ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

ANALÝZA, OPTIMALIZACE A PREDIKCE VÝSTAVBY RAŽENÝCH TUNELŮ V SOUVISLOSTI S TŘÍDAMI RAŽBY

DISERTAČNÍ PRÁCE

Praha 2017 **Ing. Aristotelis Caravanas**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra geotechniky

Analýza, optimalizace a predikce výstavby ražených tunelů v souvislosti s třídami ražby

Analysis, optimization and prediction of tunnel excavations in relation to excavation classes

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Aristotelis Caravanas

Doktorský studijní program:	Stavební inženýrství
Studijní obor:	Konstrukce a dopravní stavby
Školitel:	prof. Ing. Matouš Hilar, Ph.D.

Praha 2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Prohlášení

Jméno doktoranda: Ing. Aristotelis Caravanas

Název disertační práce: Analýza, optimalizace a predikce výstavby ražených tunelů v souvislosti s třídami ražby

Prohlašuji, že jsem uvedenou doktorskou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Matouše Hilara, Ph.D. Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne ……. Podpis …….

Poděkování

Ráb bych zde poděkoval svému školiteli prof. Ing. Matouši Hilarovi, Ph.D., za asistenci a stálou podporu během studia a přípravy disertační práce.

Dále bych chtěl poděkovat odborníkům z tunelářského oboru, kteří mi poskytli pomoc, podporu a cenné rady, a to jmenovitě zejména následujícím:

Garymu Peachovi za rady v otázkách smluvních, technologie ražby EPBM a také za podporu a organizaci zábavy v extrémních podmínkách severního Pákistánu.

Kurtu Guggenbichlerovi, in memoriam, za praktické rady při konvenčních ražbách a ražbách pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů a za kamarádství.

Holgeru Eversovi za dlouholetou podporu při vývoji aplikace Tunnel Supervision a za důslednost a houževnatost.

Alexi Lowsonovi za počáteční podporu vývoje aplikace Tunnel Supervision Database a za předvedení geniality a maximální efektivity.

Esu Laihonenovi za pomoc v otázkách smluvních a za zásadové jednání v odlehlých končinách nepálských.

Michaelu Tallissovi, Peteru Pittsovi a Billu Dobsovi v otázkách smluvních a za představení toho, jak vést správně korespondenci na složitých tunelových stavbách.

Ing. Františku Dvořákovi ze společnosti Ingutis za uvedení do tunelářského oboru, schopnost předvídat věci budoucí a za trpělivost.

Zvláštní poděkování patří Ing. arch. Ludmile Caravanasové, která mi v průběhu tvorby disertační práce průběžně pomáhala s překlady a korekturou textu.

Na závěr bych rád poděkoval své rodině za trpělivost a podporu při trávení velkého množství času na zahraničních tunelových projektech a této práci.

Abstrakt

Třídy ražby jsou u řady tunelových projektů jedním z rozhodujících činitelů, které ovlivňují úspěšnost výstavby. Proto je třeba věnovat patřičnou pozornost nejen jejich specifikaci, ale také metodě zatřiďování v průběhu ražby. Problematika tříd ražeb a zatřiďování, třebaže představuje jeden z nejvýznamnějších aspektů podzemního díla ve všech jeho fázích, je nezřídka podceněna.

Ražba každého podzemního díla probíhá v následných, po sobě jdoucích cyklech, sestávajících ze sledu jednotlivých činností. Tyto činnosti se provádějí s různou efektivitou. V důsledku nízké produktivity při provádění některých činností dochází ke zpomalení postupu ražeb. Pro posouzení, zda jsou jednotlivé činnosti prováděny dostatečně efektivně, však v řadě případů chybí podklady. Produktivity a trvání jednotlivých činností razícího cyklu by měly být specifikovány v nabídce a být součástí smlouvy o dílo. V průběhu výstavby podzemního díla by pak měly být činnosti sledovány a vyhodnocovány. Specifikace produktivit a trvání činností závisí na geotechnických podmínkách a musí tedy být vztaženy k jednotlivým třídám ražby. V praxi dále přispívají k prodloužení doby ražby různé druhy prostojů, jejichž důvody pramení z podmínek stavby.

Ražby podzemních objektů velmi často leží na kritické cestě výstavby projektů. Jakékoli zpoždění při ražbě má tedy přímý dopad na harmonogram výstavby celého projektu. V praxi téměř vždy dochází ke vzniku rozdílu mezi plánovaným a skutečným postupem ražby. Nejčastější příčinou jsou nižší produktivity činností razícího cyklu, různé prostoje a změny ve třídách ražby.

Termín ukončení ražby se v průběhu výstavby mění. Aby predikce postupu ražby byla pro úseky, které ještě nebyly vyraženy, věrohodnější, je nutné ji založit nejen na odborném odhadu, ale i na analýze parametrů ražby již realizovaných úseků. Zejména se jedná o analýzu tříd ražeb, činností a prostojů za působení určitých specifických podmínek stavby. Výsledkem predikce by měl být časový rozsah ukončení ražby vyjádřený pomocí pravděpodobnostního rozložení.

Vzhledem ke značnému množství vstupních dat, nutnosti kontroly jejich správnosti a množství vznikajících dotazů, tj. množství požadovaných typů analýz, je nezbytné tento proces co nejvíce automatizovat. Za tímto účelem jsou vyvíjeny speciální softwarové aplikace. Autor disertační práce vyvinul softwarovou aplikaci Tunnel Supervision. Tato aplikace byla použita na reálných projektech. Data a analýzy uvedené v této disertační práci byly získány za pomoci této aplikace.

Disertační práce má především následující cíle: seznámení čtenáře s problematikou činností a prostojů při ražbách a jejich dopadech na harmonogram; popis teorie týkající se této problematiky podpořené o příklady z praxe; vývoj softwarové aplikace umožňující správu rozsáhlého množství dat získaných z různých projektů a jejich podrobnou analýzu; prohloubení obecně známých ustanovení a kritérií za účelem správného stanovování tříd ražby v průběhu výstavby.

Abstract

Specification and determination of excavation classes rank among the decisive factors that contribute to a successful completion of tunnelling projects. It is not only important to correctly specify the classes, but also to use a suitable classification method for a tunnel construction. Experience shows the importance of the classes is often being underestimated, even though it is one of the most important aspects of underground works during all their stages.

The excavation process of any underground object includes successive cycles that are composed of a sequence of activities. These particular activities are performed with a different level of effectiveness. Due to the low productivity of some activities, the overall excavation progress is decelerated. Relevant information to assess whether the activities were performed in accordance with the contract conditions is often not provided. The specification of the productivity and duration of the activities should be included in the bids, as well as in the contract conditions, and should be monitored and analysed during tunnel excavation. The specification should be related to the encountered geotechnical conditions and consequently to the individual classes. In addition to the low effectiveness of activities, further delays caused by different site conditions contribute to the prolonged construction schedule.

The excavations of underground objects often follow the critical path of a project. Any delay in excavation progress has a direct impact on the overall project construction schedule. In tunnel constructions, there is a regular difference between planned and actual progress. Low effectiveness of tunnelling activities, various delays and changes in the classes are the most frequent causes. The deadline of tunnel excavation usually changes multiple times throughout the construction process. In order to reach higher credibility, the presumption of excavation progress in the remaining tunnel stretches should be based not only on expert judgement, but also on a detailed analysis of excavation parameters reached in the already excavated sections. This especially concerns the analysis of the excavation classes, tunnel activities and delays under the influence of specific site conditions. The result of the excavation presumption should be ideally provided in the form of a time span formulated as a probabilistic distribution.

Due to the amount of input data, the necessity to check it and the amount of queries, i.e. the amount of analyses types, it is necessary to automate this process as much as possible. Therefore, special software applications are being developed. The author of dissertation thesis has developed an application called Tunnel Supervision. This application has been used on real projects. The data and analyses presented in the dissertation thesis were obtained from the application.

The dissertation thesis has especially the following goals: to familiarize readers with the problems of activities and delays during tunnel excavation and their impacts on the construction schedule; to describe the theory related to this topic and complete it with examples from real sites; to develop software application which allows to manage and analyse the vast amount of data from different tunnelling projects; to improve general provisions and criteria related to the methods of classes determination.

Obsah

Seznam a popis příkladů 9
Seznam příloh 14
Definice pojmů, použité symboly a zkratky 15
1 Úvod 17
2 Cíle disertační práce 21
3 Metody a postupy využité pro splnění cílů práce 22
4 Současný stav problematiky 23
4.1 Úvod 23
4.2 Činnosti a prostoje při ražbě 25
4.3 Postup ražby v čase, harmonogram 31
4.3.1 Predikce postupu ražby pomocí tunelovacích strojů 35
4.4 Třídy ražby 42
4.4.1 Úvod 42
4.4.2 Ražby pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů 42
4.4.3 Konvenční ražba 44
4.4.4 Systémy pro klasifikaci horninového masivu a metody pro určování tříd ražby 45
4.4.5 Porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb na reálných projektech 47
4.4.6 Třídy ražby a související aspekty v různých fázích projektu 53
4.5 Supervize na tunelových projektech 58
4.6 Používané softwarové aplikace 59
4.7 Podmínky stavby 61
5 Softwarová aplikace Tunnel Supervision 65
6 Použitá teorie 70
6.1 Úvod 70
6.2 Statistické zpracování a vyhodnocení vstupních dat 70
6.3 Charakteristiky pravděpodobnostních rozdělení 71
6.4 Histogramy a krabicové grafy 74
6.5 Pravděpodobnostní rozdělení 79

6.6 Test dobré shody 82
6.7 Metoda nejmenších čtverců 83
6.8 Predikce harmonogramu ražby 83
6.9 Sčítání náhodných veličin, Glivenko-Cantelliho věta 87
7 Analýza činností a prostojů při ražbách 90
7.1 Úvod 90
7.2 Cyklus ražby 93
7.2.1 Cyklus ražby u konvenčních metod 94
7.2.2 Cyklus ražby na TBM otevřeného typu 96
7.2.3 Cyklus ražby na EPBM 98
7.3 Produktivity a trvání činností, celkový vztažný čas 100
7.4 Trvání a produktivita při činnosti odtěžování 106
7.4.1 Úvod 106
7.4.2 Teorie 112
7.4.3 Produktivita a trvání činnosti odtěžování v příkladech 117
7.4.4 Shrnutí 133
7.5 Trvání a produktivita při činnosti aplikace stříkaného betonu 134
7.5.1 Úvod 134
7.5.2 Teorie 134
7.5.3 Produktivita a trvání činnosti aplikace stříkaného betonu v příkladec 145
7.5.4 Shrnutí 162
7.6 Zaučovací proces při činnosti budování prstenců, porovnání produktivity směn 163
7.6.1 Úvod 163
7.6.2 Teorie zaučovacího procesu 164
7.6.3 Instalace prstenců 166
7.6.4 Zaučovací křivka činnosti instalace prstenců v příkladech 167
7.6.5 Porovnání výkonů směn při činnosti instalace prstenců 172
7.6.6 Shrnutí 173
7.7 Ražba pomocí tunelovacích strojů 174
7.7.1 Úvod 174

7.7.2 Součinitel využitelnosti tunelovacího stroje 174
7.7.3 Čistá penetrační rychlost a některé další parametry ražby tunelovacím strojem 177
7.7.4 Shrnutí 186
8 Analýza rychlosti ražeb a harmonogramu ražeb 187
8.1 Úvod 187
8.2 Příklady 187
8.3 Shrnutí 198
9 Třídy ražby 199
9.1 Úvod 199
9.2 Zatřiďování u ražeb prováděných pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů 199
9.3 Zatřiďování a určení délky záběru u konvenčních ražeb 208
9.4 Shrnutí 217
10 Supervize 218
10.1 Úvod 218
10.2 Kontrola kvantity a kvality stavebních prací a použitých materiálů 218
10.3 Vyhodnocování ražeb 218
10.4 Zatřiďování, optimalizace horninové výztuže apod. 219
10.5 Kontrola projektové a další dokumentace 220
10.6 Finanční záležitosti 220
10.7 Kvazi-arbitr 221
10.8 Nástroje supervize a korespondence 221
10.9 Složení týmu supervize 221
10.10 Software pro supervizi ražeb 222
10.11 Shrnutí 223
11 Přehled vybraných doporučení 224
12 Závěr 226
13 Použitá literatura a software autora disertační práce 231
14 Použitá literatura 233
15 Přílohy 238

Seznam a popis příkladů

Příklady uvedené v této disertační práci obsahují jednak data z reálných projektů, ale také modelová data, tj. data vytvořená autorem práce za účelem snazšího porozumění problematice. V některých speciálních případech se může jednat o kombinace obou typů dat, tj. reálných a modelových. U každého příkladu je vždy uvedeno, s jakým typem dat se pracuje.

Níže je výpis příkladů a souvisejících otázek, obsažených v disertační práci. U některých vybraných příkladů je přiložen jejich krátký popis.

Tab. 0.1 Výpis příkladů a otázek, obsažených v disertační práci, spolu s jejich popisem.

Číslo	Okruh	Obsah a popis
Př. 1	Třídy ražby, metody zatřiďování	Rychlosti ražeb specifikované pouze v metrech za kalendářní den
Př. 2		Projekt Kárahnjúkar na Islandu, ražby TBM otevřeného typu – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb - Porovnání skutečných a předpokládaných tříd ražby – tříd horninové výztuže SC a ražnosti tunelovacího stroje BC. - Skutečný příklad ražby TBM.
Př. 3		Projekt Neelum-Jhelum v Pákistánu, ražby D&B a NRTM – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb - Porovnání skutečných a předpokládaných tříd ražby – technologických tříd výrubu TT. - Skutečný příklad ražby tunelů D&B, NRTM.
Př. 4		Projekt Považský Chlmec na Slovensku, ražby NRTM – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb - Porovnání skutečných a předpokládaných tříd ražby – technologických tříd výrubu TT. - Skutečný příklad ražby tunelů NRTM.
Př. 5		Projekty Khimty, Kaligandaki, Modi Khola a Middle Marsyangdi v Nepálu, ražby D&B, NRTM – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb - Porovnání skutečných a předpokládaných tříd ražby – technologických tříd výrubu TT. - Skutečný příklad ražby tunelů D&B a NMT.
Př. 6		Nevhodná specifikace tříd ražby
Př. 7		Nespecifikované postupy k zajištění podmínek při ražbě podzemního díla a nedostatečně specifikované očekávané geotechnické podmínky
Př. 8		Vhodné stanovení délky záběru

Př. 9	Tun. stroje	Porovnání skutečných a očekávaných trvání činností atd. – projekt Kárahnjúkar - Podrobné vyhodnocování činností a prostojů při ražbě tunelovacím strojem na cca 3,6 km dlouhém úseku. Vyhodnocení provedeno ke třem vztažným časům – pracovnímu, kalendářnímu a speciálnímu.
Př. 10	Odtěžování	Skutečná produktivita a trvání činnosti odtěžování, dočasná mezideponie v tunelu - Reálný příklad enormního nárůstu trvání odtěžování v průběhu 12 měsíců ražby 5 čeleb jako důsledek nárůstu vzdáleností těchto čeleb od trvalé deponie rubaniny a nepoužívání dočasných mezideponií v tunelu. - Ukázka zlepšení produktivit na jedné z čeleb při použití dočasné mezideponie v tunelu.
Př. 10. - Ot. 1		V nabídce nebyla specifikována plánovaná produktivita a plánované trvání odtěžování v jednotlivých třídách. Jaká mohla být plánovaná produktivita a trvání odtěžování? Jaký počet nákladních vozidel by byl potřeba, aby zhotovitel mohl nepřetržitě odtěžovat bez zavedení dočasných mezideponií v tunelu? - Modelový výpočet plánovaných produktivit a trvání odtěžování. - Výpočet počtu nákladních vozidel nutných pro zajištění nepřetržitého odtěžování.
Př. 10. - Ot. 2		O kolik času se zhotovitel ve skutečnosti zpozdil za plánovaným trváním odtěžování (viz výpočet v odpovědi na předchozí otázku) v 9. a 10. měsíci a jaký byl časový dopad zavedení mezideponie za 11. a 12. měsíc na výstavbu? Jaká je celková váha činnosti odtěžování na průběh ražby? - Výpočet časového zpoždění ražeb v důsledku nižších skutečných produktivit oproti plánovaným produktivitám. - Procentuální vyjádření trvání dané činnosti jako podíl z celkového času.
Př. 11		Skutečná produktivita a trvání činnosti odtěžování, vliv podmínek - Reálný příklad vlivu podmínek stavby (prostoje různého důvodu, významný vliv Learning Factor LF u trhacích prací, poruchy nakladače, částečná nedostupnost mechanizace z důvodů současné ražby více úseků, střídání jejich priorit a vliv managementu) na produktivitu a trvání odtěžování při ražbě 6 úseků. - Vyjádření trvání odtěžování v jednotkách min/bm formou krabicových grafů na každém tunelovém úseku.
Př. 11. - Ot. 1		Jaká mohla být plánovaná produktivita a plánované trvání odtěžování při nepřetržitém odtěžování? Jaký počet nákladních vozidel by byl potřeba, aby zhotovitel mohl nepřetržitě odtěžovat bez zavedení mezideponie v tunelu? - Modelový příklad založený na reálných datech. - Zpětný výpočet a odhad koeficientů vlivů na odtěžování.
Př. 11. - Ot. 2		O kolik se zhotovitel zpozdil za takto odhadnutým plánovaným trváním odtěžování a jaký je časový dopad na výstavbu? Jaká je celková váha činnosti odtěžování v průběhu ražby? - Váha činnosti odtěžování na 6 úsecích ražby, skutečný příklad.

		- Rozdíl plánovaného a skutečného trvání činnosti odtěžování.
Př. 11. - Ot. 3		Jaké byly skutečné koeficienty vlivu? Tzn. provést jejich zpětné stanovení ze znalosti skutečného trvání odtěžování. - Výpočet skutečných koeficientů vlivu na odtěžování a porovnání s předpokládaným plánovaným koeficientem.
Př. 11. - Ot. 4		Jak vypadají histogramy trvání odtěžování v jednotkách min/bm v jednotlivých úsecích a jaké jsou odpovídající pravděpodobnostní rozložení této náhodné veličiny? - Histogram trvání odtěžování v jednotkách min/bm pro 1 skutečný tunelový úsek. - Normální a logaritmicko-normální rozdělení. - Test dobré shody.
Př. 12	Stříkaný beton	Výpočet plánované produktivity a trvání činnosti aplikace stříkaného betonu - Modelový příklad. - Možný výpočet plánovaných produktivit a trvání činnosti aplikace s/b pro tři třídy konvenční ražby.
Př. 13		Produktivita a trvání činnosti aplikace s/b a vliv na cenu díla - Modelový příklad založen částečně na skutečných datech z ražeb. - Trvání a produktivita při činnosti aplikace s/b, vliv na harmonogram výstavby a dopad na cenu díla.
Př. 14		Plánované, očekávané a skutečné objemy s/b - Nadměrná spotřeba betonové směsi. - Data z reálného projektu, výsledek odpovídající některým dalším projektům.
Př. 14. - Ot. 1		Jaké bylo teoretické množství s/b stanovené na původně plánovaných třídách v porovnání s teoretickým množstvím s/b stanoveným na skutečných třídách a v porovnání se skutečným množstvím s/b? - Podrobná analýza na 6 tunelových úsecích. - Data z reálného projektu.
Př. 14. - Ot. 2		Provést zpětný odhad hodnot jednotlivých vlivů na prodloužení trvání činnosti aplikace s/b a navýšení spotřeby s/b. Proč bylo skutečně aplikované množství s/b výrazně vyšší než očekávané množství s/b? - Zpětný výpočet a odhad koeficientů vlivů na trvání činnosti aplikace s/b. - Zdůvodnění rozdílů. - Modelový příklad s reálnými daty ze skutečného projetu.
Př. 14. - Ot. 3		Jaká je váha činnosti aplikace s/b? Jaký je časový dopad nutnosti aplikovat vyšší objem s/b založený pouze na skutečně měřených časech? Jaká je cena za opožděné uvedení díla do provozu z důvodu nutnosti instalace většího objemu s/b? A co uznatelnost? - Data z reálného projektu.
Př. 15		Jaká je skutečná produktivita aplikace s/b v závislosti na aplikovaném

		množství betonové směsi? - Závislost produktivity při aplikaci s/b v závislosti na množství nastříkávané betonové směsi. - Data z reálného projektu ze dvou tunelových úseků.
Př. 16	Instalace prstenců	Trvání činnosti instalace prstenců - Data z reálného projektu ze čtyř tunelových úseků. - Způsob zaznamenávání dat a jejich kontroly.
Př. 17		Zaučovací křivky činnosti instalace prstenců - Data z reálného projektu ze dvou počátečních tunelových úseků. - Přepočet trvání instalace prstenců pro účely stanovení zaučovací křivky. - Zaučovací křivky jako polynomické funkce.
Př. 18		Činnost instalace prstenců – porovnání výkonů denních a nočních směn - Porovnání výkonů denních a nočních směn pomocí krabicových grafů na 5 tunelových úsecích. - Data z reálného projektu.
Př. 19	Tunelovací stroje	Využitelnost tunelovacího stroje - Stanovení, vyhodnocení součinitele využitelnosti tunelovacího stroje a dalších činností a prostojů. - Reálná data z projektu Ejpovice.
Př. 20		Přítlačná síla TBM otevřeného typu do skalních hornin, projekt Neelum-Jhelum - Reálná data z projektu Neelum-Jhelum.
Př. 21		Kroutící moment TBM otevřeného typu do skalních hornin, projekt Neelum-Jhelum - Reálná data z projektu Neelum-Jhelum.
Př. 22		Rychlost otáček řezné hlavy TBM otevřeného typu do skalních hornin, projekt Neelum-Jhelum - Reálná data z projektu Neelum-Jhelum.
Př. 23		Parametry ražby tunelovacím strojem v průběhu ražby jednoho záběru, projekt Ejpovice - Podrobné vyhodnocení některých parametrů ražby tunelovacím strojem v závislosti na poloze čelby resp. na tom, v kterém místě 2 m dlouhého záběru se nachází čelba. - Krabicové grafy. - Reálná data z jednoho tunelového úseku, projekt Ejpovice.
Př. 24	Harmonogram	Simulace trvání ražby tunelového úseku pro různé koeficienty vlivu – variování. - Generování vzorků pro jednotlivé predikované události a sestrojení hustot pravděpodobnosti (jádrový odhad). - Simulace činností při konvenční ražbě predikovaného úseku za účelem určení doby jeho ražby. Odhad celkového trvání ražby

		s určitou uživatelsky zvolenou pravděpodobností. - Vyhodnocení v závislosti na pravděpodobnosti výsledku. - Modelový příklad s použitím reálných a modelových dat.
Př. 24. - Ot. 1		Jaký je nutný počet simulací k dosažení uspokojivé přesnosti výsledku?
Př. 25		Simulace trvání ražby tunelovacím strojem v závislosti na UF a NPR. - Simulace postupu ražby v závislosti na generovaných vzorcích UF a NPR při mechanizované ražbě tunelovacími stroji na predikovaném úseku za účelem určení doby jeho ražby. Odhad celkového trvání ražby s určitou uživatelsky zvolenou pravděpodobností. - Vyhodnocení v závislosti na pravděpodobnosti výsledku. - Reálný příklad z praxe.
Př. 26	Třídy ražby, zatřiďování, délka záběru	Predikce geotechnických podmínek ražby **a reakce na jejich změnu** a reakce na jejich změnu - Reálný příklad. - Vyhodnocování krátkodobého chování horninové masivu.
Př. 27		Stabilita čelb - Reálný příklad. - Vyhodnocování krátkodobého případně střednědobého chování horninové masivu.

Seznam příloh

Příloha 1 – Projekt podzemní hydroelektrárny Kárahnjúkar

Příloha 2 – Projekt vodovodního přivaděče Melamchi

Příloha 3 – Projekt podzemní hydroelektrárny Neelum-Jhelum

Příloha 4 – Projekt dálničního tunelu Považský Chlmec

Příloha 5 – Projekt železničních tunelů Ejpovice

Příloha 6 – Trvání činnosti instalace prstenců tunelového ostění

Příloha 7 – Softwarová aplikace Tunnel Supervision

Příloha 8 – Parametry ražby EPBM v závislosti na staničení

Příloha 9 – Simulace trvání ražby prováděné tunelovacím strojem, programovací kód v jazyce R

Příloha 10 – Simulace trvání konvenční ražby, programovací kód v jazyce R

Příloha 11 – Třídy ražby a metody zatřiďování na tunelech ražených pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů - dotazník

Příloha 12 – Histogramy a funkce hustot norm. a log.-norm. rozdělení na 6 úsecích ražby

Příloha 13 – Časové rozdělení činností při ražbě za jeden měsíc

Příloha 14 – Mapovací formulář pro určení třídy ražnosti tunelovacího stroje BC

Příloha 15 – Mapovací formulář pro určení třídy horninové výztuže SC

Příloha 16 – Výpočet plánované produktivity a trvání činnosti aplikace s/b pro tři třídy ražby

Definice pojmů, použité symboly a zkratky

Níže uvedený popis pojmů ve většině případů představuje zavedené definice. Některé pojmy však vyžadovaly definici nově vytvořit a výjimečně, u několika málo pojmů, byla ustálená definice autorem upravena a aktualizována.

Cyklická ražba	Ražba, při které se pravidelně se opakují činnosti neboli operace tak, že vždy v průběhu jednoho cyklu umožní postup ražby o jeden pracovní záběr.
Čistá penetrační rychlost NPR	Jedná se o rychlost postupu tunelovacího stroje vztažená pouze k času, kdy tunelovací stroj razí (anglicky Net Penetration Rate, NPR). Nejčastěji se vyjadřuje v jednotkách mm/min.
Koeficient vlivu f	Koeficient vlivu představuje souhrn vlivů – obecných a specifických – na produktivitu a trvání určité činnosti ražby a je ovlivněn podmínkami stavby.
Koeficient zaučení LF	Vliv zaučovacího procesu, který nastává při každém zahájení stavby tunelu, ale také při jakékoli změně, mající dopad na zaběhnuté postupy. Např. při výrazné změně geologických podmínek mění operátor parametry nastavení tunelovacího stroje při ražbě a hledá jejich nejvhodnější kombinaci. Koeficient zaučení (anglicky Learning Factor, LF) vyjadřuje vliv zaučení na produktivitu jednotlivých činností ražby.
Penetrace PEN	V této disertační práci je pojem penetrace určen pro účely vyjádření velikosti postupu tunelovacího stroje za jednu otáčku řezné hlavy. Vyjadřuje se v jednotkách mm/ot.
Podmínky stavby	Podmínky, zobecněné skutečnosti nebo události, které formují návrh, soutěž, smluvní podmínky a výstavbu podzemního díla.
Predikovaný úsek	Predikované úseky jsou úseky tunelu, které ještě nebyly vyraženy a na kterých budeme provádět predikci a) tříd ražby, b) podmínek stavby resp. vlivů a c) trvání jednotlivých činností v razícím cyklu. Tyto úseky budou charakteristické tím, že každý z nich budeme mít v celé své délce jednu určitou třídu ražby a relativně shodné podmínky stavby a koeficienty vlivů.
Produktivita P	Vztah mezi výsledkem a časem potřebným k dosažení tohoto výsledku, např. objem instalovaného betonu za jednu hodinu. Produktivita je ovlivněna podmínkami stavby.
Referenční úsek	Referenční úseky jsou již vyražené úseky tunelu, které jsou charakteristické tím, že byly raženy v jedné třídě ražby a měly

	v celé své délce relativně shodné podmínky stavby a koeficienty vlivů.
Rychlost postupu ražby AS	Rychlost postupu ražby vztažená k celkovému času, který může být a) kalendářní, b) pracovní nebo c) speciální smluvní. Nejčastěji se vyjadřuje v jednotkách m/den.
Součinitel využitelnosti tunelovacího stroje UF	Součinitel využitelnosti tunelovacího stroje (anglicky Utilization Factor, UF) vyjadřuje procentuálně čas, po který bude probíhat nebo probíhal proces rozpojování a odtěžování horninového masivu pomocí plnoprofilového tunelovacího stroje. Tento „čistý čas ražby“ se vyjadřuje ve vztahu k celkovému času, který může být a) kalendářní, b) pracovní nebo c) speciální smluvní.
Třída ražby	Pro účely této práce se pod pojmem třída ražby rozumí technologická třída výrubu TT u konvenčních ražeb; nebo třída horninové výztuže SC, případně v kombinaci s třídou ražnosti tunelovacího stroje BC pro ražbu tunelovacími stroji TBM otevřeného typu do skalních hornin.
Třída ražnosti TBM BC	Třídy ražnosti jsou platné pro ražby pomocí TBM otevřeného typu do skalních hornin. Tyto třídy vystihují práci potřebnou k rozpojení a odtěžení určité délky (objemu) tunelu. Anglicky jsou často nazývané jako „Bore Class“, zkratkou BC.
Trvání T	Trvání resp. doba potřebná k vykonání nějaké činnosti, případně délka prostoje.
Uznatelnost	Značí jaká část, tj. číslo z oboru <0, 1>, je dle smluvních podmínek uznatelná (objednatel proplácí zhotoviteli). Např. jaký objem stříkaného betonu (s/b) je uznatelný z jeho celkového použitého množství. V celkovém použitém množství je zahrnut např. veškerý spad s/b, ztráta betonové směsi při přepravě, nekvalitní s/b, který je nutno odstranit a nahradit atd.

1 Úvod

Ražby podzemních objektů jsou často součástí výstavby rozsáhlých stavebních projektů. Vzhledem k jejich časové a cenové náročnosti jsou obvykle jednou ze zásadních stavebních částí projektů a proto je třeba průběhu jejich provádění věnovat patřičnou pozornost. Pro dokončení ražeb v co nejkratším možném termínu je nezbytné, aby účastníci výstavby byli schopni pravidelně vyhodnocovat a optimalizovat postup ražeb, efektivitu prováděných činností a minimalizovat případné prostoje.

Výstavba podzemních děl je obecně považována za velmi komplexní činnost, do které vstupuje řada vzájemně se ovlivňujících proměnných. První důležitou charakteristikou je, že do stavebního procesu vstupuje mnoho zdrojů (např. pracovní síla, speciální mechanizace a materiály apod.). Druhým rysem je, že každý projekt podzemního díla je jedinečný z mnoha důvodů, jako např. existující geotechnické a přírodní podmínky, účastníci výstavby, místní regulativy apod. Třetím důležitým rysem je, že výstavba probíhá za jistých nekontrolovatelných, nejistých, dynamických podmínek jako např. počasí a jiné přírodní události/katastrofy, změny projektu při výstavbě, změny ve financování výstavby, sociální nepokoje apod. Z výše uvedených důvodů bývá někdy náročné optimalizovat proces výstavby. Vysvětlení zdržení výstavby podzemního díla a zvýšení jeho nákladů je často složité [22].

Porozumět vzájemné interakci jednotlivých procesů výstavby je náročné z důvodu složitosti výstavby. Zpomalení postupu ražeb oproti původním předpokladům může být způsobeno rozdílnými důvody nebo jejich kombinací. Mezi tyto důvody patří např.:

- nutnost realizace těžších tříd ražeb ve vyšším rozsahu než bylo původně předpokládáno v zadání projektu,

- realizace opatření souvisejících se zastižením neočekávaných zhoršených geotechnických podmínek,

- prostoje způsobené nedostatečným počtem a/nebo kvalitou strojního vybavení,

- prostoje způsobené nedostatečným počtem a/nebo zkušeností personálu účastníků výstavby,

- nevhodné nastavení smluvních podmínek, a to zejména mezi objednatelem a zhotovitelem podzemního díla,

- nedostatek času poskytnutého objednatelem pro kvalitní přípravu nabídky zhotovitelem,

- méně pravděpodobné až nerealistické předpoklady dokončení výstavby díla způsobené nedostatečnými požadavky objednatelů na závazné informace, které by měly být součástí nabídek zpracovávaných zhotoviteli – jedná se např. o neuvedení uvažovaných (plánovaných) produktivit a trvání cyklických operací ražeb (činností), ze kterých vycházejí nabídkové harmonogramy,

- chyby v projektové /nebo zadávací dokumentaci, změny projektu v průběhu výstavby,

- přírodní katastrofy, výjimečné celospolečenské události a problémy v dodávkách materiálu a ve financování výstavby.

