návrat bednicího vozu na začátek tunelu a bednění sudých bloků. To je zpravidla možné s ohledem na harmonogram výstavby pouze u krátkých tunelů.

8.3.7. Kritéria pro přípustnou šířku, polohu a počet trhlin v bloku betonáže

Při provozování tunelu vzniká v tunelu značně agresivní prostředí, které je výsledkem smísení vodního aerosolu s exhalacemi výfukových plynů. Toto prostředí je agresivní na ocelové konstrukce a jsou známy případy, že v prostředí silničních nebo dálničních tunelů rezne i méně kvalitní nerezová ocel. Z hlediska agresivity prostředí je situace v železničních tunelech lepší, než v tunelech s automobilovou dopravou. Lze předpokládat, že tato situace by se měla zlepšovat s útlumem používání benzinových a naftových motorů.

Vzhledem k agresivitě prostředí má vznik trhlin negativní vliv zejména na vyztužené ostění. U ostění bez hydroizolační funkce by šířka trhliny neměla překročit 0,3 mm, u ostění s hydroizolační funkcí 0,2 mm (při tloušťce krycí vrstvy výztuže 50 mm). Kritéria šířky trhlin jsou u vyztužených ostění dána normou a projektovou dokumentací. V případě nevyztužených ostění jsou kritéria dána předpisem TKP18 a neomezují se pouze na šířku trhlin, ale i na jejich počet a polohu v bloku betonáže (viz Tab. 1). Vzhledem k tomu, že v případě nevyztužených ostění nehraje roli riziko koroze výztuže, jsou přípustné počty trhlin dány spíše kompromisním řešením mezi estetikou a ekonomikou výstavby tunelů. Je zřejmé, že u nevyztuženého ostění není beton schopen přenášet tahová napětí, která u železobetonu zachycuje

výztuž. Proto lze očekávat, že blok betonáže nevyztuženého ostění bude smršťovacími trhlinami přibližně rovnoběžnými se spárou mezi bloky betonáže rozdělen na poloviny nebo třetiny. Vzhledem k tomu, že ze statického hlediska převládá příčné působení klenby tunelu, nehrají tyto trhliny ze statického hlediska zásadní roli, je jen potřeba z estetického hlediska omezit jejich počet a šířku. Pokud by objednatel trval na sanaci každé smršťovací trhliny překračující šířku 0,3 mm, jako v případě vyztuženého ostění, promítla by se tato podmínka do ceny zhotovitele, protože by vzhledem k nízké pevnosti betonu v tahu buď musel všechny takto vzniklé trhliny na své náklady sanovat, nebo by bloky betonáže prováděl jako vyztužené, ačkoli by ze statického hlediska výztuž nebyla nutná.

Lom betonu na hranách pracovních/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/dilatační spáry nebo jiné nejbližší trhliny, je nutné předpokládat možnost odlomení části betonu ostění. Tvoří-li trhlina a pracovní /dilatační spára a/nebo více trhlin spojitý uzavřený tvar, vymezující možnost odlomení/uvolnění části betonu, je nutné šířku trhliny (včetně nekonstrukční trhliny) sledovat při běžných prohlídkách nejméně 1x ročně, pokud její šířka nepřesáhne 0,2 mm. Při šířce trhliny od 0,2 mm do 0,8 mm je nutné trhliny sledovat při mimořádných prohlídkách 1x za 3 měsíce a při šíři trhliny nad 0,8 mm je nutno navrhnout a provést opatření (např. opravu dotčeného úseku ostění). Odštěpky a uvolněné části betonu, zejména na hranách pracovních/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 přípustná hloubka konstrukčních trhlin dána požadavkem na minimální tloušťku tláčené zóny účinného průřezu betonu a musí být stanovena na základě statického výpočtu. Hloubka nekonstrukčních trhlin vyztuženého ostění není omezena a může procházet přes celou tloušťku ostění.

Maximální přípustné hodnoty sledovaných parametrů ostění z nevyztuženého betonu		Jedn.	Stav při převzetí	Konec záruky	Konec životnosti
Trhliny konstrukční	Šířka trhlin (horizontálních)	[mm]	0,5	1,0	1,5
	Hloubka trhlin	[mm]	Určí statický výpočet ve stupni DZS		
	Svislý posun (kolmo k ose tunelu)	[mm]	1	2	3
	Vodorovný posun (kolmo k ose tunelu)	[mm]	1	2	3
	Počet trhlin v sekci délky 12 m (horizontálních)	[ks]	3	4	5
Trhliny nekonstrukční	Šířka trhlin (vertikálních)	[mm]	2	3	3
	Hloubka trhlin	[mm]	Až na plnou tloušťku ostění		
	Počet trhlin na délku sekce 12 m (vertikálních, které probíhají přes celou klenbu)	[ks]	2	2	2

Tab. 1 Maximální přípustné hodnoty trhlin nevyztuženého ostění podle TKP-18 MD ČR

9. METODIKA PROVÁDĚNÍ PASPORTIZACE SEKUNDÁRNÍHO OSTĚNÍ

Požadavky na provádění prohlídek tunelů pozemních komunikací uvádí předpis [3]. V současné době je pasportizace sekundárního ostění prováděna podle formuláře uvedeného v lit. [4]. Z hlediska identifikace možných příčin vzniku trhlin a vad sekundárního ostění není tento způsob pasportizace vhodný, protože formulář věnuje popisu sekundárního ostění minimální prostor, neumožňuje graficky lokalizovat polohu a směr trhlin v ostění, a především neumožňuje sledovat vývoj stavu trhlin v bloku ostění v čase. Jedná se o zvětšování jejich počtu, šířky nebo délky.