Výše uvedený výčet důvodů, v této práci budou nazývány podmínkami stavby, je ilustrativní a nemusí být konečný. Více o podmínkách stavby je uvedeno v kapitole 4.7.

Pro posouzení vícenároků zhotovitele je nutné znát u každého zdržení postupu ražby jeho uznatelnost. Uznatelností se rozumí pojem, kdy je nějaká skutečnost např. prostoj, nadvýlom, snížení produktivity činnosti při ražbě apod. buď zaviněná anebo nezaviněná zhotovitelem a současně v závislosti na smluvních podmínkách je uznatelná, neuznatelná nebo případně částečně uznatelná pro proplacení příslušejících vícenákladů spolu s případnou odměnou zhotoviteli.

Analýza, optimalizace a predikce výstavby ražených tunelů je komplexní záležitostí, kterou je třeba posuzovat z různých hledisek, v nichž významnou roli mají třídy ražby. Tato disertační práce se zabývá problematikou tříd ražeb, postupu ražby v čase (harmonogramem), podrobným rozborem činností a prostojů v souvislostech s třídami ražby a automatizací, resp. softwarovým řešením problematiky. Tato disertační práce čerpá data a informace ze skutečných tunelových projektů, kterých se autor zúčastnil a které jsou popsány v přílohách 1 až 6.

V rámci této disertační práce jsou v souvislosti s třídami ražeb, činnostmi a prostoji sledovány následující způsoby ražeb podzemních děl:

1. konvenční ražby, tj. ražby, pod které zahrnujeme ražby pomocí metod D&B, NRTM, SCL, NMT apod.

2. ražby pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů TBM otevřeného typu do skalních hornin (metoda NMT pokrývá i tento typ ražby)

3. ražby pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů EPBM, tj. zeminových štítů

Pro ražbu pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů SPBM, tj. bentonitových štítů, platí závěry podobné závěrům pro ražbu pomocí EPBM. Podrobně rozebírána však ražba pomocí SPBM v této disertační práci není.

Časový postup ražby, vliv na harmonogram a cenu projektu

Ražby podzemních objektů velmi často leží na kritické cestě výstavby projektů. Jakékoli zpoždění při ražbě má tedy přímý dopad na harmonogram výstavby celého projektu. Postup ražby v čase má být průběžně sledován a vyhodnocován, protože v praxi pravidelně dochází ke vzniku rozdílu mezi plánovaným a skutečným postupem ražby. Podstatný vliv na velikost tohoto rozdílu mají skutečné produktivity a trvání jednotlivých činností, prostoje a třídy

ražby, které se liší od hodnot předpokládaných. Včasná identifikace a adresování těchto zpoždění jsou velmi důležité po celou fázi výstavby podzemního díla. Analýzy činností musí být prováděny ve vztahu k jednotlivým třídám ražby.

Termín ukončení ražby podzemního díla se v průběhu výstavby mění v závislosti na mnoha faktorech. Aby predikce rychlosti ražby zbývajících úseků byla komplexní, je nutné ji založit nejen na odborném odhadu, ale i na detailní analýze dat získaných z již realizovaných úseků. Jedná se zejména o analýzu tříd ražeb, jednotlivých činností, prostojů a znalosti podmínek stavby. Výsledkem predikce by měl být časový rozsah ukončení ražby s určitou zvolenou pravděpodobností. Takový závěr je pro další rozhodovací kroky vhodnější než pouhé uvedení jednoho konkrétního data.

Podrobně je téma analýzy rychlosti ražeb a harmonogramu rozebráno v kapitolách 4.3 a 8.

Činnosti a prostoje při ražbě

Pro stanovení rychlosti ražby je zásadní doba trvání vzájemně navazujících cyklických operací. V praxi dochází k tomu, že jednotlivé činnosti se provádějí v různých záběrech s odlišnou efektivitou. Zpomalení ražeb v důsledku nízké produktivity při provádění některých činností není neobvyklé. Pro posouzení, zda jsou jednotlivé činnosti prováděny efektivně tak, aby byl splněn smluvní harmonogram výstavby, však v řadě případů chybí podklady. Produktivita a trvání činností by měly být součástí nabídky a smlouvy o dílo a měly by být podrobně sledovány a vyhodnocovány v průběhu výstavby. Uvedená problematika je složitější o to, že tato specifikace činností závisí na zastižených geotechnických podmínkách a musí tedy být vztažena k jednotlivým třídám ražby.

V praxi se navíc k prodloužení ražby z důvodu nízké efektivity přidávají prostoje, které mohou být různých důvodů způsobených podmínkami stavby. Pokud jsou tyto prostoje způsobeny důvody, které se vymykají podmínkám smlouvy a projektu, jako např. zastižení neočekávaných náročných geotechnických podmínek, je možné provést posouzení jejich dopadu na rychlost ražby jedině při podrobné znalosti efektivity provádění činností ražby v jiných úsecích.

Podrobně je toto téma rozebráno v kapitole 7. Popis současného stavu je uveden v kapitole 4.2.

Třídy ražby a další aspekty

U řady tunelových staveb je jedním z rozhodujících faktorů, které ovlivňují výsledné hodnocení úspěšnosti projektu – tj. splnění harmonogramu a dodržení smluvní ceny díla při zajištění jeho požadované kvality – rozdělení tunelu na třídy ražby, a to v různých fázích projektu: projektové přípravy díla, tvorby smluvních podmínek a realizace díla. V praxi bohužel dochází k nepřesnostem a chybám v souvislosti s problematikou tříd ražeb, které mají negativní vliv na úspěšné provedení projektu. Problematika tříd ražeb, třebaže představuje jeden z nejvýznamnějších aspektů podzemního díla ve všech jeho fázích, je nezřídka podceněna.

Řádně provedená definice tříd ražby, nastavení jejich předpokládaného rozdělení po délce podzemního díla, metody jejich určování, tzv. zatřiďování, v průběhu výstavby apod.

jsou zásadním předpokladem pro konečnou úspěšnost daného díla. Důvodem je návaznost tříd ražby na cenu a harmonogram díla. Bohužel však nezřídka dochází k podcenění problematiky tříd ražby s následným negativním vlivem na harmonogram a cenu díla.

V této práci jsou uvedeny informace o metodách zatřiďování v závislosti na typu ražby a příklady z již realizovaných tunelových projektů nebo projektů, které jsou stále ve výstavbě, spolu se zkušenostmi s jejich použitím.

V rámci tříd ražby je kromě kvality geologie sledována a vyhodnocována i celá řada dalších aspektů, které jsou často ve vzájemné souvislosti. Jedná se například o délku záběru, deformace ostění, horninovou výztuž, nadvýlomy, činnosti a prostoje zhotovitele při ražbě apod.

Podrobně je toto téma rozebráno v kapitole 9. Popis současného stavu je uveden v kapitole 4.3.1.

Softwarová aplikace Tunnel Supervision

Vzhledem k množství vstupních dat, nutnosti kontroly jejich správnosti a množství vznikajících dotazů, tj. množství požadovaných typů analýz, je nezbytné výše uvedené procesy co nejvíce automatizovat. Za tímto účelem jsou vyvíjeny speciální softwarové aplikace. Autor disertační práce vyvinul jednu z takových aplikací. Jedná se o online softwarovou aplikaci Tunnel Supervision. Tato aplikace byla použita na reálných projektech. Data a analýzy uvedené v této disertační práci byly získány za pomoci této aplikace. Zároveň byla aplikace Tunnel Supervision v průběhu tvorby disertace průběžně modifikována a rozvíjena tak, aby analýzu aspektů souvisejících s ražbou umožňovala.

Podrobně je toto téma rozebráno v kapitole 5. Popis současného stavu je uveden v kapitole 4.6.

V současnosti jsou problematiky tříd ražby, vyhodnocování činností a prostojů a vliv na harmonogram výstavby poměrně zanedbávané. Více se lze dočíst v kapitole 4. To je jedním z hlavních důvodů, proč si autor tato témata zvolil pro svoji disertační práci.

Poznámka: Autor této práce záměrně neuvádí u některých příkladů názvy projektů. Důvodem je v řadě případů smluvní vztah, kterým je autor práce vázán k některým projektům a který obsahuje položku o mlčenlivosti. Některá data jsou velmi citlivá a i přes veškerou snahu o co největší míru objektivity mohlo dojít v některých příkladech k uvedení nepřesností. Autor je nicméně toho přesvědčení, že uvedené příklady i v takových případech, kdy by obsahovaly nepřesnosti, mohou v praxi nastat. Uvedení příkladů proto považuje autor za kladný přínos pro přiblížení problematiky této práce a demonstraci významu některých aspektů ražeb v praxi.

2 Cíle disertační práce

Disertační práce má čtyři hlavní cíle. Cíle práce a jejich řešení je možné shrnout do následujících bodů:

1. **Činnosti a prostoje** při ražbách - představení současného stavu; zavedení teorie a provedení statistických analýz činností a prostojů při skutečných ražbách; vliv na postup ražby v čase a případně cenu díla; doporučení pro zlepšení stávající praxe.

2. **Postup ražby v čase** a vliv na harmonogram výstavby projektu – představení současného stavu; zavedení teorie a uvedení příkladů ze skutečných ražeb; simulace doby ražby jako náhodné veličiny; výsledkem simulace je časový rozsah trvání ražby s určitou zvolenou pravděpodobností.

3. **Vytvoření softwarové aplikace** za účelem sledování a vyhodnocování ražeb podzemních děl – představení současného stavu; ověření aplikace na reálných projektech včetně verifikace vyvinutých analýz; doporučení pro další vývoj aplikace.

4. **Třídy ražby a metody zatřiďování** – představení současného stavu pro ražby pomocí TBM otevřeného typu a zeminových štítů EPBM a pro ražby konvenční; nalezení vhodných kritérií a způsobů pro určování tříd ražby (zatřiďování) a specifikaci tříd ražby.

Vedlejším cílem je rozšíření informací o dané problematice mezi odbornou veřejností (odborné články, konferenční příspěvky a prezentace).

3 Metody a postupy využité pro splnění cílů práce

Problematika analýzy činností a prostojů při ražbách je značně náročná na získávání relevantních podkladů a dat, jejich výběr a zpracování. Analýzy dat jsou prováděny statistickými metodami za použití softwaru. Z jejich vyhodnocení a z osobních zkušeností autora jsou učiněny závěry a doporučení.

Po celou dobu studia autor práce vyvíjel speciální software pro zpracování a analýzu dat ražeb. Vývoj softwaru prováděl na různých mezinárodních projektech, kde pracoval v týmech supervize, zhotovitele nebo projektanta a měl možnost poznat různé přístupy k řešení problematiky návrhu, smluvních podmínek, provádění, kontroly a optimalizace ražeb. Autor pečlivě zohledňoval zpětnou vazbu uživatelů na vyvíjený software, zejména jeho praktické a uživatelsky přívětivé použití, bezpečnostní požadavky či návrhy na aktualizaci a další vývoj. Ze vzájemné interakce s různými účastníky výstavby vybíral podněty, které postupně zapracovával do softwaru. Tím soustavně docházelo a stále dochází k obohacování softwaru o moduly a metody podporující různá řešení.

Predikce harmonogramu je založena na pečlivě provedeném podrobném vyhodnocení činností a prostojů při ražbách předešlých tunelových úseků. V disertační práci autor představil postup řešení pomocí simulace jednotlivých činností, parametrů ražby, nastavení koeficientů vlivů atd. tak, že výsledná doba ražby je náhodná veličina stanovená nasimulovaným vzorkem hodnot. Pro různé pravděpodobnosti lze danou metodou určit časový rozsah ukončení ražeb. Řešení je demonstrováno na konkrétních příkladech. V přílohách disertační práce jsou uvedeny výpisy programovacího kódu v jazyce R, ve kterém byly simulace provedeny.

Na základě znalostí a studia mezinárodně používaných specifikací tříd ražeb a metod zatřiďování jsou vybrány některé vhodné metody zatřiďování a specifikace tříd, které jsou konfrontovány s výsledky provedeného dotazníkového průzkumu (ankety). Během tohoto průzkumu se autorovi potvrdilo, že v tunelářské komunitě je povědomí o dané problematice relativně nízké. Výsledkem vyhodnocení jsou doporučení pro specifikace tříd ražeb a způsoby zatřiďování při výstavbě.

V závěru práce jsou shrnuty a diskutovány výsledky, jejich význam a možnosti použití, uvedena omezení a nedostatky a navrženy možné směry pokračování zkoumání a řešení zvoleného tématu.

4 Současný stav problematiky

4.1 Úvod

Projektová příprava tunelových projektů nezřídka trvá desítky let, nabídky a soutěž v řádech více měsíců, jejich výstavba v řádech roků. Pro tak náročné stavby s dlouhou projektovou a další přípravou je zarážející, že v řadě případů dochází k výraznému opožďování postupu ražeb a k nárůstu ceny díla. Veřejností je tato problematika vnímána negativně. Důvody tohoto stavu jsou komplexní a můžou zahrnovat zhoršené geotechnické podmínky oproti původnímu očekávání, podaná nabídka nebo návrh projektu vytvořené příliš optimisticky z pohledu rychlosti ražby a ceny díly apod. Často je však zpoždění harmonogramu ražby způsobeno také nižší efektivitou prováděných činností a prostoji vzniklých při ražbě.

Při výstavbě podzemních děl je na řadě projektů problematika související s činnostmi a prostoji při ražbách, časovým postupem ražeb (harmonogramem), třídami ražby, supervizí jejích úlohách a prostředcích k plnění těchto úloh významně zanedbána. Informovanost o výše uvedené problematice je nízká. Úkolem disertační práce však není pouze na tento stav poukázat, ale zároveň přinést některé návrhy a řešení pro zlepšení dané problematiky v oblasti praktické i teoretické.

Podrobné analýzy činností, prostojů a tříd ražeb bývají na tunelových projektech pravidelně vyžadovány až při posuzování vícenákladů zhotovitele. Predikce ukončení ražby je poptávaná tím více, čím bližší je plánovaný termín dokončení. Obě výše uvedené skutečnosti mají jednoho společného jmenovatele a tím je, že ve většině případů v současnosti vyvstává poptávka po podrobných analýzách až v čase, kdy ražby již významně pokročily nebo byly již dokončeny. Pokud není zajištěno řádné pravidelné sledování ražeb, získávání potřebných dat a jejich správa již od začátku ražeb, jsou jejich pozdější získávání a analýza velmi obtížné a časově extrémně náročné a ve výsledku méně přesné. Účastníci výstavby, kteří jsou s touto problematikou obeznámeni, se snaží o včasné zavedení systému monitoringu postupu ražby, činností a prostojů. Tím je od počátku umožněno provádět analýzy, které jsou cenným podkladem při rozhodování o optimalizaci ražby zbývajících úseků.

Stručný stav problematiky týkající se pracovních činností zhotovitele při ražbách a možných prostojů a dalších omezení, tzv. podmínek stavby, je představen v kapitolách 4.2 a 7.

Tyto jednotlivé činnosti a prostoje spolu s geotechnickými předpoklady tvoří základ pro tvorbu harmonogramu ražby. Současný stav týkající se postupu ražby v čase, tvorby predikce a vyhodnocení skutečných postupů oproti smluvním předpokladům je popsán v kapitole 4.3.

V kapitole 4.3.1 je popsán současný stav problematiky týkající se tříd ražeb. Autor rovněž provedl dotazníkový průzkum, jehož cílem bylo zjistit a upřesnit používané třídy ražby u ražeb prováděných plnoprofilovými tunelovacími stroji.

Vzhledem k tomu, že supervize nebyla v ČR dosud patřičně zavedena, je v kapitolách 4.5 a 10 je uveden popis současného stavu a jsou popsány úlohy supervize. V celé práci je potom na úlohy supervize často odkazováno.

Aby účastníci výstavby mohli plně monitorovat, vyhodnocovat a optimalizovat ražby, je třeba zpracovávat kontinuálně celou řadu údajů. Množství shromážděných dat týkajících se ražeb podzemních objektů překračuje mez zpracovatelnosti ručním způsobem i pomocí jednoduchých softwarových nástrojů. V současnosti se prosazují databáze a softwarové aplikace, které umožňují sdílení dat po internetové síti, automatickou kontrolu zadávaných dat a automatické vyhodnocování. Popis současného stavu je uveden v kapitole 4.6.

Vývoj jedné z takových aplikací byl součástí disertační práce. Jedná se o aplikaci Tunnel Supervision. Historie jejího vývoje, popis jejích vlastností a funkcí je stručně popsán v kapitole 5 a příloze 7.

4.2 Činnosti a prostoje při ražbě

Literatura popisující podrobně problematiku jednotlivých činností a prostojů při ražbách tunelovacími stroji a při konvenčních ražbách není v českém jazyce dostupná. Autor disertační práce proto vychází ze zahraniční literatury a z vlastních zkušeností získaných zejména při práci na výstavbě projektů Kárahnjúkar (příloha 1 a [8]), Neelum-Jhelum (příloha 3 a [4][8]), Melamchi (příloha 2), Považský Chlmec (příloha 4) a Ejpovice (příloha 5).

Použitá literatura:

- Models for the Analysis of Tunnelling Construction Processes [22]
- Analysis of cycle excavation and productivity of large-scale rock tunnel projects-lesson learned in Taiwan [46]

Připomeňme, že v rámci disertační práce jsou řešeny následující způsoby ražeb:

1. konvenční ražby tj. ražby, pod které zahrnujeme ražby pomocí trhavin, ražby za pomocí metod D&B, NRTM, SCL, NMT apod.;
2. ražby pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů TBM otevřeného typu do skalních hornin (metoda NMT pokrývá i tento typ ražby);
3. ražby pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů EPBM, tj. zeminových štítů.

Všechny výše uvedené způsoby ražeb představují cyklické ražby, při kterých se jednotlivé činnosti ražby uskutečňují v pravidelně, po sobě se opakujících se cyklech. Ačkoli je ražba pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů v literatuře, např. [29], popisována jako ražba kontinuální, jedná se v detailu o ražbu cyklickou. Příklad složení jednoho cyklu u metody ražby NRTM je uveden na Obr. 7.2.

Obr. 4.1 Výměna zlomeného adaptéru na lafetě vrtné soupravy, na kritické cestě. Vrtání čelby a veškeré činnosti na čelbě přerušeny po dobu dvou hodin – střednědobý prostoj.

Celkový čas ražby jakéhokoli podzemního díla není ve skutečnost složen jen z činností razicího cyklu, tj. činností nutných k uskutečnění postupu ražby o jeden záběr, ale sestává i z nežádoucích prostojů. Tyto prostoje, ať už se jedná např. o krátkodobá zdržení při výměně posádek a/nebo činností na čelbě, střednědobé prostoje, způsobené např. poruchou mechanizace (viz Obr. 4.1) až po dlouhodobé zastavení ražby, způsobené např. závalem nebo zatopením (viz Obr. 4.2), jsou nedílnou součástí ražby podzemních děl.

Obr. 4.2 Postupné zatopení úpadní ražby tunelu v délce dosahující 100 m. Důvodem byl přítok podzemní vody přes špatně utěsněný 12 m dlouhý předvrt, který byl realizovaný ve spodní části čelby, úpadní ražba a nedostatečné odčerpávání. Ražba byla přerušena na dobu dvou týdnů – dlouhodobý prostoj.

Obecnou skutečností je, že výstavba tunelových projektů probíhá často delší dobu, než jaká byla původně plánována. Důvodem prodloužení doby výstavby je většinou kombinace více faktorů jako např. zhoršení geotechnických podmínek atd. Jednou z nejčastějších příčin prodloužení výstavby, a obvykle také velmi významnou, jsou prostoje při ražbě a snížení produktivity činností.

Bohužel současná praxe z hlediska posuzování činností a prostojů a jejich porovnání se smluvními hodnotami je nevyhovující. Důvodem je, že jen ve výjimečných případech jsou trvání činností a případně jejich produktivity specifikovány v návaznosti na třídy ražby již v nabídce a smlouvě o dílo. Problémy při porovnání skutečných a nabídkových trvání a produktivit činností způsobují později významné komplikace ve vztazích mezi účastníky výstavby (objednatel – supervize – zhotovitel).

Př. 1 Rychlosti ražeb specifikované pouze v metrech za kalendářní den

Na reálném projektu ražby pomocí tunelovacího stroje obsahovala nabídka a smlouva o dílo specifikaci rychlosti ražby pouze v metrech za kalendářní den pro jednotlivé třídy ražby. Dále byl ve smlouvách uveden předpoklad, po jaký celkový čas nebude ražba probíhat, např. 20 dní v každém roce. Ve smlouvě však např. nebylo uvedeno, zda je v těchto dnech, kdy se nerazí, rovněž započítán čas pro běžné opravy a údržbu tunelovacího stroje.

Doba výstavby tunelu se prodloužila o cca 6 měsíců a to částečně z důvodu změny skutečných geotechnických podmínek oproti očekávaným, částečně z důvodů náročnější údržby a oprav tunelovacího stroje, částečně z důvodů prostojů zaviněných zhotovitelem nebo případně objednatelem. Ačkoli supervize mohla tyto prostoje kvantifikovat, bylo následně obtížné až sporné určit, jak zahrnout prodloužení doby výstavby z důvodu náročnější údržby a oprav tunelovacího stroje. Důvodem bylo, že v nabídce a smlouvě o dílo nebylo předem specifikováno jejich předpokládané trvání a proto nebylo možno skutečnost s čím porovnat.

Prodloužení doby výstavby musí být ve všech případech zdůvodněno. Takřka obecným pravidlem je skutečnost, že zhotovitel zdůvodňuje prodloužení doby výstavby výhradně změnou geotechnických podmínek k horšímu. Je úkolem supervize rozlišit skutečné důvody prodloužení doby výstavby. Mezi tyto se můžou zařadit např. prostoje z důvodu nedostatečné údržby nebo zastaralosti strojního vybavení, nedodržení pracovní a technologické kázně atd.

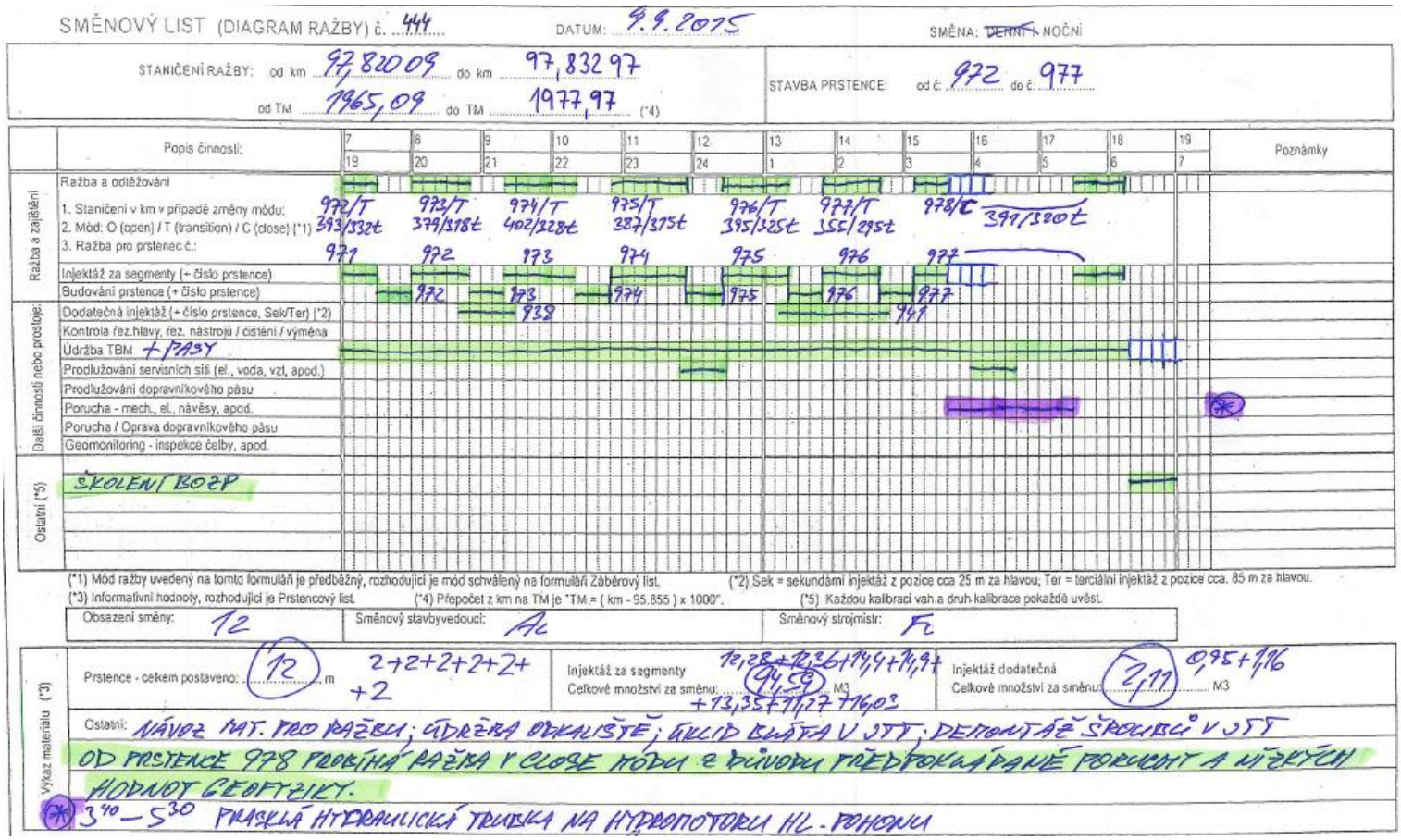
Příklad vhodné specifikace trvání činnosti „Ražba a odtěžování“ při ražbě TBM v závislosti na kombinaci třídy vyztužení SC a třídy ražnosti BC je uveden na Obr. 4.3. Tímto způsobem zhotovitel specifikoval trvání jednotlivých činností ve své nabídce a tato specifikace se stala závaznou uzavřením smlouvy o dílo. Plánovaný harmonogram byl postaven na údajích z těchto specifikací. Účastníci výstavby potom byli schopni v průběhu ražby posuzovat efektivitu jednotlivých činností a rozhodovat, jaký mají vliv na harmonogram. V disertační práci bude vysvětleno, jak lze v některých případech postupovat, pokud nejsou tyto důležité údaje k dispozici před zahájením ražeb.

	I	II	III	IV
H1	47.31	45.10	16.06	10.40
H2	45.30	42.72	15.69	10.41
H3	53.89	48.30	21.38	10.41
M1	45.29	42.79	15.69	10.41
M2	45.39	42.84	15.70	10.41

Obr. 4.3 Specifikace procentuálního trvání činnosti „Ražba a odtěžování“ při ražbě TBM otevřeného typu v závislosti na kombinaci tříd horninové výztuže SC (vodorovná osa) a ražnosti BC (svislá osa) v nabídce zhotovitele. Uvedené údaje byly vloženy do systému Tunnel Supervision pro umožnění analýz.

Zaznamenávaná data

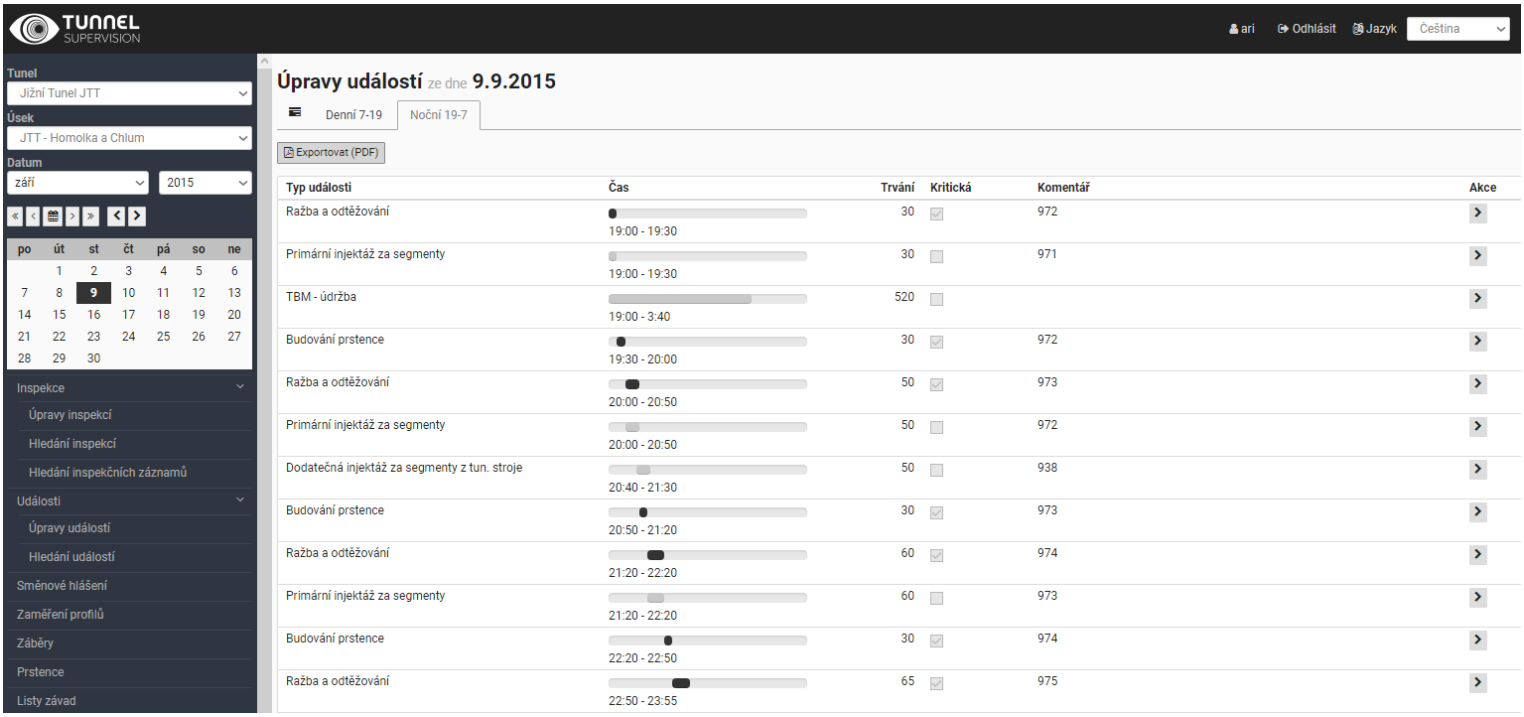
V praxi jsou obvykle činnosti a prostoje v průběhu ražby zaznamenávány na speciální formulář, tzv. časový snímek směny. Příklad časového snímku směny je uveden na Obr. 4.4. V každé pracovní směně je sledován a zaznamenáván sled událostí a nezbytných údajů, mezi něž patří zejména - typ události, zda leží na kritické cestě nebo neleží, časy začátku a konce události a její trvání. Tyto údaje zaznamenává zhotovitel, předává je supervizi, která provádí kontrolu. Zhotovitel a supervize by měli nezávisle časové snímky vyhodnocovat.



Obr. 4.4 Časový snímek noční směny při ražbě pomocí tunelovacího stroje – záznam činností a prostojů.

Nezřídka však provedením výše uvedeného záznamu činnost účastníků výstavby spojená se sledováním a vyhodnocováním činností a prostojů při ražbě končí, případně dochází jen k namátkovému a nekvalitnímu vyhodnocení. Důvody tohoto stavu jsou následující:

- Pro potřeby vyhodnocení je třeba zpracovat značné množství dat, v jednodušších případech více než tisíce údajů, ale častěji desítky až stovky tisíc záznamů. To vyžaduje jednak nejlépe průběžné zadávání a kontrolu těchto dat v počítačové formě, nebo jejich ad hoc přepsání. Pokud není použit speciální software, viz kapitola 4.6, je správa dat velmi obtížná – vyskytují se chyby a algoritmus výpočtu je pokaždé třeba pracně naprogramovat nebo případně upravovat. Speciální software řeší správu dat více uživateli, obsahuje funkce na kontrolu správnosti zadávání dat a má v sobě naprogramované funkce pro řešení různých statistik týkajících se činností a prostojů. Příklad zadání části časového snímku do softwarové aplikace Tunnel Supervision je uveden na Obr. 4.5. Jedná se o identickou směnu, jako je zobrazena na Obr. 4.4, tj. 9. 9. 2015, noční směna. Podrobnosti k jednotlivým činnostem jsou zadávány při kliku na tlačítko „Akce“.



Obr. 4.5 Tunnel Supervision – vedení časového snímku v jednotlivých směnách.

- Ačkoli je vhodné činnosti a jejich trvání a produktivity při ražbě v jednotlivých třídách specifikovat již v nabídce, děje se tomu tak bohužel jen ve výjimečných případech.

- Potřeba vyhodnotit činnosti a prostoje se obvykle ukáže až poté, co zhotovitel nárokuje vícepráce. V tom čase je už často vyražena významná část podzemního díla a na přijetí rozhodnutí o sledování činností je již pozdě.

- Podvědomí účastníků výstavby o nutnosti průběžného vyhodnocování činností a prostojů při ražbách je obvykle velmi nízké. V součinnosti s předchozími fakty je potom za normálních okolností velmi obtížné přesvědčit účastníky o nutnosti průběžného vyhodnocování činností a prostojů.

V případech, kdy nedochází k pravidelnému zaznamenávání a vyhodnocování činností a prostojů při ražbě podzemních děl, je potom velmi často při řešení vícenákladů zhotovitele z důvodu časového prodloužení výstavby přistupováno lakonicky ve smyslu: „Ražba zastihla zhoršené geotechnické podmínky. Časové prodloužení výstavby a vícenáklady jdou na vrub zhoršených geotechnických podmínek. Vliv prostojů a např. zhoršených produktivit se neuvažuje nebo jen velmi omezeně.“ Tento přístup může být ve výsledku podporován všemi účastníky výstavby. Zhotovitelem proto, že má zájem maximalizovat svůj příjem; objednatelem proto, že ve své nabídce nepožadoval specifikaci trvání a produktivit činností nebo z důvodu nekvalitní smlouvy o dílo; supervizí proto, že si nebyla vědoma nebo nepřistoupila k zaznamenávání a vyhodnocování činností a prostojů zodpovědně od samého počátku.

Software

Autor této disertační práce průběžně od roku 2005 vytváří software – Tunnel Supervision (Příloha 7) – sloužící k zaznamenávání a vyhodnocování činností a prostojů při ražbě. Tento software byl v souvislosti s vyhodnocováním činností a prostojů při ražbách použit v různých formách na reálných projektech. Jmenovitě se jednalo o projekty Kárahnjúkar (Příloha 1), Melamchi (Příloha 2), Neelum-Jhelum (Příloha 3), Považský Chlmec (Příloha 4), Ejpovice (Příloha 5) a opravy podzemního přivaděče k hydroelektrárně Kargi.

Vyhodnocení, příklady z praxe

V této práci bude na příkladech demonstrován význam vyhodnocování činností a prostojů, ke kterým dochází při ražbě, a to v různých fázích přípravy a výstavby podzemních děl. Jako příklad může posloužit banální zpoždění v trvání 1 minuty při odtěžování rubaniny, v jehož důsledku došlo ke zpoždění výstavby v řádu desítek dnů, viz „Zkušenost a motivace posádek“ v kapitole 7.4.1 a odpovědi k otázkám k Př. 10. V příkladech je posouzen vliv produktivit jednotlivých činností na jejich trvání a rychlost ražby ve vztahu k jednotlivým třídám ražby. Na základě těchto dat je vyhodnocen dopad na harmonogram ražby a v některých příkladech i dopad na cenu díla. Tato práce přináší doporučení pro vhodnější specifikaci a vyhodnocování činností a prostojů.

4.3 Postup ražby v čase, harmonogram

Ražby tunelů jsou velmi často součástí výstavby větších projektů, např. podzemních hydroelektráren nebo silničního či železničního koridoru apod. Vzhledem k tomu, že výstavba podzemních děl představuje jednu z časově nejnáročnějších položek projektů, leží často ražba na kritické cestě celého projektu. Harmonogram výstavby celého projektu tak velmi často přímo závisí na postupu ražby na jedné nebo více čelbách.

V porovnání s jinými činnostmi obsahuje časový plán ražby jednu podstatnou nejistotu – geotechnické podmínky a jejich proměnlivost po délce raženého úseku. Ve fázi návrhu projektu spočívá dnešní ustálená praxe v rozdělení ražby na kvazihomogenní úseky, specifikace tříd ražby a stanovení předpokládaných délek ražby v jednotlivých třídách. Ve fázi nabídky potom budoucí zhotovitel stanoví rychlost ražby v jednotlivých třídách a předloží nabídkový harmonogram. S tím, jak postupuje ražba, jsou zastiženy/aplikovány skutečné třídy ražby, ve větší či menší míře odlišné od předpokládaných, viz kapitola 4.4.5.

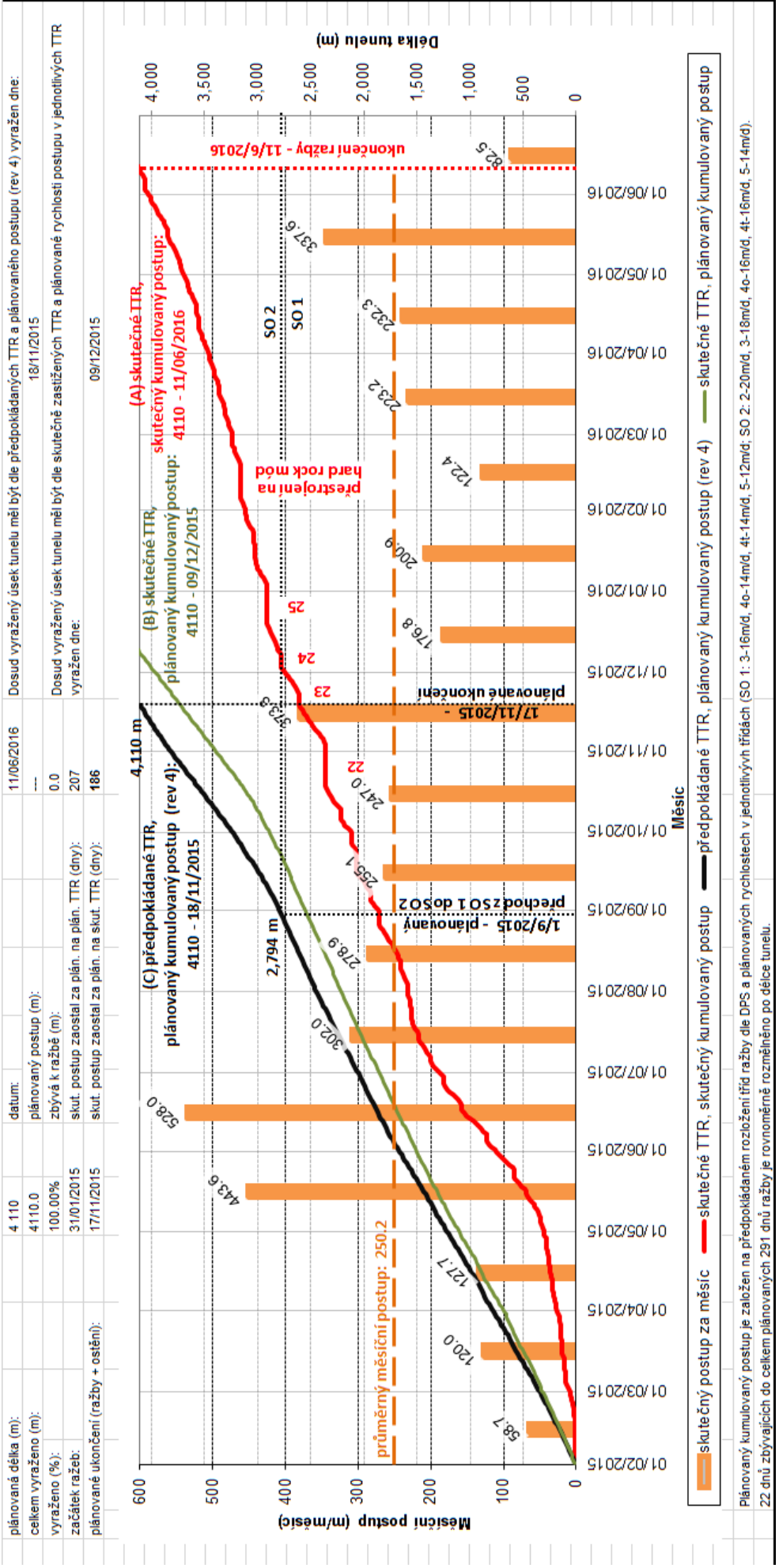
Postup ražby v čase je celkově ovlivněn podmínkami stavby. Tyto podmínky se velmi často liší od ideálních resp. předpokládaných v nabídce. Podmínkám stavby je věnována kapitola 4.7.

V závislosti na skutečných třídách ražby je třeba aktualizovat původní plánovaný harmonogram, který byl stanoven v závislosti na třídách ražby předpokládaných v zadávací dokumentaci (projektem) a plánovaných rychlostech postupu v těchto třídách. Touto aktualizací vzniká očekávaný harmonogram, který v sobě zahrnuje skutečně zastižené podmínky (třídy ražby), ale zároveň respektuje předpoklady zhotovitele (plánované rychlosti postupu ražby v jednotlivých třídách). Pro vyhodnocení postupu ražeb a v souvislosti se smlouvou o dílo je třeba nejčastěji porovnávat skutečný postup s postupem očekávaným ve skutečně zastižených podmínkách ražby.

V harmonogramech ražeb tedy rozlišujeme následující tři důležité linie:

- (A) **skutečný** postup ražby, který v sobě odráží skutečně zastižené geotechnické podmínky/třídy ražby, skutečné trvání/produktivity činností a prostoje.
- (B) **očekávaný** postup ražby, který je založen na skutečně aplikovaných a/nebo zastižených třídách ražby a původně plánovaných trváních/produktivitách činností, přičemž jsou zahrnuty jen uznatelné prostoje.
- (C) **plánovaný** postup ražby, který je založen na projektem předpokládaných třídách ražby a původně plánovaných trváních/produktivitách činností obvykle jen s minimálním zohledněním možných prostojů.

Na Obr. 4.6 je uveden příklad postupu ražby obsahující všechny tři typy linií. Jak je z grafu patrné, byl skutečný postup ražby tunelu (A) opožděn oproti původnímu plánu (C) o cca 7 měsíců. Část tohoto zpoždění v trvání 1 měsíce byla způsobena zhoršenými geotechnickými podmínkami, které se zároveň promítly do tříd ražeb. Zbývající půlroční zpoždění připadá na neočekávaně zhoršené geotechnické podmínky (které se nepromítly do tříd ražeb), nižší produktivitu činností, prostoje a další podmínky stavby.

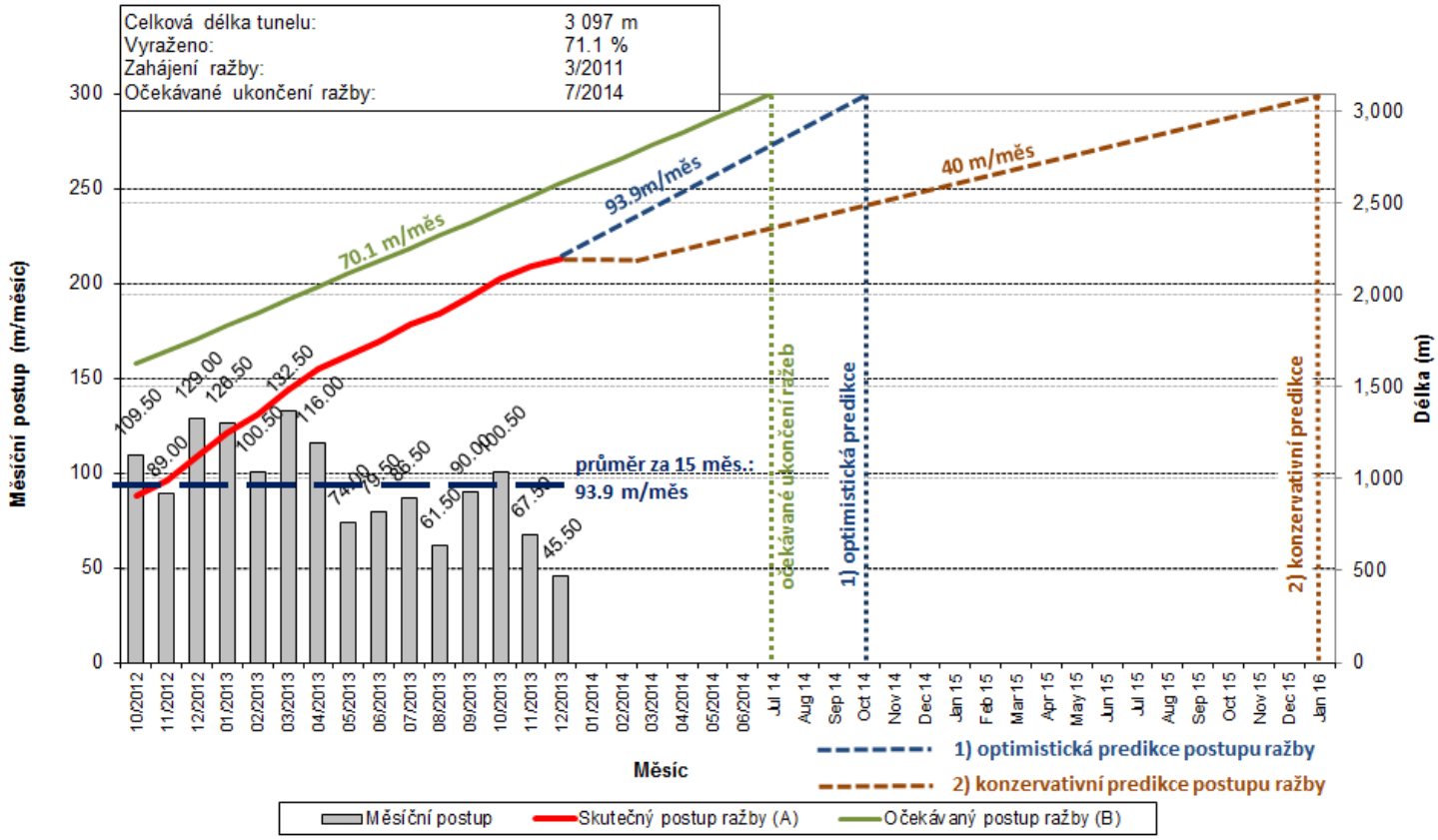


Obr. 4.6 Porovnání původního plánovaného (C, černá křivka), aktualizovaného (B, zelená křivka) a skutečného (A, červená křivka) postupu ražeb

Nutnost aktualizace harmonogramu ražby z důvodů změn tříd ražeb není obecně příliš znám mimo tunelářskou komunitu a na větších projektech může způsobovat nesrovnalosti. Plánovaný časový postup ražeb totiž nelze ve většině případů objektivně dodržet z důvodů měnících se geotechnických podmínek, resp. tříd ražby.

Realizační harmonogram výstavby projektu představuje klíčový pracovní nástroj pro efektivní plánování využívání prostředků a pracovních sil, operativní řízení výstavby a pro rozhodovací procesy spojené s nákladovým řízením stavby. V průběhu výstavby dochází ke změnám časového postupu ražeb – rozdíly mezi plánovaným, očekávaným a skutečným harmonogramem – které mají často podstatný vliv na harmonogram celého projektu. Vzhledem k těmto změnám vyvstávají otázky spojené s předpokladem ukončení ražeb, kdy je zřejmá změna termínu dokončení, ale je potřeba znát nový aktualizovaný termín ukončení ražby. K aktualizaci termínu ukončení ražby (prorážky) obvykle dochází během realizace projektu mnohokrát.

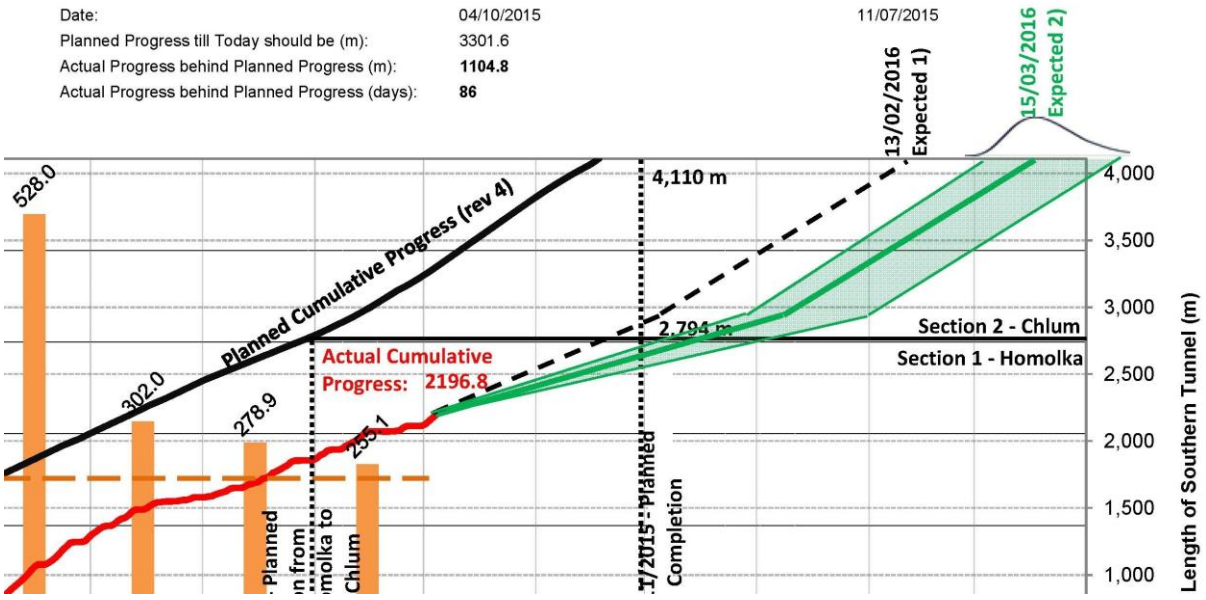
Současná praxe pro stanovení předpokládaného ukončení ražby spočívá obvykle ve stanovení data prorážky odborným odhadem. Příklad odhadu ukončení ražby části podzemního přivaděče vedoucího pod řekou Jhelum na projektu Neelum-Jhelum (příloha 3) je uveden v grafu na Obr. 4.7.



Obr. 4.7 Skutečný postup ražby (A, červeně), očekávaný postup ražby (B, zeleně) a predikce postupu 1) optimistická (modře) a 2) konzervativní (hnědě), projekt Neelum-Jhelum, tunely pod řekou Jhelum (příloha 3).

V grafu jsou uvedeny dva scénáře dokončení ražby – 1) optimistický k červenci 2014 a 2) konzervativní k lednu 2016. Tato predikce byla provedena po vyražení 71 % z celkové délky tunelu 3,1 km. Optimistický scénář predikce byl založen na průměrném postupu za předcházejících 15 měsíců. Supervize představila ještě scénář konzervativní, založený na předpokladu zhoršujících se produktivit činností (např. neměnící se počet damprů při narůstající vzdálenosti mezi čelbou a portálem) a možnosti závalu z důvodu porušování technologické kázně při výstavbě. Zatímco objednatel akceptoval pouze první scénář, budoucí vývoj dal částečně za pravdu supervizi – k dokončení ražby došlo skutečně v lednu 2016; namísto závalu došlo k zaplavení tunelu podzemní vodou a zdržení ražby. Ačkoli se v tomto případě povedl odhad dokončení ražby dokonale, nejde o častý scénář. Predikce podmínek stavby vyžaduje zkušenosti a jedná se stále o náhodu, pokud se tato predikce povede. Proto je správné predikci harmonogramu ražby vždy dokládat spolu s odhadnutými podmínkami stavby.

Výsledkem predikce harmonogramu ražby by nemělo být jedno konkrétní datum dokončení ražby, ale pokud možno časový rozsah stanovený s určitou zvolenou pravděpodobností. Na Obr. 4.8 je schematicky zobrazen tento rozsah pomocí zeleně vybarvené plochy vyznačující 95% pravděpodobnost postupu ražeb. Datum ukončení ražby je náhodná veličina, pro kterou můžeme vypočítat empirickou distribuční funkci a odhadnout hustotu pravděpodobnosti. Podrobně je problematika spolu s příklady vysvětlena v kapitole 8.



Obr. 4.8 Schéma predikce postupu ražby formou náhodné veličiny, která má jistou empirickou distribuční funkci a hustotu pravděpodobnosti - zelená plocha označuje postup ražby s 95% pravděpodobností.

Níže uvedená hlediska mají značný vliv na časový plán postupu ražby.

- Aktualizace předpokládaných tříd ražby v závislosti na zkušenosti z již realizovaných úseků ražby a případně dalších dodatečně provedených

geotechnických průzkumů. Tzn. změna předpokládaného určení jednotlivých tříd ražby na zbývající délce úseku.

- Aktualizace plánovaných rychlostí postupu ražby v jednotlivých třídách na základě zkušeností z již realizovaných úseků ražby. Stanovení rychlostí postupu v závislosti na trvání a možné optimalizaci jednotlivých činností a prostojů.

- Specifikace podmínek stavby a jejich predikce.

Nástroje pro automatickou predikci vývoje postupu ražeb v čase v závislosti na výše uvedených hlediscích nejsou v současnosti dostupné.

4.3.1 Predikce postupu ražby pomocí tunelovacích strojů

Pro ražbu pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů není na toto téma v českém jazyce rozšířena relevantní literatura. Základní ustanovení pro mechanizovanou ražbu lze nalézt v Uživatelské příručce pro mechanizované tunelování [29]. Další podrobnosti jsou však obtížně dohledatelné v některých článcích jako částečně např. o problematice rozpojování řeznými nástroji [41] apod. Autor disertační práce proto vychází ze zahraniční literatury a z vlastních zkušeností s ražbou tunelovacími stroji získaných zejména na projektu Kárahnjúkar, viz příloha 1 a [8].

Níže je uvedená zahraniční literatura, která se týká problematiky plnoprofilových tunelovacích strojů a z které autor v této práci zejména vycházel:

- Study of Utilization Factor and Advance Rate of Hard Rock TBMs [76]
- The Influence of Geotechnical Parameters on Penetration Prediction in TBM Tunnelling in Hard Rock [69]
- TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock [21]
- Hardrock Tunnel Boring Machines [23]
- Mechanised Shield Tunnelling [24]
- The updated NTNU TBM prediction model [77]
- EFNARC Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock [74]
- TBM Performance Prediction in Rock Tunnelling Using Various Artificial Intelligence Algorithms [71]
- Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavability [73]
- Modified CSM model for predicting TBM performance in rock mass [72]
- Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models [75]
- Development of a rock mass boreability index for the performance of tunnel boring machines [70]

Obecně platí, že většina literatury je věnována studiu parametrů ražby tunelovacích strojů závisejících na geotechnických podmínkách a parametrech tunelovacího stroje. Jedná

se zejména o základní parametry, z nichž některé platné pro ražbu TBM do skalních hornin jsou uvedeny na seznamu v Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Vybrané základní parametry ražby tunelovacími stroji TBM do skalních hornin v závislosti na geotechnických podmínkách a provozních parametrech tun. stroje.

Geotechnické parametry	Provozní parametry tun. stroje
Pevnost horniny v tlaku UCS (MPa)	Přítlačná síla CF (MN)
Pevnost horniny v tahu BTS (MPa)	Kroutící moment řezné hlavy Torque (kNm)
Geotyp (textura, struktura)	Rychlost otáček řezné hlavy CHS (ot/min)
Vzdálenost, charakter a orientace diskontinuit	Instalovaný výkon Power (kW)
Napěťové podmínky horninového masivu	Průměr řezné hlavy (m)
Index abrazivity dle Cerchara CAI	Počet, velikost, vzdálenost a kvalita valivých dlát
Index vrtatelnosti DRI	Délka záběru (m)
Přítoky podzemní vody (vliv na UF)	Přepravní kapacita dopravníkového pásu
atd.	atd.

Výše uvedené parametry slouží jako vstupní parametry do modelů predikce postupu ražby tunelovacích strojů. Nejčastěji se predikuje penetrace PEN (mm/ot) a čistá penetrační rychlost NPR (mm/min). V průběhu ražeb se tyto parametry sledují. Dále se můžou vyhodnocovat parametry specifické penetrace SP (mm/ot) / (kN/val. dláto), polní penetrační index FPI (kN/val. dláto) / (mm/ot), specifická rychlost ražby SER (m^3/ot) / (kN/val. dláto). Přehled známých modelů predikce penetrace tunelovacích strojů je uveden v Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Přehled autorů / modelů predikce penetrace a čisté penetrační rychlosti tunelovacích strojů [76], [69], [77].

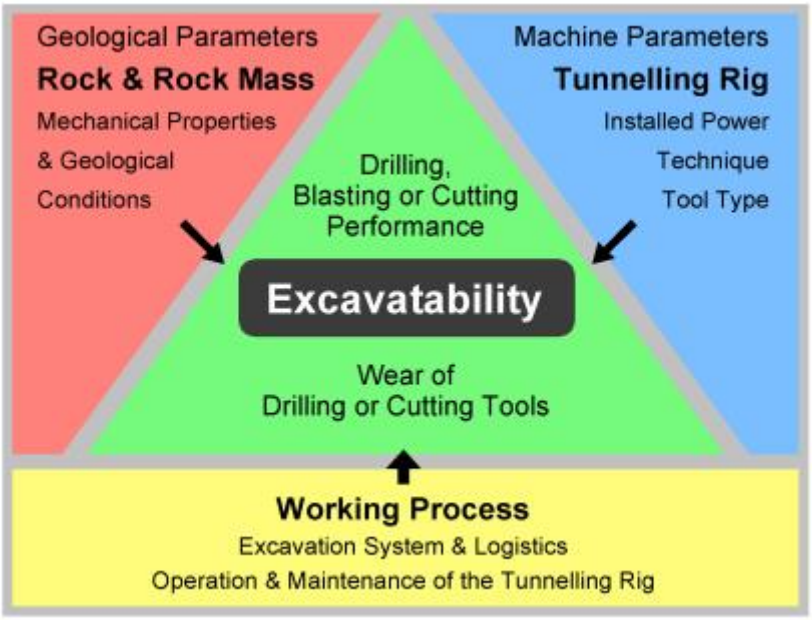
Autor / model	Rok	Popis v anglickém jazyce
Tarkoy	1973	For limestone, shale, sandstone, quartzite, orthoquartzite, schist, dolomite with total hardness of 2-242 and penetration rate of 0.076-3.716 m/hr.
Roxborough and Phillips	1975	For UCS of 70-205 MPa, Tensile strength of 5.5-13.8 MPa, Cutter tip width of 11.4-19 mm, Cutter diameter range 382-432 mm.
Graham	1976	PRev=3940 Fn/UCS.
NTNU (Johannessen)	1996	
CSM (Ozdemir)	1977	
Ozdemir et al.	1978	Based on The Robbins Company data in granite, quartzite, schist, and shale.
Farmer and Glossop	1980	Based on six tunnel projects' data. PRev=624 Fn/TS.
Cassinelli	1982	Using RSR. PR=-0.0059 RSR+1.59
Snowdon et al.	1982	A Formula to demonstrate relationship among normal force, rolling

		force and penetration per revolution.
Lislerud et al.	1983	Based on excavation records in Norway in shale, limestone, gneiss, basalt.
Nelson et al.	1983	Based on information of four tunnels in sedimentary rocks
Bamford	1984	Based on data of tunneling in claystone on the Thompson project in Australia for bedding spacing range 0.3 to 0.5 m.
Büchi	1984	
Sanio	1985	Effect of foliation on penetration rate.
Hughes	1986	For sandstone and penetration of up to 10 mm/rev.
Boyd	1986	On the basis of cutterhead power, specific energy, and tunnel cross section area.
Sato et al.	1991	Followed Sanio's work and used the same approach, but on a rotary cutting machine
Innaurato et al.	1991	Updated version of the method presented by Cassinelli, see above. Based on 112 homogeneous sections. No information is provided on the number of bored tunnels. PR=UCS-0.437- 0.047 RSR + 3.15
Rostami and Ozdemir	1993	CSM model. On the basis of LCM tests.
Sundin and Wanstedt	1994	For granite, micaschist, gneiss with UCS range 65-200 MPa, point load range 1-9 MPa, CAI=1.9-5.9, Toughness of 2.2-3.3
Gehring	1995	
Haworth et al.	1986	Based on information of excavation in sandstone and marble with Fn=3.16 kN and RPM=14.
CSM (Rostami)	1997	Updated CSM model. On the basis of LCM tests. PRev=f (Fn,Fr)
Bruland	1998	NTNU model. PRev = [Mekv / M1] b
Barton	1999	Qtbm model. PR=5 QTBM -0.2
Cheema	1999	Based on information of one project to modify CSM model.
Alber	2000	
Alvarez	2000a	Neuro-Fuzzy modeling.
Q_{TBM} (Barton)	2000	
NTNU (Bruland)	2000	
Yagiz	2002	Based on information of one project to modify CSM model. PR=0.859+RFI+BI+0.0969 PRevCSM; RFI=1.44 Log(α)-0.0187 JS; BI=0.0157 Ps.
Ribacchi and Lembo Fazio	2005	SP=250 UCScm-0.66 UCScm=UCS exp((RMR-100)/18)
Ramezanzadeh et al.	2005	Based on information of 11 projects to modify CSM model. PRev=PRevCSM0.37 exp(1.8-0.0031 JS-0.0065 α)
Gong	2005	Based on information of one project.
RME (Z.T. Bieniawski)	2006	
Hassanpour et al.	2009a a 2009 b	Based on information of two projects. FPI=0.425 RMCI+11.28 RMCI=0.01 UCS RQD2/3
BI (Gong a Zhao)	2009	
Khademi et al.	2010	Based on information of one project. FPI=4.161+0.091 UCS+0.077 RQD+0.117 Jc+1.077 Log(α)
NTNU model	2016	

Nomenclature: PR: Penetration rate, PRev: Penetration per revolution, SP: Specific penetration rate, FPI: Field penetration index, Fn: Cutter normal force, Fr: Cutter rolling force, UCS: Uniaxial compressive strength of

intact rock, BTS: Brazilian Tensile strength, UCS_{cm}: Rock mass uniaxial compressive strength, RSR: Rock Structure Rating, RMR: Rock Mass Rating, RQD: Rock Quality Designation, M_{ekv}: Equivalent cutter thrust (kN/cutter), M_1: Critical cutter thrust (kN/cutter), that is necessary thrust to achieve 1 mm/rev, b =Penetration coefficient, α: The angle between the tunnel axis and the planes of weakness, P_s = Peak Slope Index (obtained from Punch Penetration test), Fs/Js= Fracture/Joint spacing, RFI: Rock fracture index, BI: Brittleness index, Jc: RMR joint condition partial rating, Q_{TBM}: Barton rock mass quality rating for TBM driven tunnels, RMCI: Rock Mass Cuttability Index, LCM: Linear Cutting Machine.