Aby bylo možné vznik a šíření trhlin v ostění odpovídajícím způsobem sledovat a v ideálním případě hodnocení stavu automatizovat, je potřeba zavést následující konvence a zásady.

- (1) Formulář bude vytvořen pro každý blok betonáže jako jeho „rodný list“, ve kterém budou zaneseny veškeré informace o vzniku a vývoji trhlin v ostění. Na formuláři bude uveden název tunelu, tunelová trouba (levá/pravá) a číslo bloku betonáže.
- (2) Bude rozlišen typ bloku betonáže
 - a) **V** – vyztužený,
 - b) **N** – nevyztužený,
 - c) **H** – hloubený.
- (3) Formulář bude obsahovat rozvinutý plášť ostění pro zakreslování polohy trhliny s označením čísla trhliny.
- (4) Formulář umožní sledovat výsledky pasportizace po dobu alespoň 5 let
- (5) Pro metodiku bude zaveden následující stav trhliny
 - a) **N** - nová trhlina zastižena poprvé při pasportizaci v daném roce,
 - b) **S** – stará trhlina známá z předchozí pasportizace,
 - c) **SAN** – dříve sanovaná trhlina z důvodu překročení kritéria,
 - d) **Z** – zavřená trhlina, dříve zaznamenaná trhlina, která při následné pasportizaci nebyla viditelná,
 - e) **SP** – trhlina spojená s jinou trhlinou. Z hlediska posuzování počtu trhlin na blok betonáže jsou spojené trhliny považovány za jednu trhlinu.
- (6) Pro metodiku bude zaveden následující typ a směr trhlin
 - a) **HT**- horizontální (podélná) trhlina,
 - b) **VP** – vertikální (příčná) průběžná trhlina přes celý blok betonáže,
 - c) **VD** – vertikální (příčná) dílčí neprůběžná trhlina na výšce x metrů nad úrovní chodníku,
 - d) **V** – vertikální (příčná) dílčí neprůběžná trhlina nad výškou x metrů nad úroveň chodníku,
 - e) **Š** – šikmá trhlina obecně umístěná v bloku betonáže,
 - f) **HB** – trhlina v blízkosti hrany bloku betonáže (u pracovní nebo dilatační spáry),
 - g) **HV** – trhlina na zadní hraně výklenku (např. SOS, hydrantu, šachty čištění drenáže),
 - h) **RV** – trhlina na rohu výklenku směřující do ostění tunelu (zpravidla pod cca 45° vzhůru),
 - i) **RN** – trhlina vybíhající z rohu niky pro kabely.

Při pasportizaci se v průběhu prohlídky v tunelu do formuláře zakreslují polohy a čísla trhlin a do připravených tabulek se vyznačí stav a typ trhliny, její šířka a délka. Pro jednotlivé typy bloků betonáže, typy a směry trhlin a okamžik posuzování (převzetí, konec záruky, konec životnosti) je pak možné nastavit podle norem a předpisů příslušná kritéria (viz Tab. 2)

Kritéria přípustné šířky trhlin pro jednotlivé směry a typy trhlin			
Kritéria šířky trhlin	Typ/Směr	Šířka	Popis bloku betonáže a typu trhliny
	V, H	0,30	trhliny ve vyztužených blocích
	HV, RV		trhliny v místě výklenků (jsou vždy vyztužené)
	HB	0,80	trhliny poblíž spár mezi nevyztuženými bloky betonáže
	HT, Š, RN	1,00	horizontální trhliny v nevyztužených blocích betonáže
	VP, VD, V	3,00	vertikální trhliny v nevyztužených blocích betonáže