Rychlost postupu ražby tunelovacími stroji je závislá na výše uvedených parametrech (Tab. 4.1) a dále na využitelnosti tunelovacího stroje, viz Obr. 4.9 Parametry ovlivňující rychlost postupu ražby tunelovacími stroji: geotechnické vlivy (červeně), provozní parametry tunelovacího stroje (modře) a pracovní parametry charakterizované koeficientem využitelnosti tun. stroje (žlutě) [73].Obr. 4.9. Využitelnost tunelovacího stroje je charakterizována pomocí koeficientu využitelnosti UF (anglicky „Utilization Factor“). Koeficient využitelnosti tunelovacího stroje UF vyjadřuje procento času, po který tunelovací stroj razil, resp. rozpojoval a odtěžoval horninu.



Obr. 4.9 Parametry ovlivňující rychlost postupu ražby tunelovacími stroji: geotechnické vlivy (červeně), provozní parametry tunelovacího stroje (modře) a pracovní parametry charakterizované koeficientem využitelnosti tun. stroje (žlutě) [73].

Využitelnost tunelovacího stroje je podmíněna geotechnickými podmínkami, instalovanou horninovou výztuží, provozními parametry tunelovacích strojů, specifickými podmínkami stavby, zhotovitelovou zkušeností a motivací apod.

Využitelnost tunelovacího stroje má významný a přímý vliv na rychlost postupu ražeb a cenu díla. Zjednodušeně platí:

$$AS = NPR \times UF/100 \times (60 \times 24)/1000$$

Rovnice 1

kde AS je rychlost postupu ražby [m/d],
NPR je čistá razící rychlost [mm/min],
UF je koeficient využitelnosti tunelovacího stroje [%].

Zatímco naprostá většina literatury se zabývá parametry ražby v závislosti na geotechnických podmínkách a provozních parametrech tunelovacích strojů, tak o poznání méně je věnováno problematice využitelnosti tunelovacích strojů. Velmi dobře je problematika popsána v disertační práci „Study of Utilization Factor and Advance Rate of Hard Rock TBMs“ [76]. V praxi nejčastěji UF variuje mezi 0 % až 50 % tzn., že samotný proces rozpojování a odtěžování horninového masivu se odehrává po kratší dobu než ostatní činnosti a prostoje (údržba a opravy stroje, instalace horninové výztuže, výměna řezných nástrojů, prodlužování sítí a dopravníkového pásu, různé prostoje atd.).

Komplexní predikční modely se snaží predikovat spolu s penetrací i celkový postup ražby v závislosti na koeficientu využitelnosti tunelovacího stroje UF. Těchto modelů je pouze několik. Mezi nejznámější modely predikce celkové postupu ražby tunelovacích strojů TBM otevřeného typu se řadí zejména:

- CSM, Colorado School of Mines
- NTNU (NTH), Norwegian Institute of Technology, aktualizovaný 2016, 7. vydání
- Q_{TBM} (Barton)
- Alpine model, 2016
- RME (Bieniawski)
- Ribacchi - Lembo Fazio

Predikce koeficientu využitelnosti tunelovacích strojů je vysvětlena v Tab. 4.3 pro NTNU model a v Tab. 4.4 pro CSM model.

Tab. 4.3 Predikce koeficientu využitelnosti tunelovacích strojů UF použitím NTNU modelu (Jonhannssen 1988, 1994; US Army, 1997) [76].

Equations	Definition of terms
$U(\%) = \frac{T_b}{T_b + T_t + T_k + T_{tbm} + T_{bu} + T_a} \times 100$ $T_b = \frac{1000}{I}$ $T_t = \frac{1000 \times t_{tak}}{60 \times L_s}$ $T_k = \frac{1000 \cdot t_k}{L_h \cdot I}$ $T_{tbm} = 150$ Note: 1. t_k is obtained from cutterheads with front loaded cutters changed under favorable working conditions. 2. The proposed values for different time items are for "well organized" tunneling conditions and long failures are not included (Bruland, 1998). Therefore, extra times should be considered for unfavorable ground conditions as well as long delays for major TBM and BU components failures.	T_b= Time of boring (hr/km); T_t = Regrip time (hr/km); T_k = Cutter change and inspection (hr/km); T_{tbm}= Maintenance and servicing TBM (hr/km); T_{bu} = Maintenance and servicing back-up (40 hr/km for single track, 90 hr/km for double track, 55 hr/km for trackless transportation); T_a = Miscellaneous (time for activities such as cleaning, muck car delay, normal rock supporting, surveying, utility in hr/km, 185 hr/km for single track transportation, 95 hr/km for other types); I = Machine net advance rate (m/hr); L_s = Stroke length (m); t_{tak} = time per regrip (5.5 or 4.5) t_k = time used per changed cutter including time for inspection (for cutter diameters≤432 mm is 0.75 hr and for cutter diameters>432 mm is 0.833 hr); L_h = Cutter life in hour;

Tab. 4.4 Predikce koeficientu využitelnosti tunelovacích strojů UF použitím CSM modelu (Ozdemir, Sharp, 1991; US Army, 1997) [76].

Equations	Definition of terms
$U(\%) = \frac{T_b}{(T_b + T_r + T_m + T_a + T_{mu}) \times f_{10}} \times 100$ $T_m = t_1 + t_2$ $t_1 = 0.067 \times T_b$ $t_2 = f_4 \times T_b$ $T_r = f_3 \times L$ $T_a = F(t_s, t_w, t_u, t_p)$ $t_s = (\frac{192}{R^2} + 0.0033) \times L$ $t_w = f_6 \times L$ $t_u = (0.03 + 0.0013 \times \theta) \times L$ $t_p = f_9 \times L$	$T_b =$ Time of boring (hr); $T_m =$ Time of machine delay; $t_1 =$ Scheduled maintenance; $t_2 =$ Unscheduled maintenance; $T_r =$ Regrip time; $T_a =$ all system delays; $t_s =$ Surveying delays (hr); $t_w =$ water inflow delays (hr); $t_u =$ utility delays (hr); $t_p =$ Support installation (hr); $T_{mu} =$ mucking delay (hr/m) $\begin{cases} \theta & Mucking-method & Delay \\ Start-up & Truck & 0.115 \\ -15\ to\ -1 & Conveyor & 0.071 \times L \\ -1\ to\ +3 & Train & 0.056 \\ +3\ to\ +15 & Conveyor & 0.071 \end{cases}$ $R =$ Radius of curvature of horizontal curves (m); $L =$ Length of tunnel (m); $f_3(hr/m) = 0.03(hr/m) + \frac{409(m - hr)}{R^2}$ $f_4 = \begin{cases} 1\ (hr) & start-up \\ 0.324\ (hr) & production-phase \end{cases}$ $f_6 = \begin{cases} 0.0056\ (hr/m) & \min imal \\ 0.085\ (hr/m) & 3-4m^3/\min/m \\ F(\mu,\theta)\ (hr/m) & high \end{cases}$ $\mu =$ Water inflow rate; $\theta =$ Tunnel slope (degrees); $f_9 = \begin{cases} 0\ \ hr/m\ for\ RMR\ class\ I, II, III \\ 0.028\ hr/m\ for\ RMR\ class\ IV \\ 0.043\ hr/m\ for\ RMR\ class\ V \end{cases}$ $f_{10} =$ 1.025 (for labor delay)

Dnes nejrozšířenější a nejpoužívanější modely predikce postupu ražby jsou CSM a NTNU. Nicméně od doby prvního uvedení těchto modelů došlo k rozvoji technologie tunelovacích strojů, zvětšily se jejich průměry, výsledkem čehož je, že dříve uvedené modely nepřinášejí spolehlivé výsledky. Z těchto důvodů dochází k aktualizaci modelů. Např. výzkumná skupina ABROCK, která byla založena roku 2006 ve spolupráci 5 univerzit -

Technische Universität München, Montanuniversität, Leoben, Universität Innsbruck, ETH Zürich, EPF Lausanne – klientů, dodavatelů, výrobců TM a expertů, aktualizovala Gehringův model a následně vyvinula nový, tzv. Alpine model.

Modely týkající se životnosti valivých dlát nejsou v této práci uvedeny.

V praxi jsou jednotlivé projekty velmi odlišné. Ačkoli je snaho o jistou generalizaci, tak vždy bude platit, že specifické podmínky projektu určují rychlost postupu ražby. Je určitě zajímavé hodnotit ražbu vůči těmto generalizovaným podmínkám, ale takové hodnocení je pouze orientační – jednak proto, že není smluvně závazné a také proto, že generalizované hodnoty mají obvykle vyšší rozsah hodnot už z principu toho, že vystihují široký rozsah platnosti. Je proto vhodné/nutné vyhodnocovat ražbu vůči nabídkovým hodnotám, které charakterizují specifičnost projektu a jsou smluvně závazné.

Ve fázi vypsání nabídky je však možné a vhodné požadovat nabídkové hodnoty penetrace a penetrační rychlosti, UF, procentuální rozložení činností atd. v závislosti na třídách ražby. Pokud jsou tyto hodnoty specifikovány v nabídce, tak se stávají smluvně závaznými a je možné ražbu vyhodnocovat vůči těmto hodnotám.

Pokud jsou výše uvedené nabídkové hodnoty k dispozici, je vyhodnocení ražby za podmínky použití vhodného softwaru poměrně jednoduché.

V kapitole 7.7 bude provedena analýza koeficientu využitelnosti tunelovacího stroje UF, čisté penetrační rychlosti NPR a některých dalších základních parametrů ražby. Predikce postupu ražby tunelovacího stroje v závislosti na koeficientu využitelnosti tunelovacího stroje UF a čisté penetrační rychlosti NPR bude provedena pomocí simulací v Př. 25 v kapitole 8.

4.4 Třídy ražby

4.4.1 Úvod

Rozdělení tunelu po jeho délce na kvazihomogenní celky a na třídy ražby v závislosti na předpokládaných geotechnických podmínkách a typu ražby je prováděno v projektové přípravě díla [50]. Třídy ražby a související opatření se stanovují zejména na základě předpokládaných geotechnických podmínek, norem, zkušeností, místních zvyklostí, parametrů stavebního díla, statických výpočtů apod. Třídy ražby jsou pro každý projekt specifické [9].

Rozdělení tříd ražby po délce tunelu je jedním z hlavních podkladů při stanovení harmonogramu a cenové nabídky budoucího zhotovitele. Zhotovitel ve své nabídce stanoví na základě svých znalostí a zkušeností plánované rychlosti ražby v jednotlivých třídách, obvykle v jednotkách m/den. Uzavřením smlouvy o dílo mezi objednatelem a zhotovitelem se stávají plánované rychlosti ražby v jednotlivých třídách, časový postup ražeb, harmonogram a cenová nabídka závaznými ve vztahu k definovaným třídám ražby. Je proto důležité, aby tyto rychlosti postupu a další podrobnosti byly součástí nabídek [9].

Je nutné, aby třídy ražby a postupy jejich určování byly stanoveny jednoznačným způsobem v projektové dokumentaci, nabídce a smlouvě o dílo. Tím je dán základ pro snadnější a přesnější zatřiďování v průběhu výstavby. Současný stav problematiky je ve světě a ČR odlišný pro konvenční ražby a pro ražby prováděné plnoprofilovými tunelovacími stroji. Proto jsou tyto způsoby ražeb v dalším textu odlišovány.

Na projektech, jichž se autor disertační práce zúčastnil, viz např. přílohy 1 až 6, s celkovou délkou tunelů přesahující 250 kilometrů ražených za pomocí různých metod, byl stav problematiky tříd ražeb velmi různý. Nebyla výjimečná nekvalitní specifikace tříd ražeb v projektu a ve smlouvě o dílo, v horších případech zcela chybějící a/nebo nastavený špatný způsob zatřiďování v průběhu realizace. Pouze výjimečně byly všechny aspekty týkající se tříd ražeb a určování tříd bezchybně zavedeny a používány. Výsledkem je zjištění, že třídám ražby není věnována pozornost, kterou si zasluhují. V této práci bude na příkladech vysvětlena důležitost tříd ražeb při výstavbě podzemních děl a budou dána doporučení pro jejich specifikaci a zejména pro určování tříd ražby a délky záběrů v průběhu výstavby.

4.4.2 Ražby pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů

Literatura popisující podrobně problematiku ražeb plnoprofilovými tunelovacími stroji není v českém jazyce dostupná. Základní ustanovení pro mechanizovanou ražbu lze nalézt v Uživatelské příručce pro mechanizované tunelování [29] a v některé literatuře jako např. [42]. Autor disertační práce proto vychází ze zahraniční literatury a z vlastních zkušeností s ražbou tunelovacími stroji získaných zejména při výstavbě projektů Kárahnjúkar (příloha 1 a [8]) a dále na projektech Neelum-Jhelum (příloha 3 a [4][8]) a Ejpovice (příloha 5).

Použitá literatura:

- Švýcarská norma SIA 118/198:2007 Civil Engineering, General Conditions for Underground Constructions, General Contract Conditions applicable to code SIA 198, Underground construction – Execution [25]
- Hardrock Tunnel Boring Machines [23]
- Mechanised Shiedl Tunnelling [24]
- TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock [21]
- Uživatelská příručka pro mechanizované tunelování v podmínkách ČR [29]
- Realizace ražby jednokolejných tunelů pražského metra V.A pomocí zeminových štítů [46]
- Výstavba tunelů ve skalních horninách [42]
- Rakouská norma ÖNORM B 2203-2: Práce v podzemí – smlouva o provedení díla, Část 2: Kontinuální ražba pomocí tunelovacích strojů [63]
- Německá norma DIN 18312: General Technical Conditions of contract for construction work – underground construction [28]

Ražba tunelů pomocí moderních plnoprofilových tunelovacích strojů se začala v České republice uplatňovat zejména od roku 2011. Pomocí zeminových štítů (EPBM) byly raženy tunely metra v Praze [45] a od roku 2015 je pomocí konvertibilního EPBM ražen 4,1 km dlouhý dvou-troubový železniční tunel Ejpovice, viz příloha 5. Pro ražbu pomocí EPBM byly na těchto projektech zavedeny třídy ražby (technologické třídy ražby, TTR). Ražby tunelů pomocí moderních TBM otevřeného typu do skalních hornin se zatím v České republice neuskutečnily. Pro metodu ražby pomocí tunelovacích strojů není v České republice z hlediska tříd ražeb ustálená praxe. Některé projekty, kterých se autor disertační práce zúčastnil a kde byly tunely ražené pomocí tunelovacích strojů, odhalily komplikace spojené se specifikací a určováním tříd ražeb v průběhu výstavby.

Vzhledem k tomu, že problematika určování tříd ražeb na tunelovacích strojích v praxi není nejen v České republice příliš známa, rozhodl se autor disertační práce provést dotazníkový průzkum zaměřený na způsoby zatřiďování při ražbě pomocí tunelovacích strojů. Za účelem zjištění a ověření specifikací a stanovování tříd ražeb byla provedena kontrola s následujícími normami:

- švýcarskou normou SIA - General Contract Conditions [25],
- rakouskou normou ÖNORM B 2203-2 [63],
- německou normou DIN 18312 [28].

Známých klasifikačních systémů pro použití při ražbě tunelovacími stroji není mnoho. Jedním z nejznámějších systémů je Q_{TBM} [21]. Protože klasifikační systémy pro TBM jsou odvozeny z klasifikačních systémů pro konvenční ražby (např. Q_{TBM} od Q apod.), jsou zahrnuty do kapitoly 4.4.4 společně s klasifikačními systémy pro konvenční ražby.

V kapitole 4.4.5 jsou uvedena porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb z několika reálných projektů.

Výsledky studia zahraniční literatury a provedeného průzkumu, jakož i další podrobnosti týkající se tříd ražeb a jejich určování při ražbách prováděných pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů jsou uvedeny v kapitole 9.

4.4.3 Konvenční ražba

Konvenční ražba je nejrozšířenější způsob ražby v ČR a její zásady jsou relativně dobře zpracovány v literatuře. S ohledem na zásady určování tříd ražby (zatřiďování) a určování délky záběru je však v praxi situace občas odlišná. Autor disertační práce se proto soustředí na dvě aktuální témata u konvenčních ražeb – určování technologické třídy výrubu a délky záběrů. K tomu účelu čerpá zejména z níže uvedené literatury a vlastních zkušeností získaných při výstavbě projektů Považský Chlmec (příloha 4), Melamchi (příloha 2), Neelum-Jhelum (příloha 3 a [4][8]) a Kárahnjúkar (příloha 1 a [8]) a dále při tvorbě projektové dokumentace řady dalších tunelů (např. projekty Bunji [5], Crossrail [7] atd.).

Níže je uvedena literatura, která se týká problematiky konvenčních ražeb v souvislosti s třídami ražby a délkou záběru a z které autor v této práci zejména vycházel:

- Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR [50]
- Rakouská norma ÖNORM B 2203-1 Práce v podzemí – smlouva o provedení díla, Část 1: Cyklické ražby (konvenční tunelování) [26]
- Excavation and Support Determination for the Design and Construction of Tunnels [54]
- Rakouská směrnice pro geotechnický návrh konvenčně ražených podzemních staveb [27]
- Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock [55]
- Optimization of the round length in design stage for tunnel excavation in weak rock [56]
- Norwegian Method of Tunnelling [66]
- Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM [67]

Pro účely disertační práce se pod pojmem třída ražby rozumí obecný pojem pro zatřídění horninového masivu podle parametrů jeho kvality a chování zejména z hledisek vyztužení výrubu a případně ražnosti tunelovacího stroje. V České republice jsou pro konvenční metody ražby zavedeny tzv. technologické třídy výrubu [50]. Tyto třídy v sobě zahrnují kombinaci opatření vedoucích k zajištění stability výrubu v určitých geotechnických podmínkách při uvážení technologie a bezpečnosti ražby. Mezi tato opatření se řadí zejména:

- instalace prvků horninové výztuže,
- délka nezajištěného záběru,
- členění výrubu,
- sled postupu prací,
- předstihová opatření (např. předinjektáže).

V kapitole 4.4.4 následuje stručný popis současného stavu problematiky týkající se klasifikačních systémů sloužících k určení kvality horninového masivu a v závislosti na smluvních podmínkách a specifikaci i tříd ražby.

V kapitole 4.4.5 jsou uvedena porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb z několika reálných projektů.

Výsledky studia literatury a vlastních zkušeností autora disertační práce s problematikou určování tříd ražeb (zatřiďování) a délky záběrů u konvenčních ražeb jsou uvedeny spolu s doporučeními v kapitole 9.

4.4.4 Systémy pro klasifikaci horninového masivu a metody pro určování tříd ražby

Pro určování kvality horninového masivu a technologické třídy výrubu (zatřiďování) u ražeb prováděných konvenčním způsobem se mohou v závislosti na smluvních podmínkách používat některé z klasifikačních systémů. Ve světě existuje více obecně známých klasifikačních systémů, z nichž dva nejznámější, jejichž snahou je postihnout celkovou kvalitu horninového masivu i s ohledem na ražené podzemní dílo, jsou:

- Indexový klasifikační systém Tunnelling Quality Index Q (Barton), [30], [35], [36]
- Indexový klasifikační systém Rock Mass Rating RMR (Bieniawiski).[68]

Oba klasifikační systémy mají i své verze pro tunelovací stroje typu TBM do skalních hornin – Q_{TBM} a RMR_{TBM}.

Známé klasifikační systémy jsou velmi dobře popsány v české a zahraniční literatuře. V domácí literatuře je však o poznání méně kritických článků, které se týkají použití těchto systémů v tunelářské praxi. Níže je uveden vybraný seznam relevantní literatury:

- Engineering Rock Mass Classifications [68]
- TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock [21]
- Use and Misuse of Rock Mass Classification Systems with Particular Reference to the Q system [31]
- A critique of Q_{TBM} [32]
- Comments on 'A critique of Q_{TBM}' [33]
- Critical comments on quantitative rock mass classifications [64]
- Review of current rock mass characterization practices [34]
- Q-system: rock mass classification & rock support [14]
- Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD) [35]
- Parameters of the Norwegian Q-system and geological conditions correlated with grout take in the JA1 Skaugum Railroad Tunnel [36]
- Hoek, E. (1999): Putting numbers to geology – an engineer's viewpoint [65]
- Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM [67]
- atd.

Autor disertační práce používal Q-systém v rámci projektů Melamchi a Neelum-Jhelum. Jako Tunnel Resident Engineer zodpovědný za konvenční ražby na obou projektech, měl několik prezentací ohledně Q-systému a jeho použití v praxi, např. [14].

Cílem disertační práce není podrobný popis vlastností jednotlivých klasifikačních systémů. Jsou konstatovány důvody, proč je v praxi problematické používat pouze klasifikační systémy za účelem určování tříd ražby a délky záběrů. Mezi nejvýznamnější důvody patří:

1) V praxi velmi obtížné stanovení některých parametrů klasifikačních systémů, jako např. parametru SRF (Stress Reduction Factor) v Q-systému [32]. Někdy je vhodnější používat jen první čtyři parametry Q systému – index Q´.

2) Skutečnost, že jednotlivé vlastnosti horninového masivu jsou lépe vystižitelné rozsahem hodnot, případně pravděpodobnostním rozdělením, než pouze jedním číslem [65]. Navíc mapování a určování jednotlivých indexů je předmětem subjektivního rozhodování prováděného často v obtížných podmínkách [30]. To vede k rozsahu hodnot výsledku, který má často přesah i přes několik tříd ražby. V případě většího rozsahu výsledku by zajisté pomohly metody pravděpodobnostní analýzy, které by přinesly hlubší pochopení, s jakou pravděpodobností se jedná o danou třídu SC dle daného klasifikačního systému. Tato pravděpodobnost by ovšem často nedosahovala hodnot resp. míru jistoty, která je třeba při návrhu a statickém posouzení stavebních konstrukcí. Nicméně pro hlubší pochopení dané problematiky by se jednalo o přínos [14].

3) Klasifikační systémy nemusí zohledňovat, o jaký typ ostění se jedná – dočasné nebo trvalé, jednoplášťové nebo dvouplášťové apod.

4) Klasifikační systémy nepopisují přímo chování masivu, ale jeho charakter v daném okamžiku mapování. Většinou se jedná o relativně krátký časový okamžik, 10 až 20 minut. Geolog v praxi obvykle na čelbě mapuje různé parametry horninového masivu, které použije pro výpočet konkrétní hodnoty v rámci použité klasifikace. Chování horninového masivu se pokouší stanovit na základě parametrů klasifikačního systému. Některé parametry sice vyžadují jistou interakci (např. geologické kladívko pro odhad pevnosti), avšak stále takto provedené mapování více odpovídá popisu vzhledu povrchu horninového masivu než popisu jeho chování [14].[1]

5) Ačkoli známé klasifikační systémy mají každý svá specifická omezení, v praxi se jen výjimečně provádí souběžné kontrolní mapování jiným klasifikačním systémem např. pro kontrolní účely [14].

Další otázkou nesouvisející přímo s klasifikačními systémy, ale s mapováním geotechnických podmínek na čelbě je, pro jaký záběr se stanovuje horninová výztuž – právě otevřený nebo budoucí?

Určení kvality horninového masivu a tříd ražby pomocí těchto klasifikačních systémů je relativně dobře použitelné ve fázi návrhu podzemního díla. Přestože i v praxi mají klasifikační systémy nezastupitelnou úlohu, je schopnost určovat třídu ražby a délku

[1] Pozn.: Přeneseně lze tuto situaci porovnat s psychologem stanovujícím chování osoby na základě jejího vzhledu, aniž by jí pokládal otázky nebo navozoval situace nutící osobu reagovat a ukazovat tak projevy svého chování. Tím není myšlena kritika práce geologů, ale konstatování skutečnosti, že prostředky ke zjišťování chování horninového masivu na čelbě jsou pro obvyklé časové rozmezí prováděného mapování omezené a přístup na čelbu je navíc z bezpečnostních důvodů limitovaný (nezajištěný výrub).

Přeneseně řečeno to znamená, že psycholog nemá dostatečné prostředky pro spolehlivé zjišťování chování osoby s tím, že v případě přímého zjišťování chování na těle zkoumané osoby může mít její případný násilný projev fatální následky pro geologa.

budoucího záběru pouze pomocí těchto systémů omezená. Problémy s tím spojené jsou popsány např. v článku „Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system“ od A. Palmstroma a E. Brocha [31]. Článek, ačkoli se soustředí zejména na popis problémů spojených s používáním klasifikace Q-systém a Q_{TBM}, má obecný přesah. Více lze nalézt v článcích „A critique of Q_{TBM}“ [32], „Comments on A critique of Q_{TBM}“ [33] a „Critical comments on quantitative rock mass classifications“ [64].

Autor disertační práce je názoru, že užití známých klasifikačních systémů má jisté nedostatky pro mapování kvality horninového masivu na čelbě, avšak upravené a rozumně používané klasifikace představují oporu při určování tříd ražby. Tento názor autorovi potvrdili i zkušení odborníci při práci na více projektech. Naopak, pokud jsou známé klasifikační systémy využívány jako jediný výhradní prostředek pro určování tříd ražby a délky budoucího záběru, tak takové použití může vést k neekonomické ražbě, v horších případech i nebezpečné.

Velmi často jsou na projektech použity specifické systémy nebo metody pro zatřiďování. Ty mohou být např. odvozené z obecných klasifikačních systémů, ale zároveň jsou upravené a často zjednodušené tak, aby vyhovovaly potřebám konkrétního projektu a umožňovaly časté, praktické a pokud možno jednoznačné zatřiďování. Rozbor problematiky pro určování tříd ražby a délky budoucího záběru jsou uvedeny v kapitole 9.

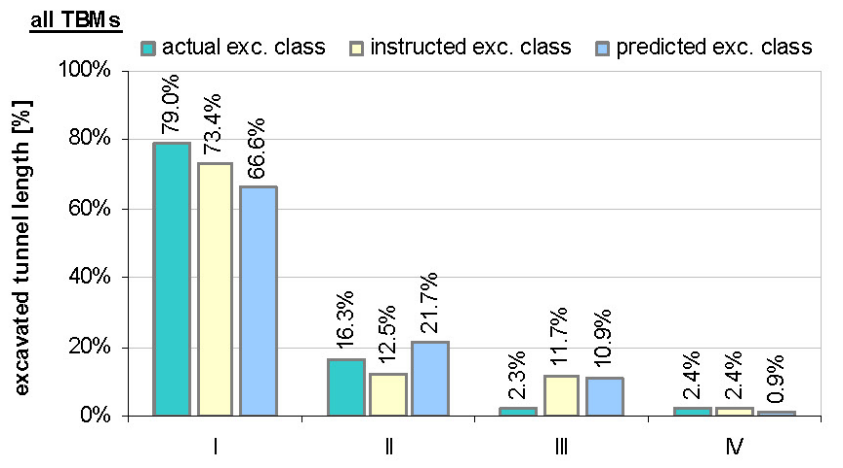
4.4.5 Porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb na reálných projektech

V této kapitole je uvedeno v několika příkladech porovnání projektem předpokládaných tříd ražby a skutečně zastižených/použitých tříd ražby. Porovnání bylo provedeno na následujících projektech a typech ražby:

- Př. 2 Projekt Kárahnjúkar na Islandu, ražby TBM otevřeného typu – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb
- Př. 3 Projekt Neelum-Jhelum v Pákistánu, ražby D&B a NRTM – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb
- Př. 4 Projekt Považský Chlmec na Slovensku, ražby NRTM – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb
- Př. 5 Projekty Khimty, Kaligandaki, Modi Khola a Middle Marsyangdi v Nepálu, ražby D&B, NRTM – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb

Př. 2 Projekt Kárahnjúkar na Islandu, ražby TBM otevřeného typu – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb

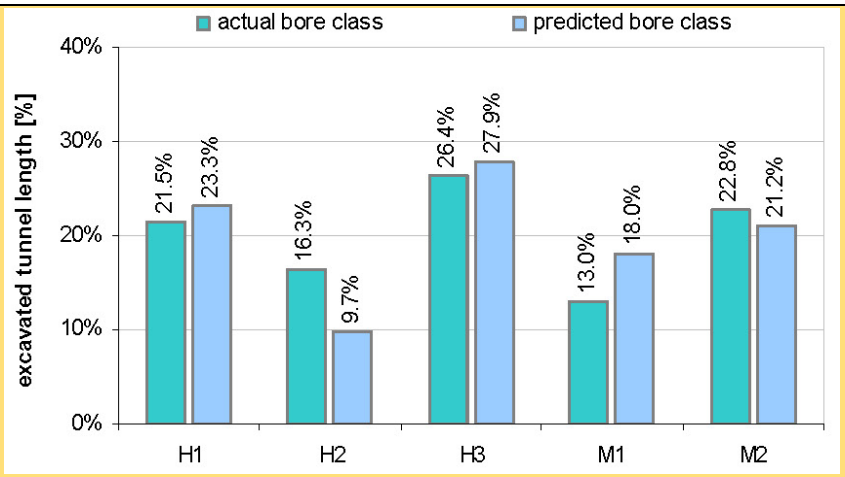
Na projektu Kárahnjúkar byly použity tři plnoprofilové tunelovací stroje TBM otevřeného typu do skalních hornin pro ražbu několika tunelů délky cca 48 km, viz [8] a příloha 1. Pro klasifikaci se používaly třídy ražnosti tunelovacího stroje BC a třídy horninové výztuže SC, jejichž specifikace jsou uvedeny v příloze 1. Porovnání zastižení projektem předpokládaných tříd horninové výztuže SC (zde značených jako predicted exc. classes), supervizí instruovaných (instructed) a skutečně aplikovaných (actual) je uvedeno v grafu na Obr. 4.10. Z grafu je patrná poměrně přesná shoda předpokládaného a skutečného rozdělení SC na 48 km tunelů. Patrný je mírný nárůst aplikace třídy SC1(I), která má nejméně prvků horninové výztuže a která byla použita na 79 % délky oproti předpokladu 66,6 % délky. Zde je vhodné podotknout, že z celkové délky tunelů vyztužených v SC1(I) bylo 91 % bez jakékoli výztuže, což je důsledek zastižení velmi kvalitního horninového masivu a šetrného způsobu jeho rozpojování.



Obr. 4.10 Distribuce skutečných stavbou aplikovaných (actual), supervizí instruovaných (instructed) a projektem předpokládaných (predicted) tříd horninové výztuže SC (zde značených jako exc. class) na 48 km tunelů ražených pomocí tří TBM [3].

Třídy SC byly instruovány supervizí, nicméně zhotovitel z časových důvodů aplikoval častěji nižší třídy SC. Jednalo se o zodpovědnost zhotovitele po dobu výstavby. Toto umožňovalo rychlejší postup ražby TBM. Klasifikace horninové výztuže pro účely SC byla založena pouze na horninové výztuži aplikované v určité vzdálenosti za řeznou hlavou stroje. Další, později přidaná, horninová výztuž již byla bez vlivu na SC. Příklad mapovacího formuláře horninové výztuže za účelem určení SC je uveden v příloze 15. Zhotovitel se obvykle dožadoval platby (claimed SC) za instruovanou třídu SC. Skutečně instalovaná výztuž v rozsahu tunelovacího stroje však obvykle neodpovídala rozsahu instruované výztuže. Proto jedním z úkolů supervize bylo v tomto případě bránit zájmy objednatele a třídy SC proplácet na základě skutečně aplikované výztuže, obvykle odpovídající lehčí třídě SC (viz mapovací formulář v příloze 15).

Porovnání projektem předpokládaných tříd ražnosti tunelovacího stroje BC a skutečně zastižených (actual) je uvedeno v grafu na Obr. 4.11. Opět se jedná o poměrně přesnou shodu předpokladu a skutečnosti. Uznání patří geotechnickému průzkumu a projektantovi. Mírný nárůst oproti předpokladu o 7 % je u třídy H2 (vulkanická struska „scoria“/Móberg), naopak pokles o 5 % u třídy M1 (smíšená čelba s 10 až 50 % čediče).