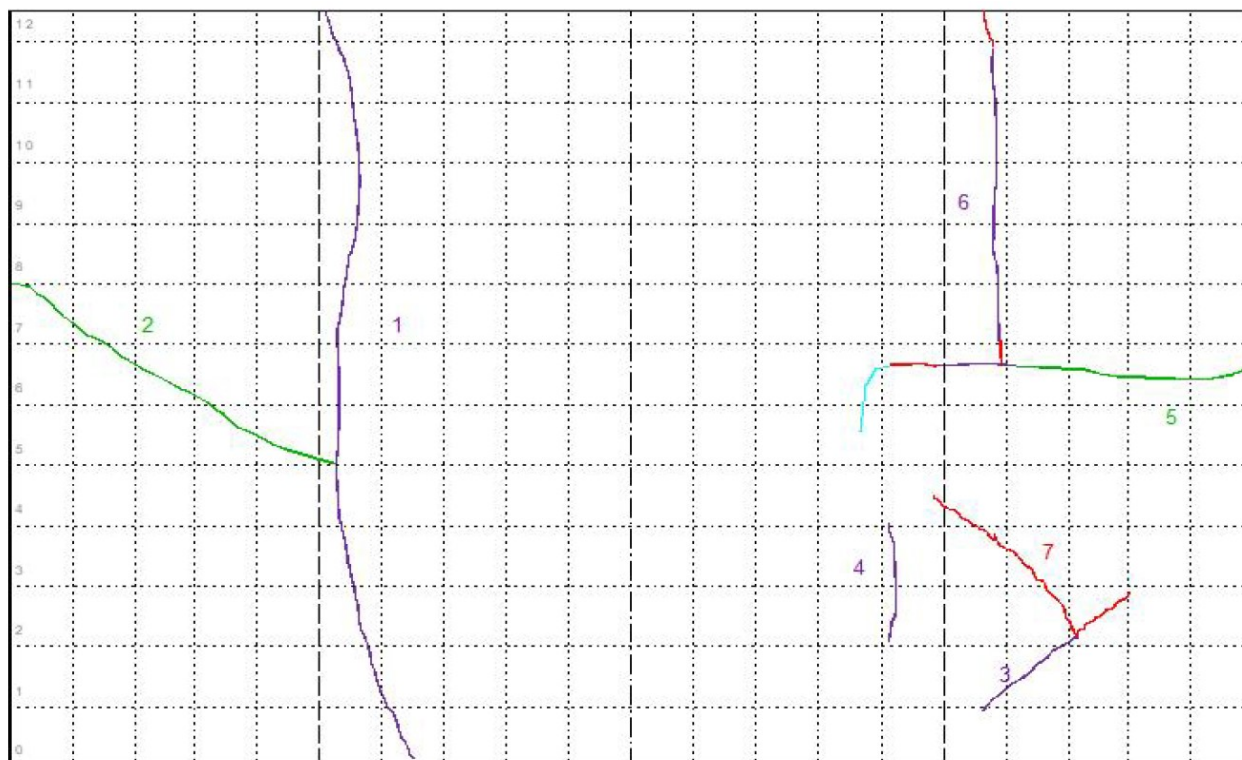
Tab. 2 Příklad nastavení kritérií šířky trhlin

Obdobným způsobem lze nastavit přípustné počty určitých typů trhlin na jeden blok betonáže. Na rozvinutém plášti ostění se každý rok budou zakreslovat nové trhliny, nebo prodloužení starých trhlin

barvou, která odpovídá roku pasportizace v tabulkové části formuláře. Pokud nepředpokládáme, že v jednom bloku betonáže nevznikne více, než 8 trhlin, vypadá tabulková část formuláře podle příkladu v Tab. 3. Pro předpokládaný větší počet trhlin lze tabulku odpovídajícím způsobem rozšířit. Po zanesení příslušných hodnot do tabulky lze vyhodnocení zjištěných informací provádět automaticky s tím, že program vyhodnotí i bloky betonáže a čísla trhlin, ve kterých došlo k překročení přípustných hodnot a je třeba provést jejich sanaci. Na rozvinutém plášti ostění je pak jako doplněk tabulky zakreslena poloha trhlin a barevně odlišen rok jejich vzniku. Příklad zákresu ukazuje Obr. 1

Trhlina	1				2				3				4			
	Stav	Šířka	Délka	Směr	Stav	Šířka	Délka	Směr	Stav	Šířka	Délka	Směr	Stav	Šířka	Délka	Směr
Rok/Trhlina	[-]	[mm]	[m]	[-]	[-]	[mm]	[m]	[-]	[-]	[mm]	[m]	[-]	[-]	[mm]	[m]	[-]
2017									N	0,50	3,50	V	N	0,50	4,2	V
2018	N		12,5	HT					S	0,70	5,00	V	S	0,50	4,8	V
2019	S	0,35	12,5	HT	N	0,30	2,0	V	S	0,70	6,00	V	S	1,00	6,0	V
2020	S	0,35	12,5	HT	S	0,30	2,0	V	S	0,70	6,00	V	S	1,00	6,5	V
2021	S	0,35	12,5	HT	S	0,30	2,0	V	S	1,10	6,00	VI	S	1,00	7,0	V
Trhlina	5				6				7				8			
Popis	Stav	Šířka	Délka	Směr	Stav	Šířka	Délka	Směr	Stav	Šířka	Délka	Směr	Stav	Šířka	Délka	Směr
Rok/Trhlina	[-]	[mm]	[m]	[-]	[-]	[mm]	[m]	[-]	[-]	[mm]	[m]	[-]	[-]	[mm]	[m]	[-]
2017																
2018																
2019																
2020																
2021	N	0,05	2,5	VD												

Tab. 3 Příklad tabulkové části formuláře pasportizace bloku betonáže ostění



Obr. 1 Příklad zákresu polohy a délky trhlin na rozvinutém plášti ostění

10. TYPY VAD TUNELOVÝCH OSTĚNÍ

V následující Tab. 4 jsou uvedené typy vad s největší pravděpodobností vzniku podle zkušeností z praxe. Tabulka je doplněna o údaje, které se týkají možnosti vzniku vady podle typu ostění (monolitické ostění u konvenčně ražených tunelů nebo prefabrikované ostění u kontinuálně tunelů ražných tunelovacími stroji), podle typu provádění /hloubený nebo ražený tunel), a podle typu dopravy (silniční/dálniční nebo železniční tunel). Podrobný a komplexní přístup k vadám ostění je popsán v dokumentu [11].

Pořadové číslo	Typ vady	Typ ostění		Typ provádění		Dopravní tunel	
		Monolitické	Prefabrikované	Hloubený	Ražený	Silniční/Dálniční	Železniční
1	Otevřená struktura betonu na líci ostění	X		X	X	X	X
2	Vzduchové bubliny na povrchu ostění	X		X	X	X	X
3	Průsaky v místě kotevních prvků vnitřního vybavení	X		X	X	X	X
4	Chybná instalace vnitřního těsnícího pásu	X		X	X	X	X
5	Chybná instalace vnějšího těsnícího pásu	X		X	X	X	X
6	Poškození hrany nik a výklenků	X		X	X	X	X
7	Neprobetonovaná hnízda	X		X	X	X	X
8	Průsaky ostěním v místě snížené kvality betonu	X		X	X	X	X
9	Průsaky v pracovní spáře mezi bloky betonáže	X	X	X	X	X	X
10	Odprsky ve spáře mezi bloky betonáže	X	X	X	X	X	X
11	Chybějící výztuž v místě čela bloku betonáže	X		X	X	X	X
12	Nekvalitní provedení dilatační spáry mezi bloky betonáže	X	X	X		X	X
13	Průsaky v místě pracovní spáry	X	X	X	X	X	X
14	Všesměrné divoké trhliny v ploše ostění	X		X	X	X	X
15	Chybné probetonování kotevních prvků vnějšího těsnícího pásu	X		X	X	X	X
16	Lokální koroze výztuže s následným odpryskem betonu	X	X	X	X	X	X
17	Ocelové prvky na líci ostění	X		X	X	X	X
18	Průsaky v místě napojení různých typů konstrukcí	X		X	X	X	X
19	Rozmísení betonové směsi	X		X	X	X	X
20	Mechanické poškození ostění nárazem vozidla	X	X	X	X	X	
21	Trhlina procházející kotevnými prvky vnitřního vybavení	X	X	X	X	X	X
22	Subvertikální trhlina v nevyztuženém bloku betonáže	X			X	X	X
23	Potržení betonu chybným technologickým postupem betonáže	X		X		X	X
24	Zabetonované „cizí“ prvky v ostění	X		X	X	X	X
25	Plošné odprsky vlivem koroze výztuže	X		X	X	X	X
26	Poškození ostění vlivem požáru v tunelu	X	X	X	X	X	X
27	Průsaky v pracovních spárách vodonepropustného ostění	X	X	X	X	X	X
28	Zabetonované chráničky pro vedení kabelů v ostění	X		X	X	X	X
29	Vznik parabolických trhlin ve vrcholu ostění	X			X	X	X
30	Vznik dutiny ve vrcholu klenby ostění raženého tunelu	X	X		X	X	X

Tab. 4 Typy vad tunelových ostění

11. PŘÍČINY VZNIKU PORUCH A VAD

Příčiny vzniku vad jsou pro jejich jednotlivé typy popsány v následující tabulce. Podrobný a komplexní přístup k vadám ostění je popsán v dokumentu [11].

P.č.	Typ vady	Příčina
1	Otevřená struktura betonu na líci ostění	Chybně navržená receptura nebo konzistence betonu, chybně provádění hutnění betonové směsi při ukládání do bednění
2	Kaverny (vzduchové bubliny) na povrchu ostění	Vznik kaveren je častý zejména v dolní části klenbového ostění, ve které je únik vzduchových bublin při vibrování omezen s ohledem na tvar tunelu/bednění.
3	Průsaky v místě kotevních prvků vnitřního vybavení	Poškození hydroizolační fólie při vrtání kotevních prvků vnitřního vybavení tunelu (v případě zajištění vodonepropustnosti pomocí mezilehlé hydroizolační fólie nebo stříkané hydroizolační membrány), nebo výrazné oslabení tloušťky ostění odolného proti průsakům (bez hydroizolační fólie nebo membrány).
4	Chybná instalace vnitřního těsnícího pásu	Technologická nekázeň zhotovitele a nedostatečný výkon stavebního dozoru.
5	Chybná instalace vnějšího těsnícího pásu ve spáře mezi bloky betonáže ostění.	Technologická nekázeň zhotovitele a nedostatečný výkon stavebního dozoru.
6	Poškození hrany nik a výklenků	Chybné provedení hrany nebo odbednění při příliš nízké pevnosti betonu
7	Neprobetonovaná hnízda	Chybně navržená receptura betonové směsi, špatný technologický postup při jejím ukládání do bednění a hutnění.
8	Průsaky ostěním v místě snížené kvality betonu	Chybný technologický postup betonáže (vytváření neošetřených pracovních spár při přerušení betonáže, rozmísení betonové směsi ukládáním na velkou výšku nebo o výztuž ostění), špatné hutnění, chybná receptura betonu atd.
9	Průsaky v pracovní spáře mezi bloky betonáže	Poškozený hydroizolační systém, tj. nekvalitně provedený vnitřní těsnící pás nebo poškozená hydroizolační fólie nebo stříkaná hydroizolační membrána.
10	Odprsky ve spáře mezi bloky betonáže	Nerovnoměrné sedání sousedních bloků betonáže vlivem změny geotechnických podmínek nebo špatné přípravy základové spáry ostění.
11	Chybějící výztuž v místě čela bloku betonáže, nesprávně upevněný vnitřní těsnící pás mezi bloky betonáže pro zajištění vodonepropustnosti ostění.	Technologická nekázeň zhotovitele a nekvalitně prováděný stavební dozor (chybějící kontrola při provádění výztuže a její přebírka před zahájením betonáže). Vnitřní těsnící pás není vložen do výztuže.
12	Nekvalitní provedení dilatační spáry mezi bloky betonáže	Technologická nekázeň zhotovitele a nekvalitně prováděný stavební dozor.
13	Průsaky v místě pracovní spáry	Chybné provedení hydroizolačního systému
14	Všesměrné divoké trhliny v ploše ostění	Objemové změny betonu dosahují jeho tahovou pevnost (smršťování, teplotní změny)