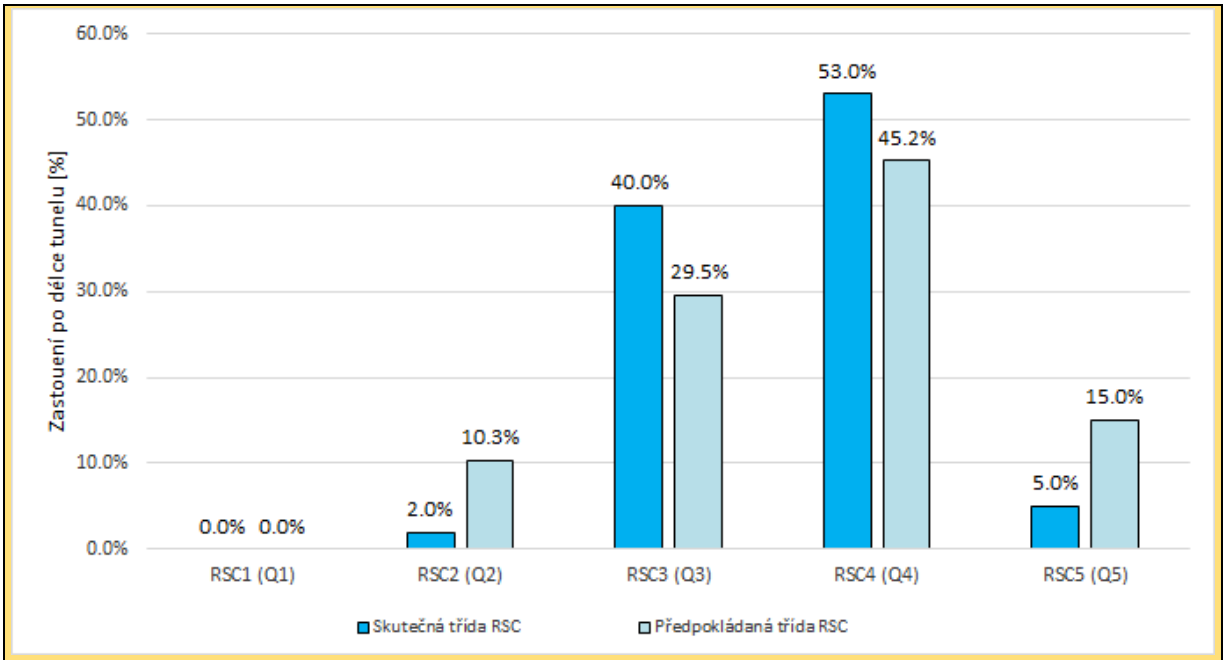
Obr. 4.11 Distribuce skutečných stavbou zastižených (actual) a projektem předpokládaných (predicted) tříd ražnosti TBM (BC) na 48 km tunelů ražených pomocí tří TBM [3].

Třídy ražnosti tunelovacího stroje (BC) určovali geotechnici supervize a zhotovitele na základě skutečně zastižených geotechnických podmínek. Vzhledem k tomu, že razicí stroje byly bez štítu, bylo umožněno mapování po obvodě výrubu, příklad mapovacího formuláře je v příloze 14.

Př. 3 Projekt Neelum-Jhelum v Pákistánu, ražby D&B a NRTM – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb

Na projektu Neelum-Jhelum probíhala ražba 12 km tunelů přes poruchovou zónu Muzaffarabad Fault Zone a dále pod řekou Jhelum pomocí metod D&B a NRTM, viz Příloha 3. Pro klasifikaci se používaly třídy horninového masivu značené Q a stanovované zejména v závislosti na klasifikaci horninového masivu pomocí Q-systému. Těmto třídám odpovídaly třídy horninové výztuže SC (někdy značené jako RSC).

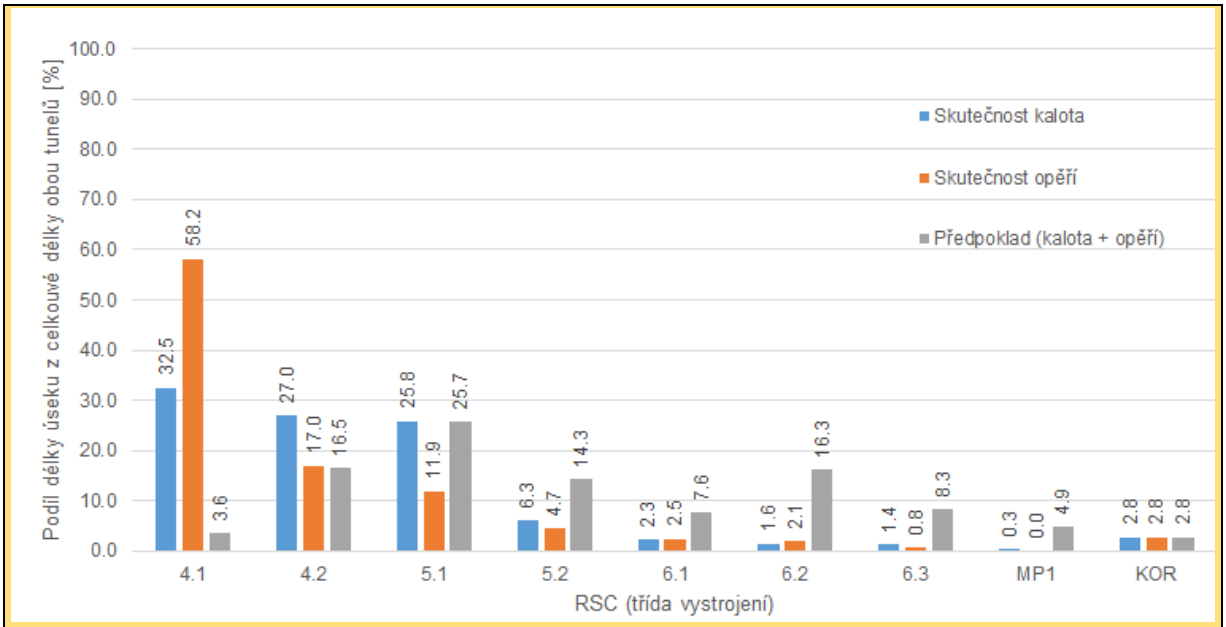
Porovnání projektem předpokládaných tříd horninové výztuže SC a supervizí instruovaných SC, které byly zhotovitelem skutečně aplikovány, je uvedeno v grafu na Obr. 4.12. Z grafu je patrný rozdíl mezi předpokládaným a skutečným zastoupením SC. Zatímco třídy SC5 a SC2 byly ve skutečnosti aplikovány o 10% méně každá, tak naopak zastoupení tříd SC3 a SC4 narostlo o cca 10% každá. To by normálně vypovídalo o určité homogenizaci masivu oproti projektovým předpokladům. Nicméně ve skutečnosti se jednalo o dopad různých podmínek stavby, z nichž jednou z nejvýznamnějších byla změna projektu v průběhu výstavby a zavedení definitivního monolitického betonového/železobetonového ostění.



Obr. 4.12 Distribuce skutečných a předpokládaných tříd SC na 12 km tunelů ražených pomocí D&B, NRTM [2].

Př. 4 Projekt Považský Chlmec na Slovensku, ražby NRTM – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb

Na projektu Považský Chlmec, viz příloha 4, kde probíhaly ražby tunelů délky cca 4,2 km metodou NRTM, bylo použito 7 tříd horninové výztuže SC1(4/1) až SC7(6/3) (na projektu správně značených jako technologické třídy výrubu, v disertaci jako SC nebo případně RSC). Porovnání projektem předpokládaných tříd horninové výztuže SC (zde značených jako třídy vystrojení) a skutečně aplikovaných je uvedeno v grafu na Obr. 4.13. Z grafu je patrný výrazný nárůst skutečné aplikace třídy SC1(4/1) oproti původnímu předpokladu. Nárůst v kalotě činil cca 30% délky (to odpovídá 1,2 km), v jádře cca 55% (to odpovídá 2,4 km). Naopak u nejtěžších horninových tříd – od 5/2 výše - je patrný výrazný pokles.



Obr. 4.13 Distribuce tříd horninové výztuže, tunel Považský Chlmec, příloha 4.

Určování třídy horninové výztuže SC bylo plně v kompetenci zhotovitele, který za tím účelem spolupracoval s geotechniky zkušenými v dané problematice. Toto bylo umožněno nastavením smluvním podmínek, kdy zhotovitel nesl do určité míry riziko odlišných geotechnických podmínek a byl proto zodpovědný za určování tříd horninové výztuže SC (jeho zisk/ztráta). Nezávislý geotechnický monitoring mapoval kvalitu horninového masivu a do určité míry se spolupodílel na schvalování SC, nicméně hlavní zodpovědnost měl zhotovitel.

Př. 5 Projekty Khimty, Kaligandaki, Modi Khola a Middle Marsyangdi v Nepálu, ražby D&B, NRTM – porovnání předpokládaných a skutečných tříd ražeb

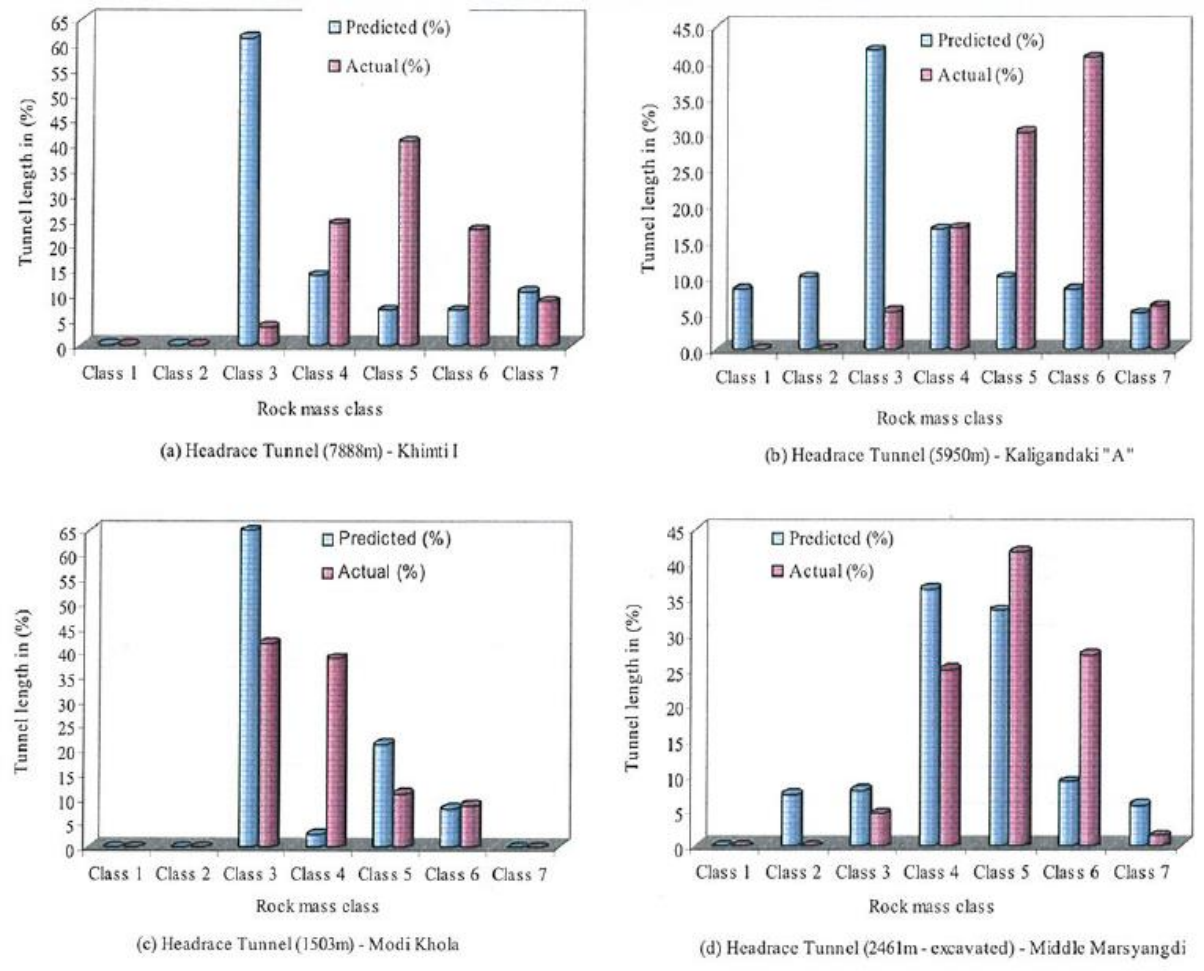
Údaje uvedené v tomto příkladu jsou převzaty ze studie, resp. článku [37], kde jsou porovnány předpokládané a skutečně zastižené horninové podmínky, resp. třídy výztuže SC, na 4 projektech ražených metodami D&B a NMT v Nepálu. Porovnání projektem předpokládaných tříd horninového masivu (odpovídají třídám horninové výztuže) a skutečně aplikovaných je uvedeno v grafu na Obr. 4.14. Specifikace tříd horninového masivu je uvedena v Tab. 4.5. Z grafu je patrný výrazný nárůst skutečné aplikace vyšších tříd kvality horninového masivu, resp. těžších tříd horninové výztuže napříč všemi projekty.

Tab. 4.5 Specifikace tříd kvality horninového masivu na 4 projektech, Nepál [37].

Rock mass classes used for comparison of the four tunnel cases

RMR $\approx 9 \times \ln Q + 44$ (Bieniawaski, 1989); RMR $= 15 \times \log Q + 50$ (Barton, 1995)

Descriptions		Range of Q-values		Range of RMR-values	
Rock Class	Quality descriptions	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Class 1	Very good to excellent	100	1000	85	100
Class 2	Good	10	100	65	85
Class 3	Fair to good	4	10	56	65
Class 4	Poor	1	4	44	56
Class 5	Very poor	0.1	1	35	44
Class 6	Extremely poor	0.01	0.1	20	35
Class 7	Exceptionally poor	0.001	0.01	5	20



Obr. 4.14 Porovnání předpokládaných a skutečných tříd horninové masivu, resp. tříd horninové výztuže na 4 projektech, Nepál [37].

Jak je uvedeno v článku [37], hlavním důvodem této skutečnosti je nedostatečný geotechnický průzkum komplikovaný nepřístupností daných vysokohorských oblastí.

Závěr

Obecně platí, že dochází k mírnému až výraznému zhoršení plánovaných tříd ražby. Již jen např. z teoretického důvodu je čas reakce na změnu geotechnických podmínek odlišný:

a) nutná okamžitá reakce při přechodu do relativně zhoršených podmínek
b) o poznání pomalejší reakce při přechodu do relativně lepších podmínek

Dalšími důvody rozšířenější aplikace těžších tříd ražby v praxi, než bylo původně předpokládané projektem, mohou být následující:

- Nedostatečný nebo optimistický geotechnický průzkum a projekt. Může být např. snaha učinit projekt ve fázi jeho návrhu levnějším [44].
- Snaha zhotovitele razit pro něj v nejziskovějších třídách ražby. Často bývají nejtěžší třídy ražby nejziskovější.

- Chybějící snaha a/nebo zkušenosti supervize a zhotovitele o optimalizaci ražeb. Ražba probíhá s mnohem větší mírou bezpečnosti než je nutné a jsou používány těžší třídy ražby.
- Nedostatečné strojní vybavení a/nebo nezkušení pracovníci a/nebo nedostupnost určitého materiálu na čelbě vedoucí k zhoršené kvalitě prací a snížené bezpečnosti. Důsledkem může být zkrácení délek záběrů a /nebo použití těžších tříd ražby tak, aby byl tento negativní vliv eliminován.

4.4.6 Třídy ražby a související aspekty v různých fázích projektu

Fáze návrhu

Ve fázi návrhu se nejprve provede geotechnický průzkum horninového masivu předmětného díla. Geotechnický průzkum musí stanovit tzv. kvazihomogenní celky po délce trasy budoucího podzemního díla. Kvazihomogenní celek se vyznačuje téměř shodnými nebo obdobnými geotechnickými parametry. [50]

Na základě statických výpočtů, norem, místních zvyklostí, parametrů projektu apod. je specifikována horninová výztuž, deformační limity, délka záběru a další parametry pro jednotlivé třídy ražby tak, aby tyto pokrývaly podmínky očekávané geotechnickým průzkumem [11].

Je vytvořena předpověď nejpravděpodobnějšího rozdělení tříd ražby po délce budoucího podzemního díla, na jejímž základě je vypracován výkaz výměr. Je možné provést „homogenizaci“ tříd ražby, pokud je řádně vysvětlena, viz Rakouská směrnice pro geotechnický návrh konvenčně ražených podzemních staveb [27].

Je důležité provádět specifikaci tříd ražby a metody zatřiďování již ve fázi návrhu podzemního díla. V praxi se kvalita specifikace tříd ražby a metody zatřiďování velmi liší, viz příklad níže.

Př. 6 Nevhodná specifikace tříd ražby

Na projektu tunelů ražených pomocí plnoprofilového tunelovacího stroje obsahovala smlouva o dílo nekvalitní specifikaci tříd ražby a metody zatřiďování. Návrh specifikace tříd ražby byl při daném typu kontraktu a parametrech projektu v kompetenci zhotovitele, atypicky ve fázi nabídky. Vzhledem k nejednoznačné a podmínkám smlouvy nevyhovující specifikaci tříd ražby byla původní nekvalitní specifikace supervizí zamítnuta. Vytvořením akceptovatelného návrhu tříd ražby byl pověřen zhotovitel v součinnosti se supervizí. Ražba tunelu byla zahájena, ačkoli nebylo možné provádět spolehlivě zatřiďování do tříd ražby. Je třeba zdůraznit, že u měřeného kontraktu mají třídy ražby přímý a podstatný vliv na harmonogram a cenu díla.

Vzniklý stav pokračoval po delší dobu výstavby. Podmínečně akceptovatelné řešení tohoto stavu zabralo nemalé úsilí a prostředky, přičemž došlo k negativnímu ovlivnění vztahů mezi všemi účastníky výstavby. Pokud by specifikace tříd ražby byla provedena řádně a byl jednoznačně popsán způsob určování tříd ražby, tak by ražba probíhala kvalitněji, bezpečněji a byly by ušetřeny finanční prostředky.

Úlohou supervize a/nebo případně geomonitoringu je posoudit míru odlišnosti skutečně zastižených geologických podmínek od projektem předpokládaných. Za tím účelem je vhodné, aby součástí smluvní dokumentace byl tzv. **Geotechnical Baseline Report** (GBR).[2] Chybné specifikace a/nebo nevhodné nastavení kritérií charakterizujících předpokládané geotechnické podmínky stavby mívají extrémní následky pro harmonogram a cenu projektu. Dále je uveden související příklad z praxe.

Př. 7 Nespecifikované postupy k zajištění podmínek při ražbě podzemního díla a nedostatečně specifikované očekávané geotechnické podmínky

Zadávací dokumentace výstavby skutečného projektu, který obsahoval několik desítek kilometrů ražeb tunelů, pouze velmi okrajově pojednávala o nakládání s přítoky podzemní vody do výrubu po čas výstavby díla. Byly sice specifikovány položky ve výkazech výměr na úpravu podzemní vody vyteklé z tunelu, ale dokumentace dostatečně nepopisovala, jak, kdy apod. místa průsaků nebo průvalů podzemních vod těsnit. Formulace týkající se řešení přítoků podzemní vody do díla, které byly uvedeny ve smlouvě, byly velmi nevhodně zvolené.

Budoucímu zhotoviteli se již pravděpodobně ve fázi přípravy nabídky podařilo nalézt ve znění budoucí smlouvy o dílo chyby, které by mohl případně později využít ve svůj prospěch. To se v průběhu výstavby podzemního potvrdilo, když zhotovitel záměrně netěsnil přítoky podzemní vody do díla a odkládal tyto práce na co možná nejpozdější dobu. Vzhledem k nekvalitnímu znění smlouvy o dílo neměla supervize a objednatel praktickou možnost, jak zhotovitele přinutit k včasnému sanování průsaků a průvalů podzemních vod, ačkoli bylo vynaloženo nemalé úsilí a náklady toho dosáhnout. Ke konci ražeb proudila nepřetržitě z tunelů voda v celkovém množství přesahujíc 3000 l/s. To mělo významný dopad jak na fakturaci za úpravu vod, tak zejména na veškeré práce prováděné v tunelu. Práce v tunelu byly komplikovány a opožďovány z důvodu značného množství vody v počvě.

Fáze nabídky a uzavření smlouvy o dílo

Zadávací dokumentace musí obsahovat specifikaci tříd ražeb, kvazihomogenní celky, předpokládané rozdělení tříd ražby po délce plánovaného podzemního díla, očekávané geotechnické podmínky apod.

Ve fázi podávání nabídky by měl potenciální zhotovitel provést ocenění jednotlivých tříd ražby a prvků horninové výztuže. Oceňují se další specifické položky v závislosti na projektu.

[2] Pozn.: V ČR je zvykem popsat pravděpodobné geotechnické podmínky za účelem návrhu podzemního díla. Není časté, aby geotechnické podmínky byly specifikovány odděleně ve formě speciálního smluvního dokumentu, který popisuje předpokládané zastižení vybraných parametrů horninového masivu v délce díla spolu s rozsahem a případně i četností hodnot, kterých mohou tyto parametry nabývat. Pokud dojde k tomu, že např. některý parametr vykáže ve skutečnosti v určitém rozsahu hodnoty přesahující smluvní obor hodnot, tak dochází ke kvalifikaci takových podmínek jako neočekávaných. GBR je smluvní dokument, který slouží pro jednoznačné stanovení toho, zda se vybrané měřitelné geotechnické parametry nachází v předpokládaném smluvním rozsahu [38]. Zhotovitel je dle smlouvy o dílo placen za ražbu v těchto očekávaných nebo případně lepších geotechnických podmínkách. Vícepráce z důvodu neočekávaných zhoršených geotechnických podmínek jsou placeny navíc.

Nejčastěji se může jednat o čerpání a úpravu podzemní vody z tunelu, montáž a demontáž plnoprofilových tunelovacích strojů, konstrukční prvky ostění, různé druhy injektáží, vrty a jiné metody k zjištění nebo ověření geotechnických podmínek apod. Nezávisle na typu kontraktu (jedná se o názor a praktickou zkušenost autora disertační práce) by měly být v nabídce specifikovány rychlosti postupu ražby v jednotlivých třídách.

Rychlost postupu ražby je obvykle specifikována a) v metrech za kalendářní den nebo b) metrech za pracovní den, tj. ve dnech, kdy probíhají ražby. Specifikace dle b) je vhodnější spolu s uvedením tzv. nepracovních dnů předpokládaných po dobu výstavby. V některých případech se používá speciální vztažný čas, podrobnosti viz kapitola 7.3. Rychlost postupu ražeb se specifikuje a) pro plný profil výrubu a/nebo b) pro jednotlivé části profilu výrubu, tj. např. kalota / opěří / počva. Vhodnější je samozřejmě uvést rychlost ražeb současně dle a) i b), přičemž rychlost ražeb v případě b) může být specifikována jako procentuální část rychlosti dle a). Platí, že tyto rychlosti postupu by měly být specifikované pro jednotlivé třídy ražby.

Fáze provádění ražby

V souvislosti s třídami ražby je ve fázi realizace nutno provádět zejména následující kroky:

- Mapování horninového masivu pro každou čelbu u konvenčního způsobu ražby; povrchu neboli obálky výrubu v celé délce ražby u způsobu ražby za pomocí TBM otevřeného typu do skalních hornin (viz příloha 14); rubaniny u typu ražby za pomocí EPBM. V případě ražeb za pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů může docházet pouze ke sporadickému mapování čeleb z důvodu obtížného přístupu přes řeznou hlavu. U ražeb za pomocí EPBM je navíc povrch neboli obálka výrubu plně nepřístupná pro mapování z důvodu instalace ostění pod ochranou ocelového štítového pláště.

- Problematika měření a vyhodnocování vývoje deformací ostění je obecně známá. V praxi probíhá nebo probíhalo sledování deformací a jejich vyhodnocování více či méně úspěšně. Vyhodnocování deformací se v praxi nejčastěji používá pro sledování toho, zda jsou překročeny limitní deformační meze a zda je tak třeba provést opatření k zajištění stability výrubu. O poznání méně se vyhodnocování deformací používá v souvislosti s třídami ražby a optimalizací jejich horninové výztuže, profilu výrubu a deformačních tolerancí.

- Vyhodnocování podmínek horninového masivu a určování třídy ražby a to nejen na základě stanovení obvyklých geotechnických parametrů, ale i vyhodnocování krátkodobého a dlouhodobého chování horninového masivu. Zadání a smlouva o dílo musí obsahovat specifikace metody určování tříd ražby. Tato problematika není v praxi často dobře zohledněna.

- Stanovení délky dalšího záběru u konvenčního typu ražby, případně při výskytu obtížných geotechnických podmínek i u typu ražby za pomocí TBM otevřeného typu. Se stanovením délky záběru souvisí níže uvedený praktický Př. 8.

Př. 8 Vhodné stanovení délky záběru

Na projektu konvenční ražby tunelů probíhalo mapování geologických podmínek každé čelby. Mapování bylo prováděno v časovém rozmezí do cca 20 minut a to nejčastěji od okamžiku ukončení profilace výrubu do okamžiku začátku instalace horninové výztuže. Provádění geologického mapování takovým způsobem je v praxi poměrně časté. V průběhu daného konkrétního mapování čelby nedošlo k žádným projevům nestability horninového masivu a tento byl shledán vhodným pro pokračování ražby při stávající délce záběru 1,2 m.

Instalace primárního ostění – stříkaného betonu, ocelových sítí a rámu trvala cca 100 minut. V průběhu této doby však postupně docházelo k opadávání počáteční vrstvy stříkaného betonu spolu s horninou tak, že v momentě, kdy se měly instalovat ocelové sítě, byl v klenbě nadvýlom cca 80 cm, který se propagoval za druhou řadu jehel. V daném případě se zhotovitel rozhodl dokončit instalaci sítí, což obnášelo riziko úrazu, a poté sanovat nadvýlom.

Závěry týkající se délky budoucího záběru provedené na základě tohoto mapování byly nedostatečné, protože horninový masiv projevoval tendenci k tvorbě významných nadvýlomů v intervalu desítek minut a to i přes skutečnost, že bylo provedeno předstihové opatření v podobě nainstalovaných deštníků z jehel.

Na daném projektu si však zhotovitel přizval externí konzultantskou společnost za účelem optimalizace ražeb. Geotechnici této společnosti vyhodnocovali kvalitu horninového masivu nejen z jeho stavu při geologickém mapování čelby, ale zejména z jeho chování a projevů v klenbě (na pozici mezi 10 a 2 hodinou) a horní části čela čelby a to i při činnostech jako např.:

- a) profilování a začišťování výrubu, kdy lze získat velmi cenné informace o chování masivu, který reaguje na nárazy impaktoru nebo lžíce stroje
- b) vrtání čelby pro trhací práce (moderní stroje umožňují analýzu dat jako např. o počtu, směru a délky vrtů, čisté penetrační rychlosti, velikosti přítlaku apod.); sledováním výplachu při vrtání a rychlosti penetrace, případně geotechnik přímo na místě instruoval předvrt(y) za účelem zjištění kvality horninového masivu a možných přítoků podzemní vody z předpolí čelby
- c) chování horninového masivu při aplikaci stříkaného betonu – opadává horninový masiv a z jakého důvodu (geologie, způsob nástřiku apod.)?
- d) chování horninového masivu při činnosti vrtání, nabíjení a instalace svorníků – došlo k vyjetí bloku horniny z čelby, projevu nestability, jak se chová horninový masiv v okolí vrtů – zasypávají se?
- e) atd.

A dále po instalaci horninové výztuže z vyhodnocení měřených deformací (rychlost, tendence, velikost) a určování důvodů (vliv geologie, probíhajících prací v okolí místa, zhoršená kvalita instalované výztuže, nadvýlomy, odvodnění atd.). Pokud by se výše uvedené kroky měly provádět důsledně, tak by se jednalo o velmi časově náročné pozorování. Nicméně toto lze částečně nahradit aktivním sdílením zkušeností s jednotlivými pracovními posádkami. Uvedené informace byly sdíleny pomocí softwaru [1].

Vzhledem k výše uvedenému bylo možné v řadě případů, kdy byly provedeny alespoň některé kroky vyhodnocující krátkodobé chování horninového masivu, predikovat jeho chování v b příštím záběru a přijímat opatření v podobě např. zkrácení délky záběrů. Toto se v praxi na daném projektu velmi často odehrávalo – jako např. poznání změn v tendenci horninového masivu k tvorbě nadvýlomů již při sledování v průběhu profilování klenby. Ačkoli se jedná o čas, kdy je na čelbě velmi prašné prostředí a pohybuje se zde těžká mechanizace, bývají informace takto získané velmi cenné.

Určování tříd ražby na projektu ve skutečnosti probíhalo na základě shody tří osob – geologa z geomonitoringu, stavbyvedoucího za zhotovitele a konzultanta zhotovitele, kterého si zhotovitel najal jako nezávislého experta mimo jiné i za účelem zatřiďování. V praxi poté probíhalo zatřiďování

konkrétně tak, že konzultant prováděl vlastní vyhodnocení podmínek, při kterém bral do úvahy jak geotechnické, tak i jiné aspekty ražeb. Současně konzultoval případné rozhodnutí o změně třídy nebo délky záběru se stavbyvedoucím, který do rozhodovacího mechanismu přispíval zejména vstupy týkajících se hledisek technologických, pracovních apod. Toto uspořádání a mechanismus rozhodování při zatřiďování se na daném projektu prokázaly jako velmi přínosné a významně přispěly k redukci nákladů a zvýšení bezpečnosti prací při ražbě.

Níže je uvedeno několik dalších vybraných podmínek, které mohou vstupovat do procesu určování optimální třídy ražby a délky záběru:

- Posouzení vlivu trvání činností / prostojů na dobu, při které je výrub nezajištěn. To má přímou souvislost i se stanovením délky záběru - viz Př. 8 a propagace nadvýlomu v průběhu 1,5 hodiny po otevření záběru. Jak by tato propagace nadvýlomu vypadala v případě projektů, kde odtěžování trvá mnoho hodin (viz Př. 10)?

- Zvážení dostupnosti jednotlivých prvků horninové výztuže, kvality jejich instalace a jejich efektivnost v daném prostředí. Např. použití vhodných, kvalitních ale relativně finančně nákladných materiálů umožňuje prodloužení délky záběrů [66], [67].

- Zvážení technologických aspektů souvisejících se strojním vybavením, zkušenosti a kvality pracovního personálu a bezpečnostních aspektů.

- Flexibilita úpravy specifikace horninové výztuže a/nebo délky výrubu ve třídě ražby.

- Zvážení ceny výstavby, vliv ziskovosti zhotovitele v jednotlivých třídách ražby apod.

- atd.

Rozbor problematiky tříd ražeb, jejich určování (zatřiďování) a stanovení délky budoucího záběru je uveden v kapitole 9.

4.5 Supervize na tunelových projektech

Supervize je běžným nástrojem kontroly a případně i řízení realizace tunelových staveb. Místní podmínky, zvyklosti, předpisy a způsoby zadání tunelového projektu tuto činnost modifikují a přizpůsobují požadavkům konkrétních projektů. Ačkoli je supervize a její úloha při výstavbě podzemních děl ve světě poměrně dobře zavedena, tak v ČR je, nebo alespoň donedávna byla, situace o poznání horší. Autor disertační práce napsal na toto téma několik článků, viz např. „Přínos supervize na tunelových stavbách a software k jejich provádění a vyhodnocování“ [11]. Kapitola 10 je proto věnována úlohám supervize při výstavbě podzemních děl.