P.č.	Typ vady	Příčina
15	Chybné probetonování kotevních prvků vnějšího těsnícího pásu	Zpravidla špatně navržená konzistence betonové směsi nebo hutnění betonu při ukládání do bednění.
16	Lokální koroze výztuže s následným odpryskem betonu	Poškození krycí vrstvy betonu nebo trhlinka oslabující krycí vrstvu betonu a umožňující působení agresivního prostředí v tunelu na výztuž ostění.
17	Ocelové prvky na líci ostění	Technologická nekázeň zhotovitele. Jedná se zpravidla o odhazování zbytků vázacího drátu do bednění nebo jeho nezkrácením v místě spoje výztuže a kontaktu s bedněním (krycí vrstvu tvoří zpravidla jen cementové mléko na líci ostění).
18	Průsaky v místě napojení různých typů konstrukcí	Chybný návrh technického řešení nebo chybné provedení konstrukčních detailů na rozhraní dvou rozdílně působících konstrukcí (v tomto případě základová deska a svislé ostění navazující šachty).
19	Rozmísení betonové směsi	Dopravou betonové směsi od betonárny k bednicímu vozu, chybným ukládáním betonové směsi do bednicího vozu (např. z velké výšky nebo přes výztuž) nebo „převibrováním“ po uložení do bednicího vozu.
20	Mechanické poškození ostění nárazem vozidla	Nezvládnutí řízení vozidla v tunelu, porucha vozidla, špatný stav vozovky apod.
21	Trhlinka procházející kotevnými prvky vnitřního vybavení	Vznik trhliny může být způsobený buď zatížením ostění nebo objemovými změnami (zejména smršťováním betonu).
22	Vertikální (subvertikální) trhlinka v nevyztuženém bloku betonáže	Smršťování betonu, dosažení tahové pevnosti betonu.
23	Potržení betonu chybným technologickým postupem betonáže	K jevu může dojít při plnění bednicího vozu ve vrcholu klenby v případě přerušení a následném obnovení betonáže po delší době, kdy již bylo zahájeno tuhnutí nebo dokonce tvrdnutí betonu. Tlak čerstvé betonové směsi vytvoří v dříve betonované konstrukci trhliny.
24	Zabetonované „cizí“ prvky v ostění	Technologická nekázeň a nedostatečný výkon stavebního dozoru. Použití dřevěných nebo plastových profilů k udržení polohy výztuže apod.
25	Plošné odprysky vlivem koroze výztuže (nedostatečné krytí výztuže)	Nedostatečná krycí vrstva výztuže, průnik agresivního prostředí k výztuži a její koroze se zvětšováním objemu a dalším poškozením krycí vrstvy.
26	Poškození ostění vlivem požáru v tunelu	Požár v tunelu a jeho negativní působení na beton a ocelovou výztuž ostění.
27	Průsaky v pracovních spárách vodonepropustného ostění	Špatně zvolený nebo provedený konstrukční detail pracovní spáry mezi bloky betonáže.
28	Zabetonované chráničky pro vedení kabelů v ostění	Špatné zaslepení chrániček při zaústění do bednění niky, nastavování chrániček mezi nikami, špatné upevnění chrániček a jejich posun při betonáži.

Tab. 5 Příčiny vzniku vad podle jejich typu

P.č.	Typ vady	Příčina
29	Vznik parabolických trhlin ve vrcholu ostění	Vada se projevuje u ostění v ražených úsecích tunelů, které je odbedňované při odbedňovací pevnosti 2-3 MPa. Nešetrným zatěsněním příčné pracovní spáry může dojít k „utržení“ betonu ostění čerstvě odbedněného bloku betonáže. Trhliny mají zpravidla parabolický tvar a spolu s příčnou spárou mezi bloky betonáže tvoří uzavřený tvar.
30	Vznik dutiny ve vrcholu klenby ostění raženého tunelu	Vznik dutiny ve vrcholu klenby ostění je v raženém úseku tunelu dán technologickým postupem betonáže a možností plnění bednicího vozu betonovou směsí, kdy rubové bednění tvoří primární ostění tunelu.

Tab. 6 Příčiny vzniku vad podle jejich typu - dokončení

12. NÁVRH SANACE PODLE CHARAKTERU VADY

Návrh sanace vad je pro jejich jednotlivé typy popsány v následující tabulce. Podrobný a komplexní přístup k vadám ostění je popsán v dokumentu [11]. Požadavky na provádění sanací betonových konstrukcí definují pro silniční a železniční tunely předpisy [2] a [8].

P.č.	Typ vady	Sanace
1	Otevřená struktura betonu na líci ostění	Odstranění nekvalitního betonu, očištění pracovních spár a výplň vhodnou sanační hmotou.
2	Kaverny (vzduchové bubliny) na povrchu ostění	Pokud to není nutné z estetického hlediska nebo s ohledem na zajištění krytí výztuže, kaverny přípustné hloubky a plochy se nesanoují, a to zejména ve vrcholu klenby tunelu, kde hrozí vypadnutí sanačního materiálu do jízdního prostoru, tj. ohrožení řidiče, a tím i bezpečnosti provozu. V případě vyztuženého ostění je nutné nadlimitní plochu a hloubku kaverny sanovat vhodným sanačním materiálem s ošetřením pracovní spáry a dostatečnou přilnavostí k podkladu.
3	Průsaky v místě kotevních prvků vnitřního vybavení	Provedení těsnící injektáže s úplným utěsněním průsaků.
4	Chybná instalace vnitřního těsnícího pásu	Bez opravy nelze zajistit vodonepropustnost pracovní spáry u hloubených tunelů jiným způsobem než dodatečným zaizolováním fóliovou izolací. V případě raženého tunelu je oprava vnitřního těsnícího pásu vždy nutná. Vnitřní těsnící pás je nutno doplnit pojistným systémem s možností injektování jeho kotevních prvků těsnící injektáží.
5	Chybná instalace vnějšího těsnícího pásu ve spáře mezi bloky betonáže ostění odolného proti průsakům nebo v případě provádění sektorové hydroizolační fólie u tlakového hydroizolačního systému.	V případě zajištění vodotěsnosti tunelu pouze pomocí ostění odolného proti průsakům provedením těsnící injektáže pracovní spáry (s nejistým výsledkem). V případě rozdělení tlakového hydroizolačního systému na sektory je nutné v případě průsaků podzemní vody do tunelu provádět těsnící injektáž všech sousedních sektorů oblasti pracovní spáry).
6	Poškození hrany nik a výklenků	Lokální úprava místa vady, příprava povrchu a oprava vhodným sanačním materiálem.
7	Neprobetonovaná hnízda	Odstranění betonu nízké kvality, očištění pracovní spáry, provedení pevnostních můstků a sanace vhodnou sanační hmotou.
8	Průsaky ostěním v místě snížené kvality betonu	Odstranění nekvalitního betonu, učištění a úprava pracovních spár na hranici s kvalitním betonem, provedení opatření k dosažení těsného spojení starého a mladého betonu, sanace vhodným sanačním materiálem.
9	Průsaky v pracovní spáře mezi bloky betonáže	Utěsnění průsaků podle použitého hydroizolačního systému.

Tab. 7 Návrh sanace vady tunelového ostění podle jejího typu

P.č.	Typ vady	Sanace
10	Odpřisky ve spáře mezi bloky betonáže	Vždy je nutné provést proříznutí pracovní spáry mezi bloky betonáže k minimalizaci hranového napětí na líci ostění. Pokud má odpřisk vliv na korozi výztuže, je nutná oprava vhodným sanačním materiálem. V případě, že je vada nad dopravním prostorem doporučuje se přeplátování opraveného místa nebo zajištění případného uvolnění sanačního materiálu sítí ukotvenou do ostění. U nevyztuženého ostění je nutné očistit místo vady od uvolněných kusů ostění a posoudit nutnost sanace. Pokud je to možné, preferuje se ponechat poškozené místo bez dalších sanačních opatření.
11	Chybějící výztuž v místě čela bloku betonáže, nesprávně upevněný vnitřní těsnící pas mezi bloky betonáže pro zajištění vodonepropustnosti ostění.	S ohledem na posouzení rizik spojených s vadou buď lokální oprava, nebo demolice příslušného bloku betonáže a jeho nové provedení v souladu s projektovou dokumentací a zajištěním těsnosti spáry mezi bloky betonáže.
12	Nekvalitní provedení dilatační spáry mezi bloky betonáže	Podle charakteru vady – obnova možnosti dilatace.
13	Průsaky v místě pracovní spáry	Provedení těsnící injektáže.
14	Všesměrné divoké trhliny v ploše ostění	Podle příčiny vzniku trhliny buď výplňová injektáž (obnovení pasivace výztuže neporušenou krycí vrstvou betonu) nebo pevnostní injektáž pro obnovení statické funkce ostění.
15	Chybné probetonování kotevních prvků vnějšího těsnícího pásu	Velmi obtížně proveditelná. Doporučuje se vždy používat těsnící pásy s pojistným systémem a možností proinjektování jeho kotevních prvků.
16	Lokální koroze výztuže s následným odpřiskem betonu	Očištění výztuže i povrchu betonu v místě odpřisku, provedení pevnostního můstku a příslušné úpravy pracovní spáry. Použití vhodného sanačního materiálu.
17	Ocelové prvky na líci ostění	Lokální vyfrézování poškozeného místa, odstranění kovových prvků v hloubce minimálního krytí výztuže a obnova krycí vrstvy výztuže.
18	Průsaky v místě napojení různých typů konstrukcí	Podle konstrukčního řešení v místě napojení. Zpravidla provedením těsnící injektáže v pracovní spáře v místě průsaku a jeho blízkosti.
19	Rozmísení betonové směsi	Odstranění nekvalitního betonu, ošetření vzniklých pracovních spár, aplikace pevnostních můstků, sanace vhodným sanačním materiálem. Vždy musí být posouzen rozsah poškození a jeho sanace s ohledem na možnost obnovení požadované statické a užitné funkce ostění.
20	Mechanické poškození ostění nárazem vozidla	Postup je obdobný, jako v případě snížení krytí výztuže, tj. očištění a příprava pracovní spáry pro aplikaci vhodné sanační hmoty a obnova krycí vrstvy výztuže sanační hmotou.
21	Trhlina procházející kotevnými prvky vnitřního vybavení	S ohledem na vliv vzniku trhliny na únosnost kotevního prvku se provede pevnostní injektáž pro obnovení nosné funkce betonového průřezu a kotevního prvku.