Úkoly supervize jsou definovány smlouvou s objednatelem, a mohou spočívat zejména v následujících činnostech [9]:

- kontrola kvantity a kvality prováděných stavebních prací,
- zatřiďování a geologické mapování,
- vyhodnocování ražeb, rychlosti postupu a činností a prostojů,
- připomínkování a schvalování technologických postupů a další dokumentace,
- návrh a schvalování úprav/změn projektové dokumentace, modifikace horninové výztuže, výjimečně projektování,
- finanční záležitosti, řešení „claimů“ (vícenároků) zhotovitele,
- kvazi-arbitr mezi objednatelem a zhotovitelem,
- kontrola bezpečnosti a vlivu stavby na životní prostředí,
- zajišťování úzké a profesionální spolupráce účastníků výstavby,
- atd.

Úkoly supervize tunelových staveb jsou obvykle odlišné podle typu kontraktu. V praxi existují dva základní typy kontraktů neboli vzory smluvních podmínek, které se nejčastěji používají v podzemním stavitelství – tzv. „červený FIDIC“ a „žlutý FIDIC“. „Červený FIDIC“ [81] představuje smluvní podmínky pro projekty typu DBB (Design-Bid-Build, tj. naprojektuj–nabídni–postav), kde se měří skutečně provedené práce při použití v podstatě neměnných jednotkových cen. Při takovém uspořádání má objednatel a jeho zástupce na stavbě (supervize) větší podíl na rozhodovacích a schvalovacích procesech při provádění ražeb. „Žlutý FIDIC“ [82] jsou smluvní podmínky pro projekty typu DB (Design-Build, tj. naprojektuj–postav), kde by celková stanovená cena měla být cenou konečnou. Praxe ukazuje, že tomu tak není a že i v případech žlutého FIDICu je nutné ražby podrobně sledovat a vyhodnocovat [11].

V současnosti je v přípravě FIDIC pro podzemní stavby (FIDIC Book for Undeground Works), u kterého se očekává vydání kolem roku 2020 [80].

Vyhodnocování činností a prostojů při skutečné ražbě a jejich porovnávání s původními nabídkovými předpoklady je jednou ze základních činností zhotovitele a supervize, resp. mělo by být. Ačkoli prvotní představa je často taková, že se jedná o jednoduchý úkol, tak ve skutečnosti se jedná o úkol velmi náročný.

Důvodem jsou často komplikovaná smluvní ujednání, která činí způsob porovnání nabídkových a skutečných hodnot složitějším. K náročnosti dále přispívá značné množství dat, která je třeba pravidelně a kvalitně zpracovávat. Bez pomoci speciálního softwaru není možné výše uvedený úkol efektivně a spolehlivě splnit. Někdy dojde k přecenění skutečných

kvalit a motivace zhotovitele a/nebo podcenění stavu personálu supervize a/nebo ke snaze objednatele ušetřit náklady za supervizi. Výsledkem může být výrazné zpoždění harmonogramu celého projektu a nárůst nákladů za výstavbu díla včetně ceny za pozdější uvedení celého projektu do provozu.

4.6 Používané softwarové aplikace

Analýza dat z reálných projektů je možná jen za předpokladu využití počítačových nástrojů. Pro sledování a vyhodnocování dané problematiky zatím ve světě neexistuje univerzální software. V rámci jednoho tunelového projektu se přitom často jedná minimálně o stovky tisíc až případně stovky miliónů jednotlivých záznamů (např. v případě kontinuálního sledování parametrů ražby pomocí tunelovacích strojů). Tato data je třeba zaznamenávat automaticky a/nebo manuálně a následně vyhodnocovat v průběhu ražeb. Některá z těchto dat budou v další části práce specifikována spolu s popisem jejich sledování a vyhodnocení.

Ještě v nedávné minulosti bylo zaznamenávání dat možné pouze za použití jednodušších softwarových aplikací typu tabulkových procesorů jako např. Excel, textových editorů jako např. Word apod. Tyto aplikace mají pouze omezenou kapacitu pro zadávání dat, neumožňují spolehlivé sdílení dat mezi více uživateli, dochází k chybám na vstupu dat, kdy tato nemusí být nutně konzistentně zadávána a jednotlivé typy dat (obrázky, texty, číselné údaje atd.) je nutné často zadávat do oddělených aplikací. Vyhodnocení takovýchto dat je potom obtížnější, časově náročnější a méně kvalitní.

Pro použití na tunelových projektech jsou vhodnější databázové relační aplikace, které data provazují a zamezují jejich zdvojování. Dříve byly používané aplikace naprogramované např. v prostředí MS Access s použitím VBA. Tyto aplikace již např. umožňují lepší kontrolu správnosti zadávaných dat, vložení rozsáhlého množství dat atd. Ačkoli bylo relativně jednodušší takové aplikace naprogramovat, tak jejich správa byla náročnější a zejména měly omezený dálkový přístup a sdílení dat mezi uživateli.

V současnosti musí moderní softwarové aplikace umožňovat on-line přístup uživatelů, kteří mají přidělená detailně specifikovaná oprávnění pro práci v aplikaci. Jedná se o řešení klient–server, kdy klientská část se stará o interakci s uživatelem a serverová část o zpracování dat. Aplikace umožňují shromažďovat množství dat různých typů, které dostačuje potřebám jednotlivých projektů. Tvorba takovýchto komplexních aplikací je však velmi náročná a vyžaduje týmovou spolupráci.

V dnešní době jsou k dispozici moderní softwarové aplikace sloužící k monitorování určitých částí výstavby podzemních děl. Za účelem zjištění současného stavu autor disertační práce provedl šetření, při kterém nashromáždil údaje o cca 50 softwarových aplikacích. Přehled působnosti několika vybraných softwarových aplikací je uveden v Tab. 4.6.

Tab. 4.6 Vybrané softwarové aplikace se seznamem činností, které pokrývají. A – ano, pokrývají činnost, --- – nepokrývají činnost, X – obsaženo v předchozí formě softwaru nebo ve vývoji.

Název softwaru	Moduly softwaru (vlastnosti/oblasti)															
	Supervize	Stavební deník	Činnosti a prostoje	Statistiky	Harmonogram	Úložiště dokumentů	Horninová výztuž	Geologické mapování	Staveništní korespondence (Instrukce, listy závad, dopisy apod.)	Fotogalerie	Injektáže	Zkoušky	Geodet, zaměření stavby	Monitoring deformací	Parametry tunelovacích strojů	Správa projektové dokumentace
AriGATAYA	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	**A**	---	**A**	---
Barab	---	---	---	---	---	**A**	---	---	---	---	---	---	---	**A**	---	---
Congrid	---	**A**	---	---	---	---	---	---	---	**A**	---	---	---	---	---	---
Cubula	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	**A**	**A**	---	---
Iris	---	---	**A**	---	---	**A**	---	---	---	---	---	---	**A**	---	**A**	---
Kronos	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	**A**	**A**	---	---
Mission OS	**A**	**A**	**A**	**A**	---	**A**	---	**A**	---	**A**	---	**A**	**A**	**A**	**A**	---
SISO	**A**	**A**	**A**	**A**	---	**A**	**A**	**A**	**A**	**A**	---	---	---	**A**	**A**	**A**
Site Diary	---	**A**	---	---	---	---	---	---	---	**A**	---	---	---	---	---	---
Tauros	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	**A**	---
TIM	**A**	---	**A**	**A**	**A**	---	---	**A**	---	---	---	**A**	---	---	---	---
TIMS	**A**	---	**A**	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Tunnel Monitor	---	---	---	---	---	---	---	**A**	---	---	---	---	---	**A**	---	---
Tunnel Supervision	**A**	**A**	**A**	**A**	X	**A**	X	X	**A**	---	X	X	---	---	X	---

Softwarové aplikace týkající se provádění ražeb tunelů mají různý rozsah působnosti. Výsledkem provedeného studia je zjištění, že existuje jen několik málo softwarových aplikací, které mají větší přesah působnosti týkající se souhrnného monitoringu ražeb, jejich vyhodnocení a optimalizaci.

Použití moderních databázových aplikací umožňuje účastníkům výstavby získat data v podobě, která umožňuje jejich vyhodnocení. Vzhledem k tomu, že se často jedná o data související s náklady výstavby, měl by Objednatel vyžadovat použití moderních softwarových aplikací již při tvorbě zadávací dokumentace. Databanku informací lze využít i později v případě určování příčin závad na díle, jejich oprav apod.

4.7 Podmínky stavby

Nazvěme podmínkami stavby nějaké zobecněné skutečnosti nebo události, které formují návrh, soutěž, smluvní podmínky a výstavbu podzemního díla. Podmínky stavby mají konkrétní vliv na jednotlivé činnosti ražby a na prostoje. Dochází ke změně produktivit činností, nejčastěji k jejich snížení, oproti nabídkovým hodnotám, mající vliv na rychlost postupu ražby a harmonogram výstavby celého projektu. Podmínky stavby, které jsou uvažovány v nabídce, jsou zřídkakdy (*)[3] shodné se skutečnými podmínkami stavby resp. vlivy. Podmínky stavby, jejich vlivy a činnosti jsou ve zkratce znázorněny níže v diagramu na Obr. 4.18.

Na Obr. 4.15 je vidět případ, kdy zhotovitel používal ocelové platformy pro manuální vrtání čelby a instalaci svorníků namísto použití vrtné soupravy, specifikované v jeho nabídce. Ačkoli z hlediska trvání samotné činnosti vrtání pro odstřel toto řešení nepředstavovalo zdržení, tak z hlediska kvality trhacích prací a instalované výztuže ano. To mělo v důsledku negativní vliv na trvání dalších činností. Jednalo se o projekt Neelum-Jhelum v pákistánské části Kašmíru, viz Příloha 2, který v průběhu výstavby trpěl řadou negativních podmínek stavby, uvedenými v diagramu na Obr. 4.15.

Obr. 4.15 Podmínky stavby – nepoužití smluvní mechanizace - vrtání čelby z rigidních platforem, projekt Neelum-Jhelum, Příloha 3.

Dostupnost některých tunelů na projektu Melamchi v Nepálu, viz Příloha 2, byla komplikována z důvodu častých záplav, svahových sesuvů a skalních zřícení. V létě 2010 došlo k zatopení tunelu z důvodu svahového sesuvu na 2 km vzdálené stavbě silnice.

[3] Pozn.: Na každém z projektů, kterých se autor disertační práce zúčastnil, byla ražba ovlivněna podmínkami stavby. Na některých projektech se jednalo takřka o nepřetržité působení řady negativních podmínek stavby. Níže jsou uvedeny některé případy.

Svahový sesuv byl inicializován kombinací podmínek – a) stavba silnice v nezajištěném zářezu, b) silné dlouhotrvající monzunové deště. Při této mimořádné události došlo k nenadálému utržení svahu hory o rozměrech cca 200 x 300 m. Masa materiálu byla rychle transportována korytem potoka, který v té době připomínal řeku, až před portál tunelu, kde vytvořila přehradu. Voda, nemajíc možnost volného průtoku, zaplavila tunel a staveniště, viz Obr. 4.16. Jedním z důsledků bylo zničení některé mechanizace a materiálů a nutnost přestavby okolí portálu. Rychlost postupu ražby byla negativně ovlivněna po několik následujících měsíců. Daný projekt byl tak bohatý na mimořádné události – svahové sesuvy, záplavy, zemětřesení atd. – že se de facto jednalo o události běžné.

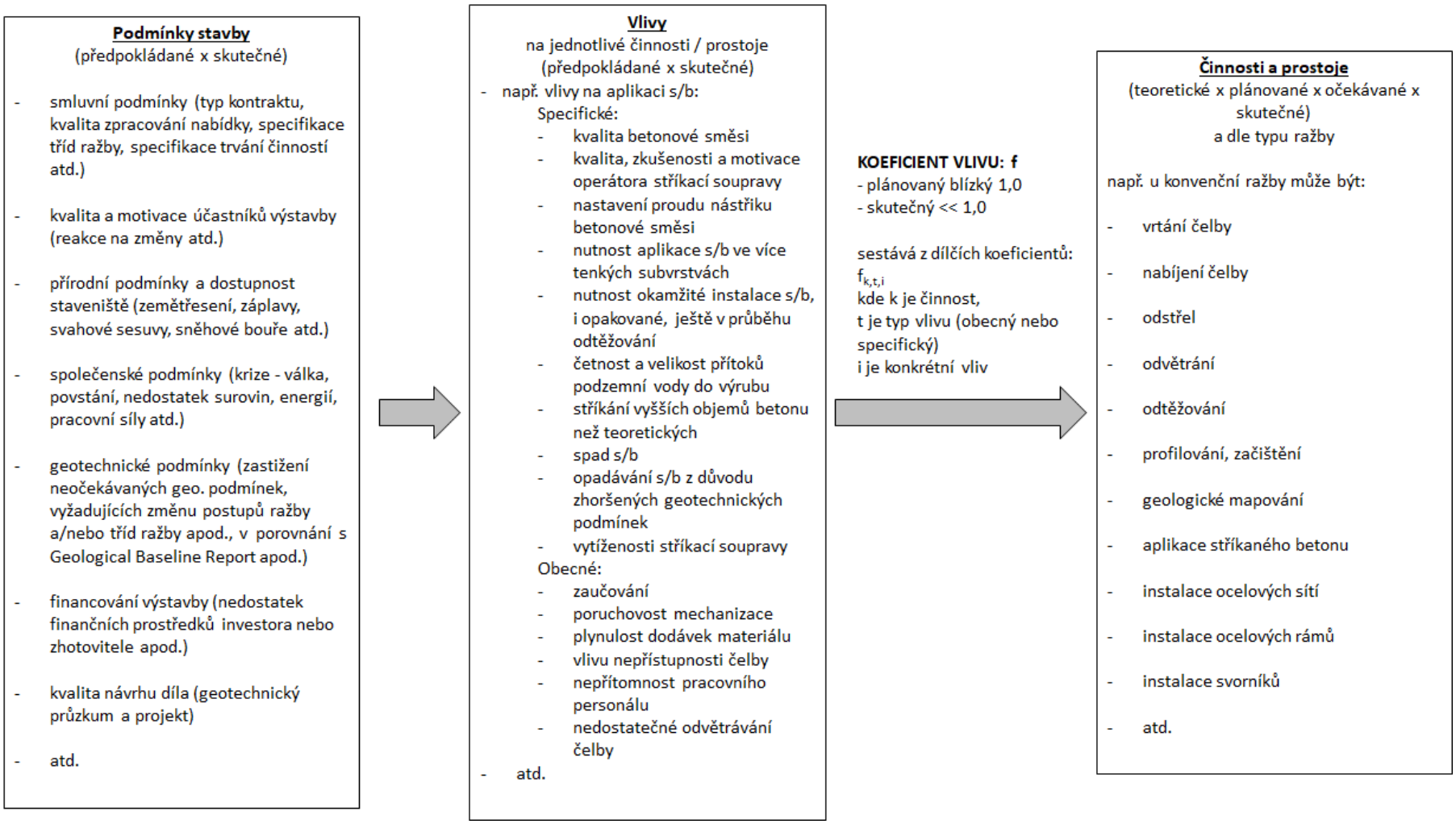
Obr. 4.16 Podmínky stavby – svahové sesuvy - zatopení tunelu a staveniště, projekt Melamchi, Příloha 2.

Velikost a četnost přítoků podzemní vody při ražbě 48 km dlouhého přivaděče výrazně převýšily předpoklady. Jednalo se o projekt výstavby podzemní hydroelektrárny Kárahnjúkar v severovýchodní části Islandu, viz Příloha 1. Důsledkem nebylo pouze obtížné provádění mapování geologických podmínek (Obr. 4.17 vlevo), ale i dopad na trvání řady činností. Často zatopená počva jak na tunelovacím stroji (Obr. 4.17 vpravo), tak v celé délce tunelu významně komplikovala dopravu a tudíž dostupnost materiálů a personálu na čelbě. Časově zdlouhavé před a post injektáže rovněž přispěly k prodloužení doby výstavby. Instalace horninové výztuže, zejména stříkaného betonu, se v místech se zvýšenými přítoky vody prováděla v několika fázích. Jedno ze tří TBM bylo v důsledku vyšších přítoků nuceno zastavit ražbu, aby posléze bylo přemístěno na ražbu jiného úseku. U druhého TBM došlo v důsledku kombinace nestabilního materiálu před čelbou a vysokých přítoků podzemní vody k vyplavení tohoto materiálu do prostoru TBM a vytvoření rozsáhlé kaverny. Překonání pouze tohoto několik desítek metrů dlouhého problematického úseku trvalo tři měsíce.

Obr. 4.17 Přítoky podzemní vody do výrubu při ražbě TBM otevřeného typu a často zatopená počva, projekt Kárahnjúkar, Příloha 1.

V průběhu léta 2015 docházelo při vrtání čeleb na projektu Považský Chlmec, viz Příloha 4, k častým výpadkům dodávek elektrické energie. Vrtání čelby pro odstřel zabralo v těchto případech i více než 5 hodin na jeden záběr. Důvodem bylo přehřívání naftových generátorů. Projekt byl koncipován tak, že dodávka elektrické energie měla být původně zajištěna z rozvodné sítě, avšak realita (podmínky stavby) byla jiná. Aby mohly začít ražby, zhotovitel instaloval generátory, které se však v průběhu výjimečně horkého léta přehřívaly. Důsledkem bylo zpomalení ražeb na 4 čelbách.

V zajímavých příkladech by se nechalo dlouze pokračovat. Negativní podmínky stavby, často působící v kombinaci, představují při výstavbě tunelů skutečné výzvy. Jedním z důležitých atributů podmínek stavby je stanovení jejich uznatelnosti, tj. kdo zaplatí vzniklé vícenáklady (objednatel x zhotovitel). Dalším atributem je kvantifikace jednotlivých vlivů a doby jejich působení. S řešením těchto otázek pomáhá obvykle supervize, která, aby mohla tyto otázky spolehlivě zodpovědět, se neobejde bez kvalitních údajů z ražby podzemního díla, zaznamenaných v celém čase výstavby.

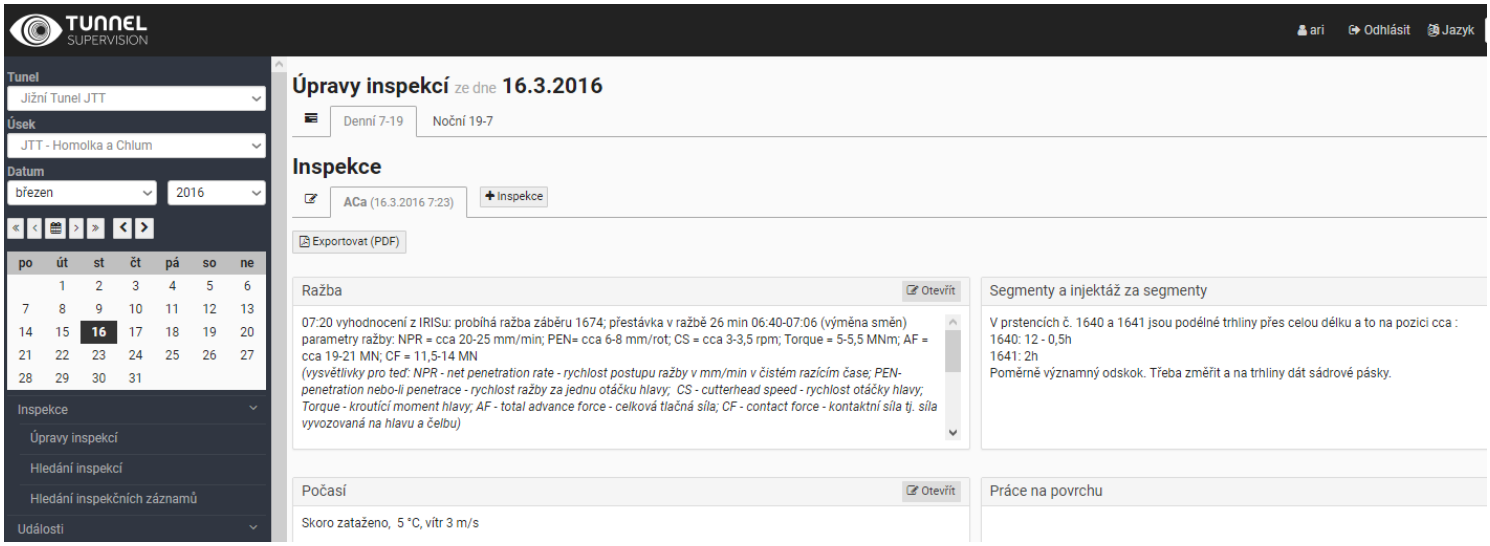


Obr. 4.18 Podmínky stavby a jejich vliv na ražbu.

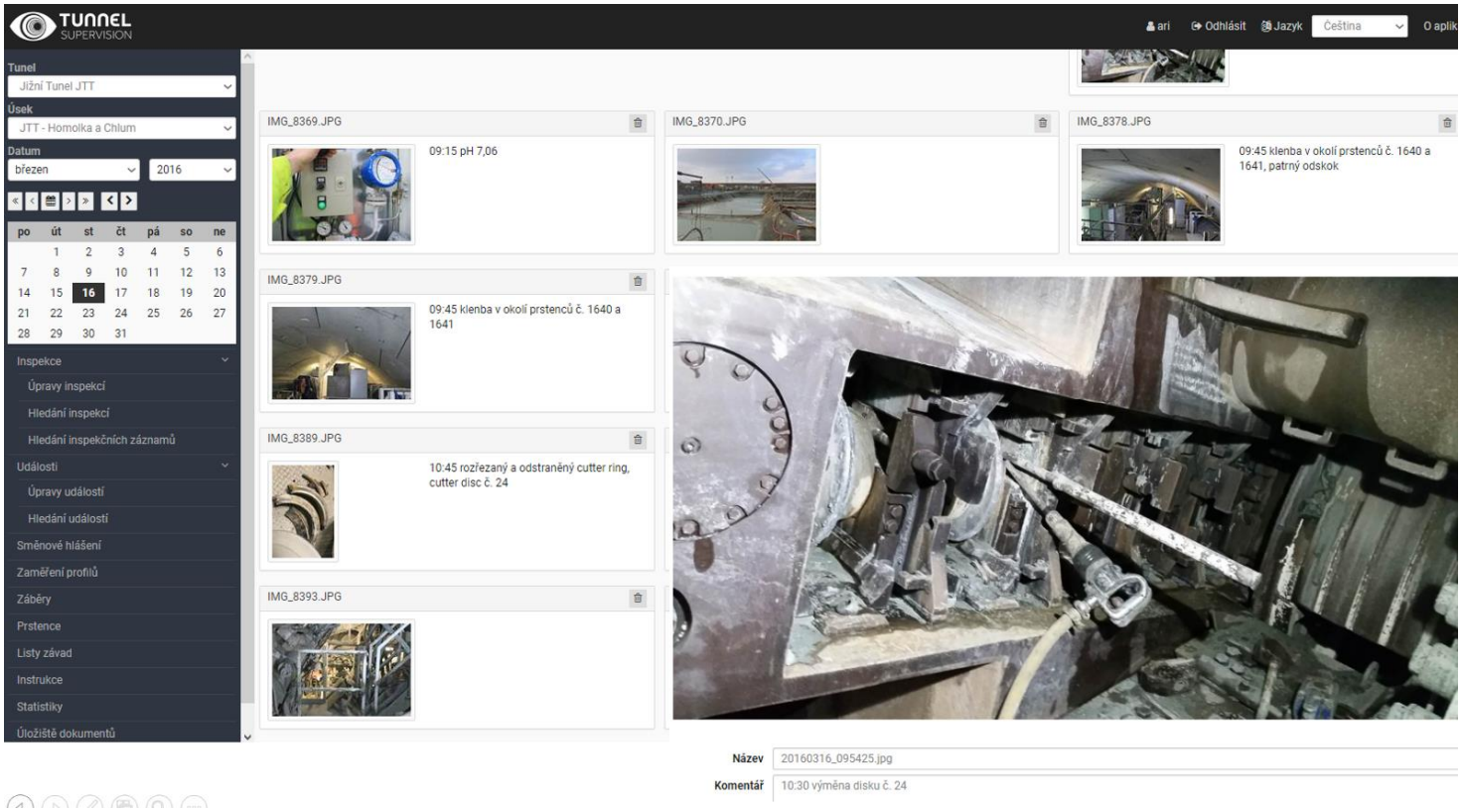
5 Softwarová aplikace Tunnel Supervision

V průběhu výstavby je nutné data týkající se ražeb vhodným způsobem a na vhodném místě shromažďovat pro následné potřeby různých analýz, porovnání apod. Nejčastěji se jedná o následující údaje:

- postupy ražeb – staničení čelby, tunelovacího stroje, horninové výztuže v čase,
- geologické mapování,
- data o zatřídění, třídy ražby,
- data o skutečně použité a instruované horninové výztuži,
- údaje o kvalitě provedených prací,
- monitoring deformací, hydrogeologických podmínek apod.,
- výsledky materiálových a dalších zkoušek,
- údaje z předvrtů,
- činnosti a prostoje při ražbách na jednotlivých čelbách zaznamenané v souvislém čase,
- pracovní charakteristiky tunelovacích strojů nebo případně použité strojní vybavení,
- vydané instrukce a listy závad, korespondence mezi účastníky výstavby,
- zápisy z jednání,
- reporty o postupech ražeb a jiné reporty,
- projektová dokumentace a její aktualizace, tj. platné verze,
- technologické postupy apod.,
- inspekční zápisy (viz Obr. 5.1),
- fotografická dokumentace (viz Obr. 5.2),
- a řada dalších údajů.



Obr. 5.1 Ukázka části inspekčního zápisu z ražby tunelovacím strojem. Strukturovaná forma zápisu do cca 20 předem definovaných polí zvyšuje kvalitu popisu a jeho přehlednost. Možnost jednoduché a rychlé dohledatelnosti údajů.



Obr. 5.2 Ukázka části inspekčního zápisu s fotodokumentací a jejím popisem.

Za tímto účelem je vhodné použít specializovaný software. Příkladem takového softwaru je aplikace Tunnel Supervision [1], která byla a je používána na tunelových projektech. Vyšší verzi této aplikace je možné používat on-line a umožnit tak určitým způsobem sdílení vybraných dat (většiny z výše uvedeného seznamu) účastníkům výstavby. Podle přiděleného oprávnění se v záznamech dá vyhledávat, data se mohou prohlížet anebo vytvářet a upravovat a dále lze nad daty automaticky provádět vybrané analýzy a tisknout reporty.

Na Obr. 5.3 je uvedeno vyhodnocení činností a prostojů při ražbě 8,5 km dlouhého tunelu pomocí tunelovacího stroje TBM průměru 7,6 m. Spolu s tím byly porovnány očekávané a skutečné hodnoty:

1) čisté razící rychlosti NPR 2,89 x 3,28 m/h,
2) utilizace TBM (UF) 37,96 % x 32,33 %,
3) průměrných denních postupů 26,36 m/d x 25,23 m/d,
4) celkového času trvání ražby 322,51 dne x 336,90 dne.

Toto vše je vyhodnocováno při uvážení smluvních podmínek, kdy bylo zasmluvněno, že počáteční úsek ražby v délce cca 0,5 km bude ražen s 50% hodnotami UF z důvodu zaškolování posádky a stroje a s limitováním časového trvání realizace předvrtů na 2 hodiny denně. UF byl ještě posuzován zvlášť, při uvážení 2-hodinového střídání směn v každém dnu.

PRODUCTION & UTILISATION - TBM

Between dates: 29/3/2007 - 9/4/2008
Between chainages: 12+962.50 - 4+462.50
Length: 8,500.00 m

Actual Production & Utilisation

	statistics w/o Holidays and Sundays' Downtimes
first day	29/03/2007
last day	09/04/2008
days	336.90
advance (m)	8500
daily advance (m/day)	25.23
	percentages:
boring time (24h utilization)	32.07
24h - probing time utilisation	32.33
net penetration (m/hr)	3.28
	percentages:
total delays	67.93
re-grip	3.76
support	22.71
Cutter check	1.29
Cutter change	2.87
Cutter cleaning	0.13
TBM break&main totaly	14.09
- TBM maintenance	6.94
- TBM mechanical breakdown	6.24
- TBM electrical breakdown	0.91
BUS Repairs	0.21
Tunnel Conveyor totaly	13.28
- Tunnel Conveyor Install	3.84
- Tunnel Conveyor Repairs	9.44
Service Extension	1.11
Other	3.40
Probing	0.90
Down&Holidays Totaly	4.18
- Downtime	4.18
- Holiday	0.00

Description:
The actual utilisation of 32.33 % for the entire Jökulsá tunnel is less than the expected 37.96 %. Actual net penetration rate of 3.28 m/hr is higher in comparison to the expected net penetration rate of 2.89 m/hr for the entire Jökulsá tunnel. Actual time which the contractor spent working is 336.90 days in comparison to the expected time of 322.51 days in which the contractor was supposed to complete the Jökulsá tunnel. The reason that the contractor finished the tunnel in 14.39 days behind of the planned progress was mainly time extensive rock supporting and tunnel conveyor repairs. The best performance data for the Jökulsá tunnel are listed here.
Max day advance was 115.66 m on 23/8/2007 which was the new world record. Average day advance was 25.23 m per working day. Max week advance was 428.81 m in 37/2007. Max month advance was 1064.76 m in September 2007.