P.č.	Typ vady	Sanace
22	Vertikální (subvertikální) trhlina v nevyztuženém bloku betonáže	V případě nadlimitní šířky trhliny se provádí výplňová injektáž. Při překročení počtu trhlin na blok betonáže se provádí výplňová injektáž u trhlin s největší, byť podlimitní šířkou.
23	Potržení betonu chybným technologickým postupem betonáže	V případě hloubených tunelů odstranění poškozeného betonu a jeho náhrada vhodným sanačním materiálem. U ražených tunelů se zpravidla vadu nepodaří identifikovat a může se projevit sekundárními vadami souvisejícími se snížením statické funkce.
24	Zabetonované „cizí“ prvky v ostění	Odstranění nevhodných materiálů z ostění, úprava pracovní spáry a případně povrchu výztuže pro sanaci vhodným sanačním materiálem.
25	Plošné odprsky vlivem koroze výztuže (nedostatečné krytí výztuže)	Odstranění poškozené krycí vrstvy výztuže, očištění výztuže od rzi, příprava pracovní spáry a aplikace pevnostního můstku, sanace vhodným sanačním materiálem s ohledem na zajištění pasivace výztuže.
26	Poškození ostění vlivem požáru v tunelu	Způsob sanace závisí na rozsahu poškození nosné konstrukce požárem a vlivu poškození na zachování statické a užitné funkce ostění. Musí být pro každý případ určen individuálně. Může se pohybovat od sanace povrchových vad po nutnost vybourání ostění (příslušného bloku betonáže) a provedení nové nosné konstrukce včetně obnovení hydroizolačního systému.
27	Průsaky v pracovních spárách vodonepropustného ostění	Provádění těsnících injektáží.
28	Zabetonované chráničky pro vedení kabelů v ostění	Obnova trasy chrániček je možná pouze ohraničením bourané oblasti řezem, odstraněním betonu a výztuže ostění, vložením nových chrániček a sanací vzniklého prostoru vhodným sanačním materiálem. Při provádění bouracích prací je nutné dbát zvýšené opatrnosti s ohledem na možné poškození hydroizolačního systému tunelu (mezilehlé hydroizolace).
29	Vznik parabolických trhlin ve vrcholu ostění	Injektování vzniklých trhlin.
30	Vznik dutiny ve vrcholu klenby ostění raženého tunelu	Ve vrcholu klenby jsou při betonáži v ostění vytvořeny injektážní otvory ve vzájemné vzdálenosti max. 2 m. Těmito otvory se po dosažení 28. denní pevnosti betonu dovrchně vyplňují vzniklé dutiny injektážní směsí vhodného složení a konzistence. Tlak směsi nesmí přesáhnout 200 kPa. V okamžiku, kdy směs začne vytékat výše položeným otvorem se injektáž přeruší, otvor se zaslepí a injektáž se posune k výše ležícímu otvoru. V případě použití deštníkového systému hydroizolace hrozí zatečení injektáží do drenážního systému, je vhodné při injektování v daném úseku proplachovat boční tunelovou drenáž vodou a kontrolovat přítomnost injektážní hmoty (zakalení vody).

Tab. 8 Návrh sanace vady tunelového ostění podle jejího typu - pokračování

13. PRAKTICKÉ POUŽITÍ METODIKY

Použití metodiky určují následující kroky:

1. Na základě výsledků GTP a návrhu technického řešení tunelu je vytvořeno blokové schéma tunelového ostění.
2. Podle zásad uvedených v [10] je připravena strukturovaná databáze pro sběr a uchovávání dat ve všech etapách životního cyklu podzemního díla.
3. Na základě fáze zpracování GTP a projektové dokumentace tunelu jsou do databáze uložena počáteční data, která pro každý blok betonáže definují základní informace o horninovém masivu, geometrických a materiálových parametrech daného bloku.
4. Ve fázi realizace jsou v databázi aktualizována data uložená v etapě zpracování GTP a projektové dokumentace. Jsou doplňována další data vznikající v průběhu výstavby (časové snímky a postupy prací, výsledky GTM, výsledky kontrolního a zkušebního plánu atd.).
5. Při dodržení postupů popsanych v metodice obsahuje databáze v okamžiku zahájení provozu veškerá dostupná aktuální data, které je v případě potřeby možné využít pro zjištění příčiny atypického chování konstrukce tunelu nebo vzniku vady ostění.
6. Při provádění první pasportizace tunelového ostění před uvedením tunelu do provozu jsou zjištěné vady ostění porovnávány s katalogem vad [11]. Současně jsou vyhodnoceny výsledky monitoringu ostění a jsou zohledněny při vyhodnocování jeho stavu. Výsledky monitoringu jsou uloženy do databáze.
 - a) Pokud je vada ostění a její příčina snadno identifikovatelná, je podle dokumentu [11] použit návrh sanace a vada je opravena.
 - b) V případě, že jsou o příčině vzniku vady pochybnosti, je případ předán projektantovi tunelu k posouzení. Podkladem pro jeho rozhodování o vzniku vady a její příčiny jsou mu veškeré informace obsažené v databázi.
7. Výsledky první pasportizace tunelového ostění jsou doplněny do databáze, aby bylo možné při příští prohlídce posoudit časový vývoj vzniku trhlin a jiných vad ostění.
8. Při každé další pasportizaci tunelového ostění je postupováno obdobným způsobem. Výsledky pasportizace jsou porovnány s předchozím stavem a dále je postupováno podle bodu 6.

14. EKONOMICKÉ ASPEKTY APLIKACE METODIKY V PRAXI

Exaktní posouzení úspor dosažených při použití metodiky v praxi je obtížně stanovitelné. Při včasné identifikaci a odstranění vad a poruch tunelových ostění však lze vzhledem k širší uplatnění metodiky očekávat významné úspory jak investičních, tak provozních nákladů. Principy uvedené v metodice je možné využít u všech inženýrských podzemních děl prováděných hloubením nebo ražením, zejména u silničních, dálničních a železničních tunelů, tunelů metra, kolektorů a štol zajištěných pomocí betonového ostění.

Vytvořením databáze a analýzou v ní uložených dat z již realizovaných tunelů bude možné optimalizovat návrh technického řešení a neopakovat chyby spojené s používáním nevhodných stavebních postupů a rizikových faktorů, které vedou k neekonomickému návrhu v úrovni projektové dokumentace a nutnosti zvýšené údržby po uvedení tunelu do provozu.

V neposlední řadě využití metodiky souvisí i s podporou strategie The European Green Deal, tzv. zelené dohody pro Evropu. Hlavním cílem této dohody je dosažení klimatické neutrality Evropské unie do roku 2050. Dosažení tohoto cíle je závislé na opatřeních vedoucích ke snížení emisí skleníkových plynů, podpoře udržitelného hospodářského růstu, energetická efektivita a inovace. Výstavba podzemních děl je energeticky náročná, a to nejen z hlediska používaných mechanismů, ale zejména s ohledem na vysokou uhlíkovou stopu spojenou s výrobou cementu a oceli jako materiálů pro tunelová ostění. Zvýšení jejich životnosti a optimalizace použití stavebních materiálů jako beton a ocel pro provádění tunelových ostění přímo souvisí se snahou o snižování stavu oxidu uhličitého a minimalizací rizik spojených s možnými finančními restrikcemi za neplnění podmínek Zelené dohody.

15. ZÁVĚR

Metodika popisuje postup systematického ukládání dat, která vznikají ve všech fázích životního cyklu tunelu. Formát dat není vázán na konkrétní programové vybavení zpracovatelů jednotlivých činností probíhajících v průběhu životního cyklu tunelu. Veškeré informace jsou vázány na blok betonáže tunelového ostění jako na základní prvek, na kterém lze identifikovat závady a jehož poškození by mohlo vést ke snížení životnosti a užité funkce tunelu, ohrožení bezpečnosti provozu nebo dokonce k selhání nosné funkce ostění. Uvedený způsob vytváření databáze umožňuje okamžitý přístup k informacím a podle konkrétní řešené problematiky výběr relevantního souboru dat pro provádění potřebných vyhodnocení a vstupů matematických modelů.

Společně s projektovou dokumentací tvoří databázový systém kromě zdroje informací potřebných pro rozhodování o příčině případných poruch, určení jejich závažnosti a způsobu sanace i cenný zdroj informací a zkušeností pro optimalizaci návrhu technického řešení nových tunelů v obdobných geotechnických podmínkách. Informace uložené v databázi bude možné využít jak v BIM, tak v budoucnu pro rozhodování o optimálním návrhu tunelů s pomocí umělé inteligence.

16. LITERATURA

- [1] Juraj Bilčík; Jiří Dohnálek: Sanace betonových konstrukcí, ISBN: 80-88905-24-9, Jaga Group, v.o.s. 2003,
- [2] Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací, Kapitola 31 Opravy betonových konstrukcí, Ministerstvo dopravy, obor pozemních komunikací, 2021.
- [3] Technické podmínky, TP 154 Provoz, Správa a údržba tunelů pozemních komunikací, Ministerstvo dopravy ČR, odbor silniční infrastruktury, 2009.
- [4] Provádění hlavních prohlídek tunelů pozemních komunikací, Metodický pokyn, Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací 2013.
- [5] SŽDC S6 Správa tunelů, 2018.
- [6] Kolektory Praha, a. s.: Provozní řád pro správu, provozování a údržbu kolektorů a ostatních sdružených tras vedení inženýrských sítí na území hlavního města Prahy, 2019.
- [7] Technické podmínky, TP 237 Geotechnický monitoring tunelů pozemních komunikací, Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací a územního plánu, 2011.
- [8] Technické kvalitativní podmínky staveb státních drah, Kapitola 23 Sanace inženýrských objektů, třetí aktualizované vydání, změna č. 5, účinnost od 1.9.2006.
- [9] J. Faltýnek, L. Mařík, Š. Pešková, V. Šmilauer: Geotechnický monitoring při výstavbě a provozování tunelů jako nástroj pro optimalizaci a zvýšení spolehlivosti tunelových ostění, Konference Geotechnika 2022.
- [10] J. Faltýnek, L. Mařík, V. Šmilauer: Databázová struktura pro shromažďování dat tunelového ostění po dobu životního cyklu, TAČR CK02000175, 2023.
- [11] L. Mařík, J. Faltýnek, V. Šmilauer: Katalog vad a poruch tunelových ostění, TAČR CK02000175, 2023.
- [12] L. Mařík, J. Faltýnek, V. Šmilauer, Š. Pešková, V. Konvalinka: Metodika pro statický návrh a posouzení podzemního díla se zohledněním spolupůsobení primárního a sekundárního ostění, Evidenční číslo ISPROFIN/ISPROFOND: 500 115 0001
- [13] Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Ausgabe April 2009.