Comments:
The **Actual P&U** statistics are based on time ignoring Holidays and Downtimes on Sundays. The so called "24h-probing time utilisation" is based on the total time ignoring Holidays, Downtimes on Sundays and also actual probing time (which is taken as expected max number of hours of probing per day according the Contract).
The calculation of the **Expected P&U** statistics is based on the actual Excavation & Bore Classes partition and expected net penetration rates NPR. The learning factor LF is indluded in the calculation. The probing time is taken as actual but to the limit of 9.09 % time per day as stated in the Contract.

days: 336.9 x 322.51
m/day: 25.23 x 26.36
%: 32.33 x 37.96
m/hr: 3.28 x 2.89

Expected Production & Utilisation

	statistics with Actual Probing Time as max Day Expected Probing Time
Expected "Working" Total Time (days)	322.51
advance (m)	8500
Expected Daily Advance (m/day)	26.36
	percentages:
Expected boring time (24h utilization)	37.96
Expected net penetration (m/hr)	2.89
	percentages:
Expected total delays	62.04
Expected Regripping	6.16
Expected Support	15.39
Expected Cutter Time	6.69
Expected Repair TBM	8.44
Expected Repair Back-up	5.11
Expected Utilities Extension	6.66
Actual Probe Hole as max Day Expected Probing	0.82
Expected Other	12.77

Page 1

Actual Production & Utilisation Pie Chart

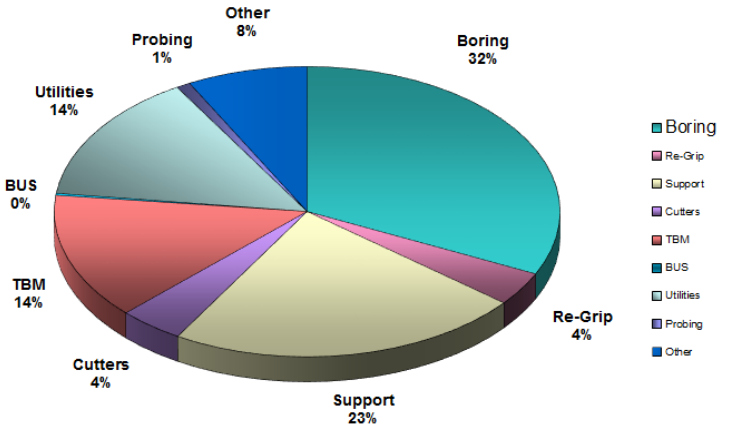


chart shows statistics w/o Holidays and Sunday's Downtimes based on a 24 h day

Cutters = Cutter Change + Cutter Check
TBM = TBM Maintenance + TBM Mech. Breakdown + TBM Elec. Breakdown
Utilities = Conveyor Install + Conveyor Repairs + Service Extension
Other = Cutter Cleaning + Downtime + Other + Holiday
Probing Time also includes time for Coring
Grouting Acitvities are under Other

Expected Production & Utilisation Pie Chart

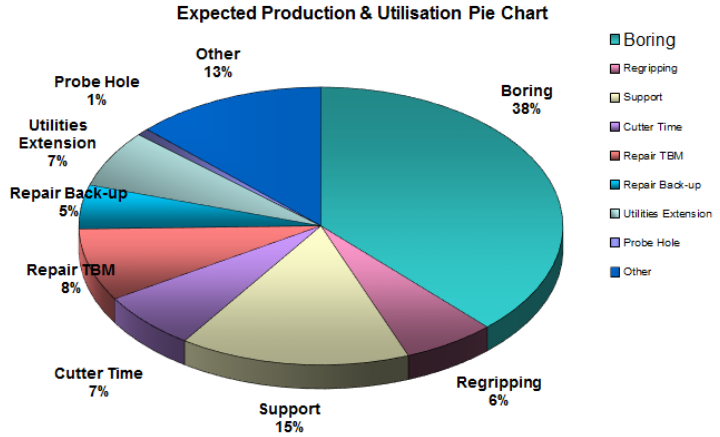
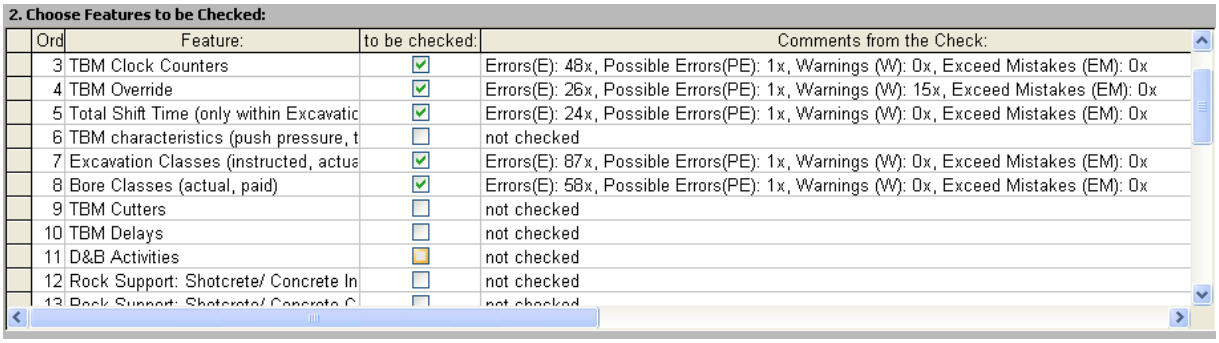


chart shows statistics with Actual Probing Time as max Day Expected Probing Time based on a 24 h day

Obr. 5.3 Porovnání očekávaných a skutečných hodnot činností a prostojů při ražbě pomocí TBM; využití stroje UF; průměrný denní postup; čistá penetrační rychlost, projekt Kárahnjúkar (příloha 1 a [8]).

Autor této práce se podílel na supervizi podzemních děl, viz přílohy 1 až 5. Z těchto projektů autor shromáždil data o ražbách tunelů, která použil pro tuto disertační práci. Vzhledem k množství potřebných dat, kdy např. jeden tunelový projekt může obsahovat až několik stovek tisíc záznamů, týkajících se událostí, je vhodné provádět kontrolu jejich správnosti. Software Tunnel Supervision umožňuje podrobné zaznamenávání činností a prostojů při ražbách spolu s automatickou kontrolou správnosti zadávaných dat. Na Obr. 5.4 je výpis z kontroly správnosti dat. Na základě správně zaznamenaných a utříděných dat je potom následně možné provádět analýzy a predikce, které jsou uvedené v dalších kapitolách.



2. Choose Features to be Checked:

Ord	Feature:	to be checked:	Comments from the Check:
3	TBM Clock Counters	☑	Errors(E): 48x, Possible Errors(PE): 1x, Warnings (W): 0x, Exceed Mistakes (EM): 0x
4	TBM Override	☑	Errors(E): 26x, Possible Errors(PE): 1x, Warnings (W): 15x, Exceed Mistakes (EM): 0x
5	Total Shift Time (only within Excavatic	☑	Errors(E): 24x, Possible Errors(PE): 1x, Warnings (W): 0x, Exceed Mistakes (EM): 0x
6	TBM characteristics (push pressure, t	☐	not checked
7	Excavation Classes (instructed, actua	☑	Errors(E): 87x, Possible Errors(PE): 1x, Warnings (W): 0x, Exceed Mistakes (EM): 0x
8	Bore Classes (actual, paid)	☑	Errors(E): 58x, Possible Errors(PE): 1x, Warnings (W): 0x, Exceed Mistakes (EM): 0x
9	TBM Cutters	☐	not checked
10	TBM Delays	☐	not checked
11	D&B Activities	☐	not checked
12	Rock Support: Shotcrete/ Concrete In	☐	not checked
13	Rock Support: Shotcrete/ Concrete C	☐	not checked

Obr. 5.4 Ukázka výpisu kontroly správnosti dat.

Analýzy provedené za pomocí aplikace Tunnel Supervision jsou součástí této disertační práce. V současnosti lze pomocí aplikace Tunnel Supervision automaticky provádět následující hlavní analýzy:

- analýza činností a prostojů,
- analýza tříd ražby
- atd.

Samotná aplikace Tunnel Supervision je významným produktem disertační práce. Autor pracoval na jejím vývoji řadu let a podoba a možnosti aplikace byly uzpůsobovány jak potřebám jednotlivých projektů, tak potřebám disertační práce. Vzhledem k rozsahu disertační práce byly popis aplikace a historie jejího vývoje umístěny do přílohy 7. Další podrobnosti lze najít na informačních webových stránkách aplikace www.tunnelsupervision.com [1].

Cíle

Autorovým cílem bylo vyvinout softwarovou on-line aplikaci umožňující sledování a vyhodnocování ražeb podzemních objektů. Tento cíl se podařilo splnit. Pracovní náročnost vytvoření aplikace byla značná. Výsledkem je však software, který byl dosud nasazen v různých formách na šesti mezinárodních projektech a který je dobře připraven k zavedení pro budoucí projekty. V dalším vývoji aplikace se pokračuje.

Dalšími budoucími cíli jsou:

- nasazení aplikace Tunnel Supervision na některých budoucích tunelových projektech

- rozšíření možností aplikace např. o provádění specifických statistik, automatické denní reportování, injektáže atd.
- zkvalitnění aplikace a jejího uživatelského prostředí, např. možnost tvorby více druhů grafů, mapová část atd. V současnosti je v seznamu vedeno více než 100 podrobně definovaných úkolů.

6 Použitá teorie

6.1 Úvod

Ražba podzemních objektů probíhá cyklickým opakováním činností, ke kterým se přidávají prostoje způsobené různými vlivy. Činnosti se provádějí s různou mírou efektivity, resp. produktivity, která má vliv na jejich trvání. Produktivita jednotlivých činností a druhy a trvání prostojů se v každém záběru ve skutečnosti více nebo méně liší.

Pro skutečné produktivity a trvání činností a prostojů tak dostáváme soubor hodnot, které lze statisticky zpracovávat, viz kapitola 6.2. Je vhodné tento soubor hodnot roztřídit do skupin, resp. úseků, které mají shodné nebo alespoň velmi podobné podmínky stavby. Například nelze rovnoměrně porovnávat výkony zhotovitele, když není zajištěna spolehlivá dodávka stavebního materiálu s výkony, kdy stavební materiál je ihned dostupný na čelbě apod.

Analýzy skutečných produktivit a trvání činností a prostojů z jednotlivých projektů jsou jednak podkladem pro stanovení nabídkových, resp. plánovaných hodnot na budoucích projektech a dále jsou používány pro aktualizace predikce harmonogramu ražeb na projektech, které jsou již ve výstavbě. Predikce postupu ražeb lze učinit odborným odhadem nebo lépe v kombinaci s použitím statistických metod, viz kapitola 6.8.

6.2 Statistické zpracování a vyhodnocení vstupních dat

Náhodné proměnné X mohou nabývat mnoha různých hodnot s různou pravděpodobností. Jedná se o způsob, jak popsat výsledky náhodných procesů, jako např. měření, čísly. Tj. procesům se přiřazuji čísla a tím se kvantifikuje výsledek tak, abychom je mohli snáze matematicky analyzovat.

Náhodné veličiny X jsou dvojího typu:

1) **Diskrétní** – veličiny nabývají různých oddělených hodnot; např. zda a případně jaký prostoj nastane v příštím záběru nebo měření trvání činností a prostojů zaokrouhlené na minuty
2) **Spojité** – nabývají jakékoli hodnoty v nějakém pásmu, tj. jakákoli hodnota z nějakého intervalu; např. přesné měření trvání činností a prostojů.

Rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny X je pravidlo, kterým každému jevu popisovanému touto veličinou přiřazujeme určitou pravděpodobnost. Pravděpodobnostní rozdělení spojité náhodné veličiny je vyjádřeno funkcí **hustoty pravděpodobnosti** f(x). Celková plocha pod f(x) se rovná 1.

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$$

Rovnice 2

Další důležitou funkcí je **distribuční funkce** F(x), která udává pravděpodobnost, že hodnota náhodné proměnné je menší nebo rovna určité hodnotě. Funkce F(x) je stoupající a nabývá hodnot od 0 do 1. Platí, že F(x) je vyjádřena jako integrál distribuční funkce f(x).

$$F(X) = \int_{-\infty}^{x} f(t)dt.$$

Rovnice 3

6.3 Charakteristiky pravděpodobnostních rozdělení

Důležitými charakteristikami pravděpodobnostních rozdělení jsou:

1) **Střední hodnota** náhodné veličiny E(X)

   Jedná se o vážený průměr daného rozdělení. Střední hodnota odpovídá kvantilu 0,5 a označujeme ji také jako **první počáteční moment μ1**. Pro střední hodnotu platí:

$$E(X) = \sum_{x_k} x_k * P(X = x_k)$$

Rovnice 4

   Platí, že střední hodnota součtu dvou náhodných veličin je rovna součtu středních hodnot těchto veličin, a dále, že střední hodnota součinu těchto veličin je rovna součinu jejich středních hodnot.

2) **Rozptyl** D(X)

   Rozptyl je nezáporné číslo, které charakterizuje variabilitu číselných realizací náhodné veličiny X kolem její střední hodnoty. Rozptyl značíme také jako varianci, disperzi nebo jako **druhý centrální moment μ2**.

   Rozptyl je vypočten jako průměr druhých mocnin jednotlivých odchylek od střední hodnoty. Pro rozptyl platí:

$$D(X) = E([X - E(X)]^2) = \sum_{x=-\infty}^{\infty} [x - E(X)]^2 \cdot p(x)$$

Rovnice 5

3) **Směrodatná odchylka** σ(X)

   Směrodatná odchylka je rovna druhé odmocnině z rozptylu. Směrodatná odchylka je průměrnou odchylkou od průměru. Pro směrodatnou odchylku platí:

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}.$$

Rovnice 6

4) **Koeficient šikmosti** γ1

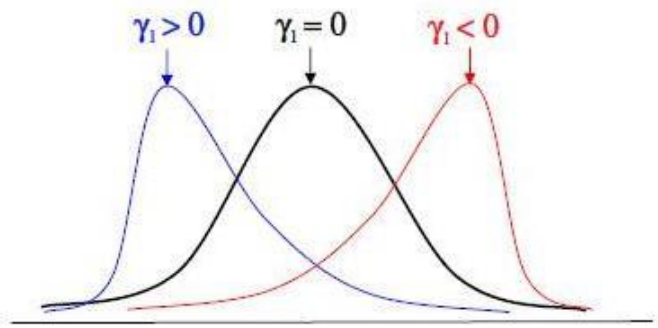
Koeficient šikmosti je charakteristika rozdělení náhodné veličiny, která popisuje jeho nesymetrii [58]. Koeficient šikmosti značíme také jako koeficient asymetrie nebo nesouměrnosti. Koeficient šikmosti je definován následně

$$\gamma 1 = \frac{\mu 3(\mathrm{X})}{\sigma(\mathrm{X})^3} = \frac{E(X - E(X))^3}{\mathrm{D}(\mathrm{X})^{3/2}}$$

Rovnice 7

kde **μ3** je **třetí centrální moment**

Šikmost je charakteristikou, která určuje, jakým směrem je proměnná asymetricky rozložena. Rozlišujeme šikmost kladnou, též pravostrannou, kdy se většina získaných hodnot nachází pod průměrem, a šikmost zápornou (levostrannou), kdy se většina hodnot naopak nachází nad průměrem [59]. Nulová hodnota tohoto koeficientu svědčí o rozložení symetrickém.



5) **Koeficient špičatosti** γ2

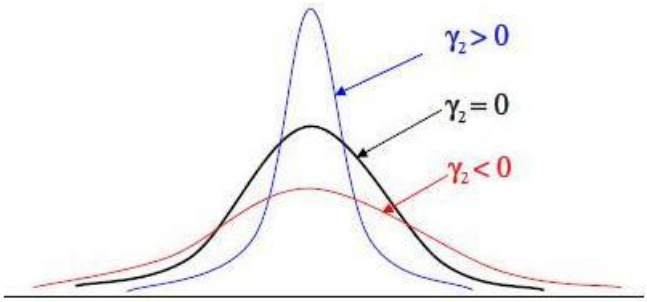
Koeficient špičatosti je charakteristika rozdělení náhodné veličiny, která porovnává dané rozdělení s normálním rozdělením pravděpodobnosti a je popsán vztahem [58]

$$\gamma 2 = \frac{\mu 4(\mathrm{X})}{\sigma(\mathrm{X})^4} - 3 = \frac{E\big(X - E(X)\big)^4}{\mathrm{D}(\mathrm{X})^2} - 3$$

Rovnice 8

kde **μ4** je **čtvrtý centrální moment**

Špičatost udává, jak se v rozložení četností vyskytují velmi vysoké a velmi nízké hodnoty. Podle koeficientu špičatosti lze usuzovat na více špičaté než normální rozdělení (tzv. leptokurtické) či méně špičaté než normální rozdělení (tzv. platykurtické) [59].



6) **Medián** m(X)

Medián je kvantil, který dělí nějaký soubor hodnot na dvě stejně velké části, přičemž platí, že nejméně 50 % hodnot je větších než medián a 50 % hodnot je menších než medián. V případě rozdělení pravděpodobnosti je mediánem číslo m, které splňuje rovnost $P(X \leq m) \geq 0,5$ a $P(X \geq m) \geq 0,5$ [58]. V případě spojité reálné jednorozměrné náhodné veličiny s hustotou pravděpodobnosti f pro medián platí:

$$\int_{-\infty}^{m} f(x)\,\mathrm{d}x = 0,5.$$

Rovnice 9

Výhodou mediánu jako statistického ukazatele je fakt, že není ovlivněn extrémními hodnotami. Proto se často používá v případě šikmých rozdělení.

7) **Kvantily** α

Jedná se o charakteristiky, které udávají, jak jsou náhodné veličiny X rozděleny na ose reálných čísel v určitém pravděpodobnostním poměru. Rozlišujeme:

- **medián** … α=0,5 neboli m(x)
- **kvartily** … tři kvartily rozdělují statistický soubor na čtvrtiny
- **dolní kvartil** … α_1=0,25
- **horní kvartil** … α_3=0,75
- **mezikvartálové rozpětí** … rozdíl mezi horním a dolním kvartilem IQR = $\alpha_3 - \alpha_1$; reprezentuje tedy oblast hodnot, které má středních 50 % hodnot proměnné
- **kvintily** … čtyři kvintily rozdělují statistický soubor na pětiny
- **decily** … α=0,1; …; 0,9
- **percentily** … α=0,01; …; 0,99

8) **Variační koeficient** k(X)

Variační koeficient představuje relativní míru variability, tj. vypovídá o relativním významu průměrné odchylky od průměru neboli kolik procent průměru představuje směrodatná odchylka. Počítá se jako podíl směrodatné odchylky a střední hodnoty.

$$k = \frac{\sigma(\mathrm{X})}{\mathrm{E}(\mathrm{X})}$$

Rovnice 10

Používá se na porovnávání variability mezi soubory dat s odlišnými průměry.

9) **Variační šíře** R(X)

Variační šíře neboli rozpětí je nejjednodušší mírou variability. Počítá se jako rozdíl největší a nejmenší hodnoty souboru.

$$R = x_{max} - x_{min}.$$

Rovnice 11

Nevýhodou této hodnoty je, že závisí na extrémních hodnotách, může tedy poskytnout velmi zavádějící informaci o daném jevu.

10) **Mediánová absolutní odchylka** MAD(X)

Mediánová absolutní odchylka představuje míru variability, která je ovlivněna pouze relativně málo extrémními hodnotami. Je definována vzorcem:

$$\mathrm{MAD} = \mathrm{medián}(|x_i - \tilde{x}|).$$

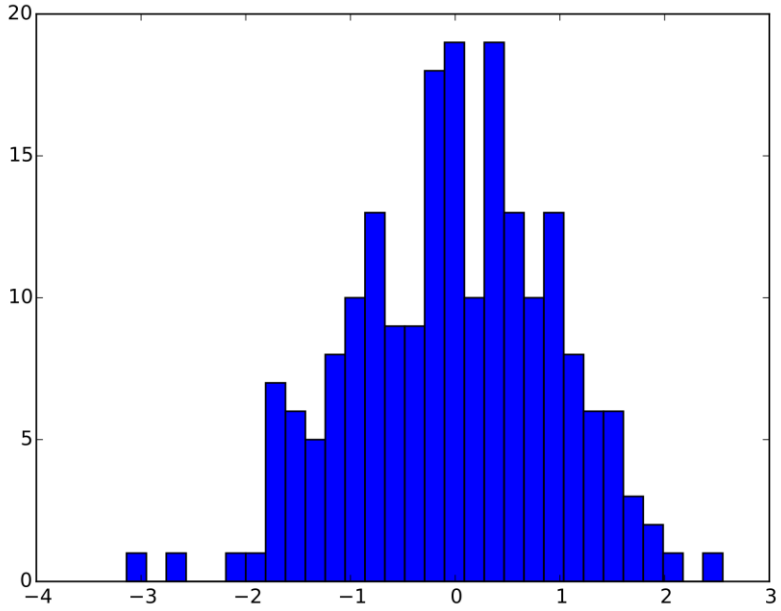
Rovnice 12

11) **Modus** Mod(X)

Modus představuje nejčastěji se vyskytující hodnotu proměnné. Modus představuje jakousi typickou hodnotu sledovaného souboru. [58]

6.4 Histogramy a krabicové grafy

Grafické znázornění dat daného souboru se v prvním kroku často provádí pomocí histogramů. **Histogram** je grafické znázornění distribuce dat pomocí sloupcového grafu se sloupci stejné šířky, vyjadřující šířku intervalů (tříd), přičemž výška sloupců vyjadřuje četnost sledované veličiny v daném intervalu. Příklad histogramu je uveden na Obr. 6.1



Obr. 6.1 Ukázka histogramu.

Je důležité zvolit správnou **šířku intervalu** histogramu, neboť nesprávná šířka intervalu může snížit informační hodnotu diagramu. Pro prvotní pochopení rozložení dat jsou vhodné malé intervaly. Obecně platí, že určení počtu intervalů histogramu závisí na počtu pozorování n a lze jej odvodit např. podle následujících vzorců [58]:

1) Přibližný odhad:

$$k = \sqrt{n}$$ Rovnice 13

2) Sturgesovo pravidlo:

$$k \cong 1 + 3{,}3 \log n$$ Rovnice 14

Je odvezené z binomického rozdělení a předpokládá normální rozdělení. Nefunguje spolehlivě pro soubor dat, kde n < 30 a/nebo kde nejsou data v normálním rozdělení.

3) Riceovo pravidlo:

$$k = 2n^{1/3}$$ Rovnice 15

4) Doanovo pravidlo:

$$k = 1 + \log_2(n) + \log_2(1 + \frac{\gamma 1}{\sigma_{\gamma 1}})$$

Rovnice 16

kde γ1 je koeficient šikmosti a

$$\sigma_{\gamma 1} = 6\sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}$$

Rovnice 17

Doanův vzorec je modifikací Sturgesova pravidla za účelem lepšího vyhodnocení souboru dat, kde nejsou data v normálním rozdělení.

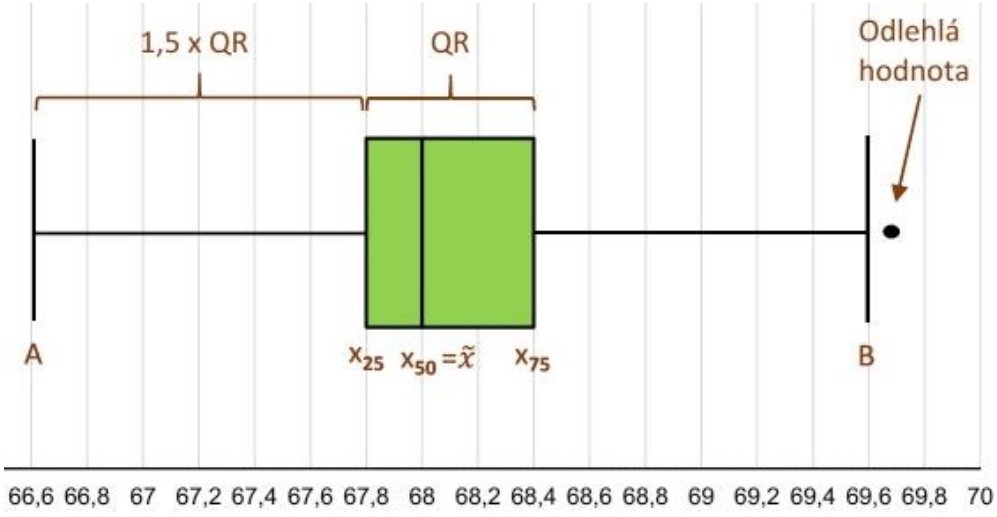
Krabicové grafy

Krabicový graf neboli Box-Plot je vizuálně velmi dobrý nástroj pro posouzení souboru dat náhodné veličiny a jejich prezentaci. Proto jsou data v této disertační práci často zobrazena pomocí Box-Plotů.

Pro sestrojení Box-Plotu je nutné určit a vypočítat následující charakteristiky a hodnoty:

- tři kvartily
- mezikvartálové rozpětí IQR (také značené jako QR): IQR = $\alpha_3 - \alpha_1$; reprezentuje oblast hodnot, která má středních 50 % hodnot proměnné.
- konce paprsků – označme je A a B – které se určí jako α_1 – 1,5x IQR resp. α_3 + 1,5x IQR

Na Obr. 6.2 je ukázka krabicového grafu (Box-Plotu) zobrazeného ve vodorovné poloze. Box-Plot může být zobrazen i ve svislé podobě. Nejnovější verze Excelu má Box-Plot mezi standardními grafy.



Obr. 6.2 Ukázka Box-Plotu [60], kde QR=IQR, x25= α_1, x75= α_3.

Box-Plot nám u souboru dat umožňuje:

1) identifikovat odlehlé hodnoty (outliers)

Odlehlé hodnoty při klasickém zpracování dat zkreslují výsledné statistické charakteristiky jako průměr, rozptyl, indexy způsobilosti atd. Box-Plot umožňuje identifikovat odlehlé hodnoty, které jsou obvykle zobrazeny jako puntíky na vnější straně paprsků.

2) posoudit asymetrie

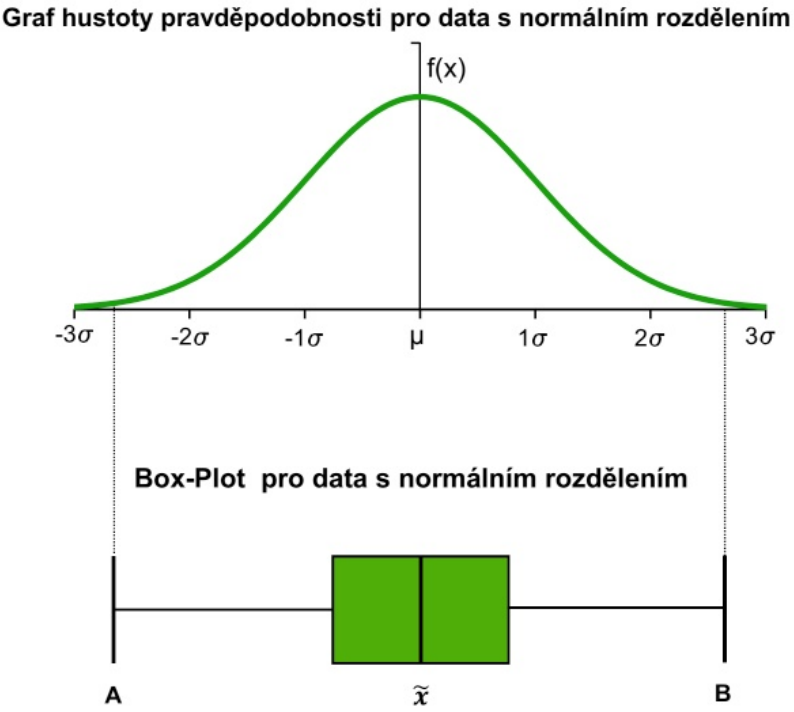
Pokud mají data dokonale normální rozdělení, je mediánová čára uprostřed „krabice“ Box-Plotu. Pokud je čára blízko k jednomu z kvartilů α_1 nebo α_3, může to naznačovat, že data mohou mít i jiné než normální rozdělení.

3) porovnat rozptyl u dvou a více souborů hodnot a případně posoudit způsobilost procesů

Při zpracování souboru dat velmi často počítáme rozptyl. Většinou proto, abychom získali směrodatnou odchylku, kterou potřebujeme pro další výpočty. Vypočtená hodnota rozptylu jako taková nám často nemusí nic říct. Nelze určit, jestli hodnota rozptylu je už velká nebo ještě malá. Posuzovat rozptyl má smysl, když ho je možné srovnávat s jiným rozptylem jiného souboru dat (samozřejmě pro stejný parametr měřený u srovnatelného procesu).

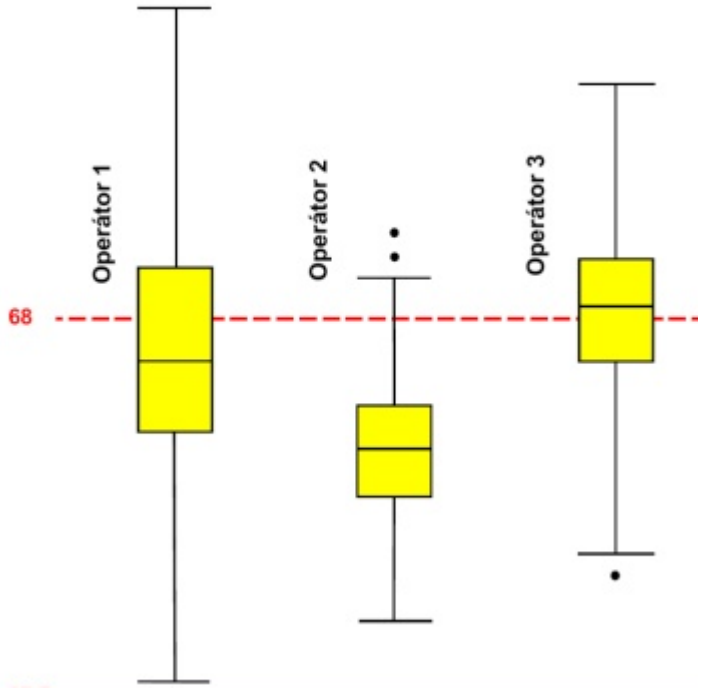
Takto pak můžeme porovnávat např. produktivitu posádek instalujících jednotlivé prvky horninové výztuže v různých směnách nebo efektivitu nakladačů při činnosti odtěžování apod. Pomocí Box-Plot grafů poměrně snadno určíme, který soubor dat má větší rozptyl. Je to ten graf, který má „delší krabici“.

Na Obr. 6.3 je patrné, že u dat s normálním rozdělením jsou koncové body paprsků A a B na úrovni ± 2,7x σ. Z toho vyplývá, že Box-Plot tak může být alternativou pro posuzování způsobilosti procesu, kde se nejčastěji uvažuje interval ± 3x σ. Box-Plot zobrazuje způsobilost graficky. Čím menší je vzdálenost mezi body A a B, tím menší rozptyl data mají (samozřejmě po vyloučení odlehlých hodnot).



Obr. 6.3 Box-Plot a graf hustoty pravděpodobnosti – normální rozdělení [60].

Prezentace výsledků prostřednictvím Box-Plotů je velmi srozumitelná. Na Obr. 6.4 je možno okamžitě porovnat produktivitu jednotlivých operátorů, střídajících se ve 3 směnách a obsluhujících tu samou strojní soupravu.



Obr. 6.4 Produktivita jednotlivých operátorů [60].

6.5 Pravděpodobnostní rozdělení

Histogramy nám pomáhají získat představu o vhodném **pravděpodobnostním rozdělení** náhodné veličiny X. Porovnáním tvaru histogramu s grafy vhodných rozdělovacích funkcí lze usuzovat na tvar hustoty pravděpodobnosti náhodné veličiny X, tzv. vytvořit **hypotézu** (domněnku) o tvaru rozdělení náhodné veličiny X. Histogramy jsou ovšem často velmi nepravidelné a pro získání seriózních výsledků je nutno ověřit hypotézu pomocí některého z testů shody.

Mezi důležitá spojitá pravděpodobnostní rozdělení, která budou v disertační práci použita, se řadí následující:

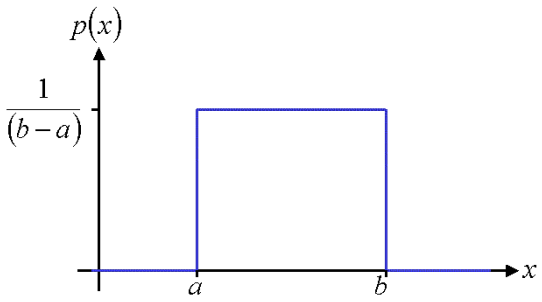
1) Rovnoměrné rozdělení

Rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti přiřazuje všem hodnotám náhodné veličiny stejnou pravděpodobnost. Rovnoměrné rozdělení má svoji diskrétní i spojitou podobu. Rovnoměrné rozdělení na intervalu (a, b) má ve všech bodech daného intervalu konstantní hustotu pravděpodobnosti, kterou lze vyjádřit vztahem [58].

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{pro } x \in (a,b) \\ 0 & \text{pro } x \notin (a,b) \end{cases}$$

Rovnice 18

Na Obr. 6.5 je zobrazena hustota pravděpodobnosti rovnoměrného rozdělení.



Obr. 6.5 Graf funkce hustoty pravděpodobnosti – rovnoměrné rozdělení.

Distribuční funkce F(X) rovnoměrného rozdělení má tvar

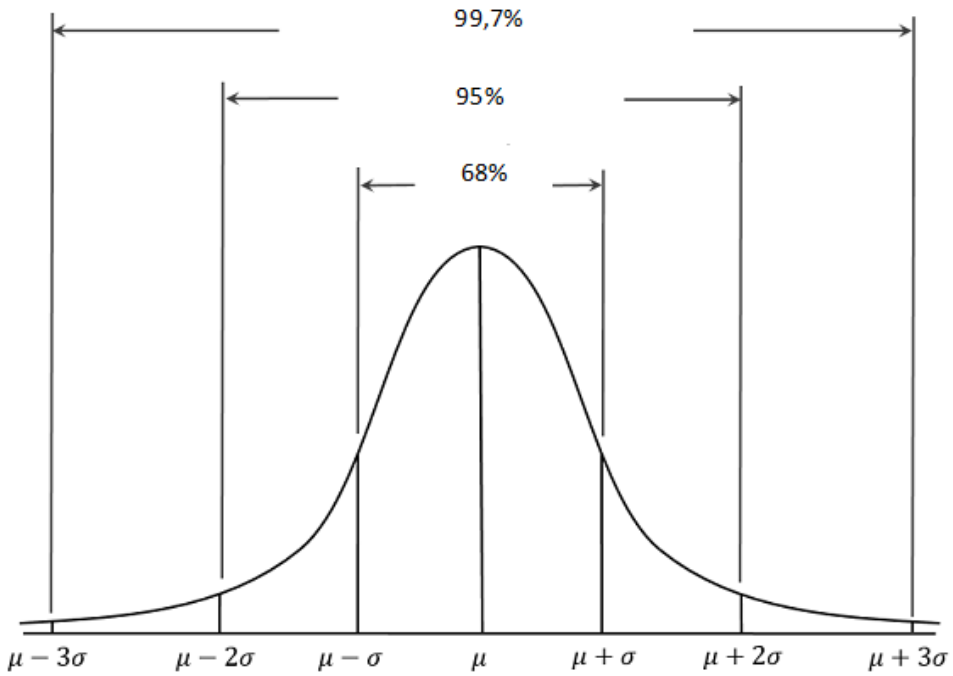
$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{pro } a < x < b \\ 1 & \text{pro } x \geq b \end{cases}$$

Rovnice 19

2) Normální rozdělení

Normální rozdělení pravděpodobnosti je spojité rozdělení popisující celou řadu veličin, jejichž hodnoty se symetricky shlukují kolem střední hodnoty a vytvářejí

tak charakteristický tvar hustoty pravděpodobnosti, která je známá také pod pojmem Gaussova křivka. Tento zvonovitý tvar souvisí s faktem, že variabilita normálního rozdělení kolem jeho střední hodnoty je dána aditivním vlivem mnoha faktorů, což znamená, že se s normálním rozdělením setkáváme u řady technických znaků. Prakticky vždy se zajímáme, jestli se hodnoty náhodné veličiny X podobají normálnímu rozložení. Normální rozdělení pravděpodobnosti je definováno hustotou pravděpodobnosti f(X) ve tvaru Gaussovy funkce [19].



Obr. 6.6 Graf funkce hustoty pravděpodobnosti – normální rozdělení [58].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

Rovnice 20

Distribuční funkce F(X) normálního rozdělení má tvar

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \, \mathrm{d}t.$$

Rovnice 21

3) Logaritmicko-normální rozdělení (log-normální)

Logaritmicko-normální (nebo též log-normální) rozdělení pravděpodobnosti LN(E,σ) je spojité rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny X takové, že náhodná veličina ln(X) má normální rozdělení se střední hodnotou E(X)

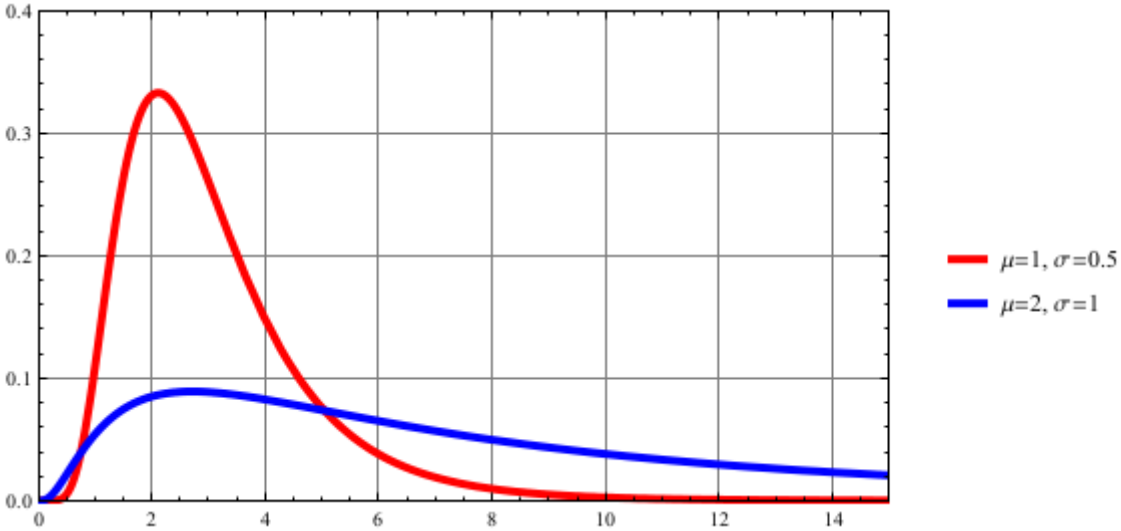
a směrodatnou odchylkou σ. Hustota pravděpodobnosti logaritmicko-normálního rozdělení má tvar [58]

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0$$

Rovnice 22

kde μ značí E.

Na Obr. 6.7 je zobrazena hustota pravděpodobnosti logaritmicko-normálního rozdělení.



Obr. 6.7 Grafy funkcí hustoty pravděpodobnosti – logaritmicko-normální rozdělení.

Distribuční funkce F(X) logaritmicko-normálního rozdělení má tvar

$$F(x) = \int_{\lambda}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma(t-\lambda)} \exp\left[-\frac{[\ln(t-\lambda)-\mu]^2}{2\sigma^2}\right] dt,\ x > \lambda,\ \sigma > 0$$

Rovnice 23

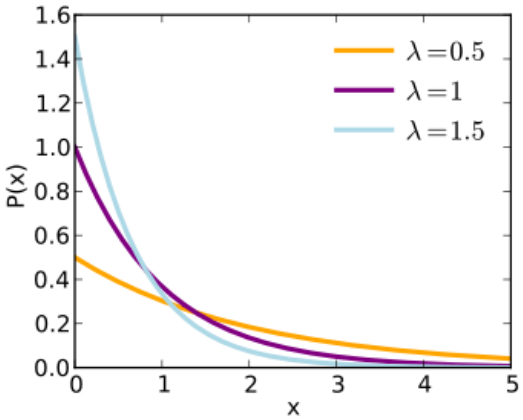
4) Exponenciální rozdělení

Exponenciální rozdělení pravděpodobnosti Exp(λ) je spojité rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny X, kde hustota rozdělení pravděpodobnosti f(X) má tvar [58]

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \text{ pro } x > 0, \lambda > 0,$$
$$f(x) = 0 \text{ jinak.}$$

Rovnice 24

Hustota pravděpodobnosti má jen jeden parametr λ. Na Obr. 6.8 je zobrazena hustota pravděpodobnosti exponenciálního rozdělení.



Obr. 6.8 Grafy funkcí hustoty pravděpodobnosti – exponenciální rozdělení.

Distribuční funkce F(X) exponenciálního rozdělení má tvar

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \text{ pro } x > 0,$$
$$F(x) = 0 \text{ jinak.}$$

Rovnice 25

Dalšími důležitými spojitými pravděpodobnostními rozděleními jsou:
5) Cauchyho rozdělení
6) gama rozdělení
7) Studentovo rozdělení
8) Fischerovo-Snedecorovo rozdělení
9) χ^2 rozdělení (chí-kvadrát)

6.6 Test dobré shody

K ověření shody empirického a teoretického rozdělení lze využít χ^2-kvadrát test dobré shody. Ačkoliv se tento test obecně používá k testování shody četností především u nominálních (nečíselných) znaků, lze ho použít i k testování shody rozdělení četností u znaků kvantitativních, a to metodou porovnání distribuční funkce sledované spojité náhodné veličiny s distribuční funkcí teoretického rozdělení. Tento test je založen na posouzení rozdílu mezi skutečnými (empirickými, reálnými) četnostmi výskytu hodnot ve výběrovém souboru a očekávanými (teoretickými) četnostmi, které odpovídají předpokládanému rozdělení pravděpodobností. V příkladech této disertační práce se bude jednat o normální a logaritmicko-normální rozdělení, kterými budeme charakterizovat některé náhodné veličiny jako např. trvání činností. Pokud testovací kritérium přesáhne kritickou hodnotu, rozdělení nelze považovat za stejná. Test podrobně popisuje [21]. Postup testu je obecně:

1. Rozdělení empiricky naměřených hodnot do intervalů.

2. Vypočtení teoretických četností pro dané intervaly.
3. Výpočet testovacího kritéria a srovnání této hodnoty s kritickou hodnotou.

Postup při χ^2-kvadrát testu dobré shody [58]:

1) Obor všech možných hodnot náhodné veličiny se rozdělí na k nepřekrývajících se intervalů. V každém intervalu je nutné mít alespoň 5 pozorování.
2) Pro každý interval se stanoví pravděpodobnost p_i, že náhodná veličina nabyde hodnoty z daného intervalu.
3) Provede se N pokusů a zjistí se, kolikrát z těchto pokusů nabyla náhodná veličina hodnoty z 1, 2, … k-tého intervalu. Tyto četnosti se označí X_1, X_2, …, X_k.
4) Porovnají se očekávané četnosti v jednotlivých částech $N*p_i$ se skutečnými četnostmi X_i pomocí vzorce:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(X_i - Np_i)^2}{Np_i}$$

Rovnice 26

Pokud má testovaná náhodná veličina předpokládané pravděpodobnostní rozdělení, má náhodná veličina χ^2 přibližné rozdělení chí-kvadrát. Jestliže bylo rozdělení dáno včetně všech parametrů, je počet stupňů volnosti k=1, jestliže byl některý parametr rozdělení neznámý, snižuje se počet stupňů volnosti za každý neznámý parametr (bylo jej nutno nejprve z dat odhadnout a pak teprve stanovit pravděpodobnosti pi). Např. pro N a LN rozdělení je počet parametrů 2. Potom se počet stupňů volnosti snižuje o 3 (= 1 + 2).

Hodnotu veličiny χ^2 porovnáme s kritickou hodnotou příslušného rozdělení chí-kvadrát na požadované hladině významnosti, která je v příkladech uvažována jako 95%. Test lze použít za předpokladu, že všechny hodnoty $N*p_i$ jsou alespoň 5.

Je důležité si uvědomit, že hypotézu vytvořenou z určité realizace náhodného výběru z X bychom správně měli ještě ověřit na jiné realizaci náhodného výběru z X.

6.7 Metoda nejmenších čtverců

Metodu nejmenších čtverců aplikujeme, resp. necháme aplikovat Excel, při prokládání (aproximaci) naměřených jednorozměrných dat přímkou (lineární regrese), parabolou nebo obecným polynomem předem daného stupně (polynomická regrese). [58]

Jedná se o způsob, jak z několika opakovaných měření a_1, a_2, a_3, ... a_n nejlépe odhadnout skutečnou hodnotu měřené veličiny. Skutečné veličině je nejblíže ta hodnota a_0, pro kterou je součet čtverců rozdílů $(a_1 - a_0)^2 + (a_2 - a_0)^2 + ... + (a_n - a_0)^2$ nejmenší.

6.8 Predikce harmonogramu ražby

Při predikování postupu ražby v čase resp. harmonogramu ražby budeme brát do úvahy tři významné charakteristiky – 1) dosud zastižené třídy ražby, 2) efektivitu prováděných činností a prostoje a 3) podmínky stavby a vlivy, za kterých ražba probíhala. Protože se výše uvedené charakteristiky obvykle mění, provedeme rozdělení vyraženého tunelu na

referenční úseky, které budou charakteristické určitou homogenitou jednotlivých charakteristik. To samé rozdělení na homogenní úseky provedeme pro zbývající délku tunelu. Tzn., že zbývající délku tunelu, kterou je třeba vyrazit, rozdělíme na tzv. predikované úseky.

Pro každý predikovaný úseku stanovíme aktualizovanou předpokládanou třídu ražby, která se může lišit od třídy ražby předpokládanou projektem. Poté stanovíme podmínky stavby na tomto predikovaném úseku, které můžou být totožné nebo odlišné od podmínek stavby na nějakém referenčním úseku. Můžeme variovat a určovat dopad jednotlivých vlivů jako např. zrychlení ražby vlivem zaučení posádek nebo vlivem většího počtu mechanizace, změnou délky záběru apod. a sledovat dopad na harmonogram. Tyto vlivy, vyjádřené pomocí koeficientů, mají dopad na jednotlivé činnosti razícího cyklu. Trvání činností razícího cyklu představují náhodné veličiny, které mohou mít různá pravděpodobnostní rozdělení. Predikované trvání každé činnosti potom budeme upravovat o vlivy relevantních podmínek stavby.

Výsledkem budou aktualizované náhodné veličiny trvání jednotlivých činností, tj. jejich predikované trvání v jednom cyklu. Na základě znalosti náhodných veličin jednotlivých trvání, predikované délky záběru a délky predikovaného úseku budeme počítat trvání ražby daného úseku ve formě náhodné veličiny. Předpokládaný rozsah ukončení ražby predikovaného úseku můžeme vypočítat s určitou námi zvolenou pravděpodobností.

Referenční úseky

Referenční úseky jsou již vyražené úseky tunelu, které jsou charakteristické tím, že byly raženy v jedné třídě ražby a měly v celé své délce relativně shodné podmínky stavby a koeficienty vlivů. Koeficienty vlivů ve skutečnosti variují v čase. Pro zjednodušení je v této práci uvažujeme konstantní pro každý záběr.

Predikované úseky

Predikované úseky jsou úseky, které ještě nebyly vyraženy a na kterých budeme provádět predikci a) tříd ražby, b) podmínek stavby resp. vlivů a c) trvání jednotlivých činností v razícím cyklu. Tyto úseky budou charakteristické tím, že každý z nich budeme mít v celé své délce jednu určitou třídu ražby a relativně shodné podmínky stavby a koeficienty vlivů.

Predikce tříd ražby

Predikci tříd ražby pro nevyraženou část tunelu můžeme založit 1) na analýze změn tříd v doposud vyražených úsecích (skutečné versus očekávané třídy ražby) nebo 2) na odborném odhadu. Pokud máme dobrý geotechnický průzkum a ve zbývající části ražby geotechnický průzkum predikoval obdobné geotechnické podmínky, obdobnou výšku nadloží apod. jako již v některém vyraženém úseku, tak je vhodné založit predikci tříd ražby na ad 1). Nechá se totiž očekávat, že změna očekávaných a skutečných tříd proběhne v podobném poměru, jako tomu bylo doposud.

Pokud jsou ovšem z geotechnického průzkumu patrné rozdílné geotechnické podmínky a/nebo výška nadloží, případně nějaká jiná změna jako např. přechod pod řeku nebo ražba pod zástavbou apod., které ještě nebyly dosavadní ražbou zastiženy, tak je vhodnější variantou predikovat třídy ražby odborným odhadem. Také může volit tento postup, když se

chystáme provést změnu v metodice zatřiďování. Důvodem pro volbu ad 2) je tak fakt, že nemáme vhodný referenční úsek pro postup dle ad 1).

Spolu s třídou ražby budeme predikovat i průměrnou délku záběru pro jednotlivé predikované úseky.

Predikce podmínek stavby a vlivů

Reálná ražba je velmi často plná překvapení. Neočekávané události, viz kapitola 4.7, dokáží zásadním způsobem ovlivnit postup ražby a/nebo některé z činností a způsobit významné prostoje.

Bývá zvykem, že před zahájením ražby je vliv podmínek stavby zanedbán. Respektive harmonogramy ražby prezentované v nabídkách jsou často velmi optimistické a jsou založeny na předpokladu téměř dokonalých podmínek stavby. Pouze některé z mnoha vlivů jako např. vliv zaučování (learning factor LF) při ražbě počátečního úseku, vliv technologických nadvýlomů nebo vliv spadu při aplikaci stříkaného betonu jsou uvažovány. Bylo by však vhodnější, kdyby v nabídkách byl specifikován i dopad dalších vlivů a to i v případech, kdy by tyto měly být rovné 1, tzn. bez dopadu na postup ražby. V takových případech je snazší provádět porovnání skutečnosti s předpokladem, protože předpoklad je známý.

V průběhu ražeb je vhodné jednotlivé vlivy monitorovat a stanovovat jejich dopad ražbu. Neměnný dopad vlivů na ražbu je jedním z podkladů pro stanovení referenčních úseků, pro které se provádí analýzy ražby a porovnání s jinými úseky.

Pro predikci harmonogramu ražeb je nutné predikovat i podmínky stavby. Toto lze učinit na základě odborného odhadu nebo můžeme variovat a určovat dopad jednotlivých vlivů na postup ražby. Predikce harmonogramu ražby, prováděná ze zkušeností s ražbou předešlých úseků, musí být doprovázena slovním popisem specifikujícím dopad podmínek stavby na ražbu, činnosti a prostoje. Nejjednodušším přístupem může být konstatování, že predikujeme ražbu zbývajícího úseku za podmínek shodných s ražbou jiného již dříve vyraženého úseku.

Predikce činností a prostojů

Analýza činností a prostojů na referenčních úsecích je podkladem pro predikci trvání jednoho cyklu ražby v predikovaných úsecích (i). Trvání činností razícího cyklu a prostojů představují náhodné veličiny Xi, které je možné popsat pravděpodobnostním rozdělením. Predikované trvání každé činnosti a prostojů Yi bude také náhodná veličina charakteristická určitým pravděpodobnostním rozdělením, vycházející ze znalosti Xi a upravené o vlivy relevantních podmínek stavby ($f_{POR,i} = f_{SKUT,i} / f_{PRED,i}$), kde $f_{POR,i}$ je porovnávací koeficient vlivu.

$$Y_i = \frac{f_{SKUT,i}}{f_{PRED,i}} \times X_i = f_{POR,i} \times X_i$$

Rovnice 27

Porovnávací koeficient vlivu využijeme zejména při variování, kdy budeme např. porovnávat trvání ražby za změněných předpokladů (koeficientů vlivů) oproti nějakým jiným referenčním úsekům, které již byly vyraženy, na nichž proto známe skutečná data a skutečný koeficient celkového vlivu. Pokud například zhotovitel bude chtít urychlit výstavbu tím, že dodá pro odtěžování vyšší počet damprů, může upravením koeficientu vlivu této činnosti

predikovat s určitou pravděpodobností, jakým způsobem se urychlí ražba. Tímto způsobem lze provádět optimalizaci ražeb.

Ve skutečnosti koeficienty vlivů můžou nebo resp. velmi pravděpodobně budou proměnné v rámci jednotlivých predikovaných úseků. Koeficienty vlivů by tedy měly být také náhodné veličiny. Vzhledem k tomu, že se většina koeficientů vlivů stanovuje odborným odhadem, tak bylo v této disertační práci přijato zjednodušení, že do výpočtů vstupují koeficienty vlivu jako hodnoty konstantní po celé délce jednotlivých úseků (i).

$$f_{SKUT,i} = konst. \qquad \text{Rovnice 28}$$

$$f_{PRED,i} = konst. \qquad \text{Rovnice 29}$$

Predikce harmonogramu ražby

Na základě predikovaného pravděpodobnostního rozložení trvání činností a prostojů lze stanovit predikované trvání jednoho cyklu ražby respektive záběru. Trvání jednoho cyklu ražby bude náhodná veličina.

$$T_{Cj} = \sum_{i=1}^{k} Y_i = \sum_{i=1}^{k} \frac{f_{SKUT,i}}{f_{PRED,i}} \times X_i$$

Rovnice 30

kde k je počet činností a prostojů nebo jednodušeji jejich skupin.

Celkovou dobu ražby U v celém predikovaném úseku vypočítáme jako součet trvání jednotlivých záběrů T_{Cj}, přičemž průměrnou délku záběrů odhadneme a jejich počet (r) dopočítáme. Nezapomene přičíst trvání činností a prostojů Z_{Nj}, které se vyskytují s jinou frekvencí než 1-krát za záběr. V příkladech použijeme zjednodušení pro vztah trvání jednotlivých činností na 1 bm tunelu a na délku záběru. Tento vztah budeme uvažovat lineární, ačkoli ve skutečnosti tento vztah lineární není. Pro zjednodušení však není v této disertační práci tato nepřímá úměra řešena. Zanedbání nepřímé úměry nemá velký dopad na výsledné hodnoty, pokud v referenčních a predikovaných úsecích jsou délky záběrů relativně podobné, což by mělo být snadné docílit již z podstaty těchto úseků. Celkové trvání ražby U je náhodná veličina definovaná jako

$$U = \sum_{j=1}^{r} T_{Cj} + \sum_{j=1}^{r} Z_{Nj} = \sum_{j=1}^{r}\sum_{i=1}^{k} Y_{ji} + \sum_{j=1}^{r}\sum_{i=1}^{m} p_i \times Z_{ji}$$
$$= \sum_{j=1}^{r}\sum_{i=1}^{k} \frac{f_{SKUT,i}}{f_{PRED,i}} \times X_i + \sum_{j=1}^{r}\sum_{i=1}^{m} p_i \times Z_{ji}$$

Rovnice 31

kde r je počet záběrů a rovná se délce predikovaného úseku L dělenou odhadnutou délkou záběru L1; Z_i jsou náhodné veličiny trvání činností a prostojů vyskytujících se s jinou frekvencí než 1-krát za záběr; m je počet činností a prostojů vyskytujících se s jinou frekvencí než 1-krát za záběr; p_i je pravděpodobnost výskytu činností a prostojů vyskytujících se s jinou frekvencí než 1-krát za záběr.

6.9 Sčítání náhodných veličin, Glivenko-Cantelliho věta

Můžeme provést n-simulací predikované doby ražby určitého úseku. Predikované trvání jednoho záběru Tc je náhodná veličina tvořená součtem predikovaného trvání jednotlivých činností s uvážením četnosti jejich výskytu. Predikované trvání jednotlivých činností získáme jako násobek skutečného trvání činností z referenčního úseku a koeficientu vlivu, který je pro jednoduchost uvažován konstantní v celém predikovaném úseku.

Doba trvání každé dílčí činnosti je náhodná veličina, jejíž rozdělení a parametry byly odhadnuty a ověřeny pomocí testu dobré shody. Simulujeme rozdělení celkové doby U, tedy součtu dílčích činností. Ke zpřesnění odhadu této celkové doby U je ale nezbytné při simulaci započítat i koeficienty vlivu.

Budeme simulovat trvání každého záběru predikovaného úseku Tc_i tak, že provedeme vzorkování[4] náhodných veličin skutečných trvání jednotlivých činností, které pokaždé vynásobíme koeficientem vlivu a tyto sečteme při současném uvážení frekvence jejich výskytu. Tímto způsobem získaná trvání jednotlivých záběrů budeme postupně sčítat tolikrát, kolik je počet záběrů v predikovaném úseku. Výsledkem bude trvání ražby predikovaného úseku U ve formě vzorků náhodné veličiny.

Predikovanou dobu ražby zobrazíme formou histogramu, jádrově odhadnuté křivky hustoty pravděpodobnosti a/nebo empirické distribuční funkce. Bude nás zajímat, v jakém časovém rozsahu bude ražba dokončena, resp. jak dlouho bude trvat ražba predikovaného úseku pro námi zvolenou pravděpodobnost P. Základem tohoto postupu je Glivenko-Cantelliho věta. Nastavíme počet simulací dostatečně vysoký tak, aby abychom byli schopni stanovit požadovaná data s přesností v násobcích celých dní. Pro naše účely je taková přesnost dostatečná.

Výslednou dobu ražby predikovaného úseku určíme tak, že seřadíme soubor vzorků náhodné veličiny U a z takto setříděného souboru vybereme dolní a horní mezní hodnoty odpovídající námi stanovené pravděpodobnosti P. Výběr provedeme tak, že hodnoty ležící s pravděpodobnosti 0,5x(1 – P) na obou krajích tohoto setříděného souboru neuvažujeme. Výsledný rozsah doby ražby představuje minimum a maximum ze zbylých hodnot.

[4] Pozn.: Při vzorkování skutečného trvání činností je možno zavést omezení pomocí minimálního a maximálního trvání. Vhodným pravděpodobnostním rozložením potom může být např. Beta rozdělení. Tato problematika není v disertační práci řešena.

Glivenko-Cantelliho věta

Glivenko-Cantelliho věta [58] determinuje asymptotické chování empirické distribuční funkce F(x) v závislosti na počtu nezávislých pozorování náhodných veličin X1, X2, … Xn stejného typu. Empirická distribuční funkce je definována jako Fn(x) a platí:

$$F_n(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_{[X_i,\infty)}(x)$$

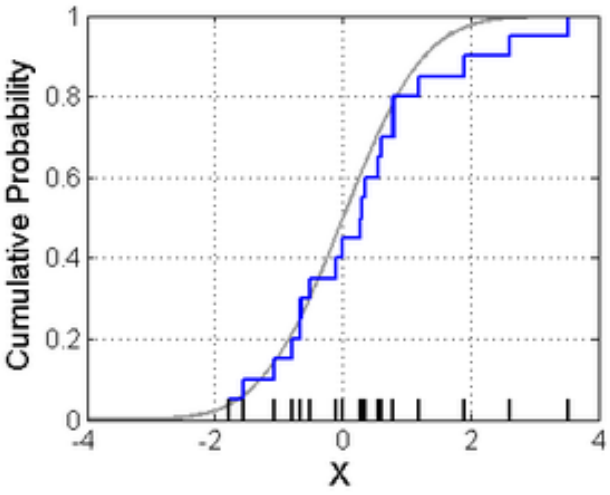
Rovnice 32

kde IC je indikační funkce (nabývající hodnotu 0 nebo 1) na souboru dat C. Empirická distribuční funkce Fn(x) je sekvence náhodných čísel, která téměř jistě konverguje k distribuční funkci F(x) v důsledku síly zákona velkých čísel.

$$\|F_n - F\|_\infty = \sup_{x\in\mathbb{R}} |F_n(x) - F(x)| \longrightarrow 0 \text{ almost surely.}$$

Rovnice 33

kde sup značí supremum a jedná se o rozdíl hodnot Fn(x) a F(x) na svislé ose grafu uvedeného na Obr. 6.9.

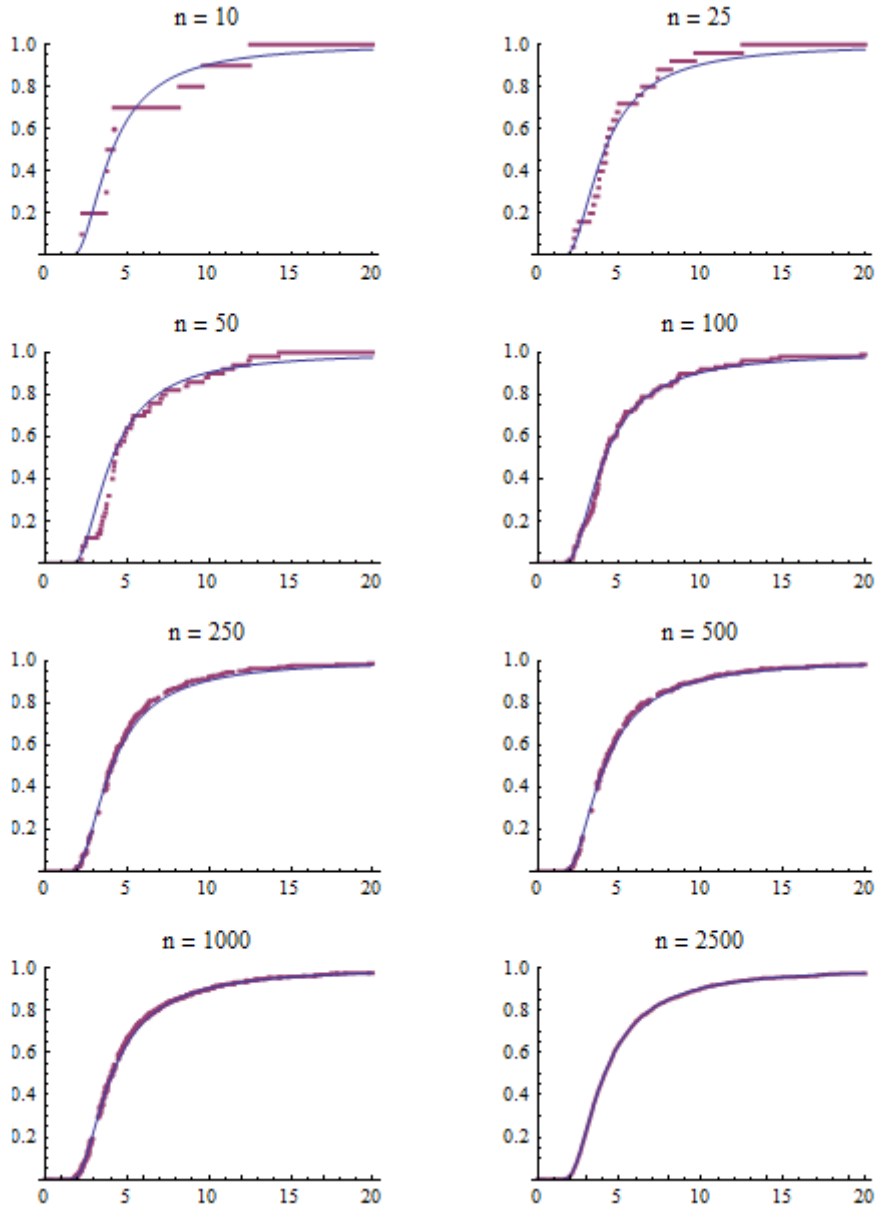


Obr. 6.9 Kumulativní empirická distribuční funkce Fn(x) je označena modře. Černé čárky na vodorovné ose reprezentují vzorky dat odpovídající empirické distribuční funkci Fn(x). Šedá křivka je skutečná kumulativní distribuční funkce F(x) [58].

Demonstrace toho, jak empirická distribuční funkce Fn(x) konverguje ke skutečné distribuční funkci F(x) v závislosti na počtu simulací je zobrazena na Obr. 6.10.

Vyhodnocení

Přesnost výsledků bude záviset na počtu provedených simulací. V příkladech kapitoly 8.2 bude řešen konkrétní případ trvání ražby predikovaného úseku a bude se zjišťovat přesnost výsledků v závislosti na počtu simulací. Výsledky trvání ražby představují datový soubor náhodné veličiny, která má normální pravděpodobnostní rozdělení. Směrodatná odchylka nám bude charakterizovat přesnost výsledku v závislosti na počtu simulací.



Obr. 6.10 Příklad konvergence empirické distribuční funkce Fn(x) ke skutečné distribuční funkci F(x) v závislosti na počtu provedených simulací [61].

Výše popsaný postup si ukážeme na konkrétních příkladech v kapitole 8, jejichž součástí bude i programový kód v jazyce R. Jazyk R je programovací jazyk a prostředí se svobodnou licencí určené pro statistickou analýzu dat a jejich grafické zobrazení.

7 Analýza činností a prostojů při ražbách

7.1 Úvod

Ražba každého podzemního díla probíhá v následných, po sobě jdoucích cyklech, sestávajících ze sledu jednotlivých činností. Tyto činnosti se provádějí s různou efektivitou. V důsledku nízké produktivity při provádění některých činností dochází ke zpomalení postupu ražeb. Pro posouzení, zda jsou jednotlivé činnosti prováděny dostatečně efektivně, však v řadě případů chybí podklady. Produktivity a trvání jednotlivých činností razícího cyklu by měly být **specifikovány v nabídce a být součástí smlouvy o dílo**. V průběhu výstavby podzemního díla by pak měly být **činnosti a prostoje** (souhrnně události) sledovány a vyhodnocovány. Specifikace produktivit a trvání činností závisí na geotechnických podmínkách a musí tedy být **vztaženy k jednotlivým třídám ražby**.

V případě poruch strojního vybavení, nedostatku materiálu, pracovní síly nebo jiných podmínek stavby a v případech výskytu nepředvídatelných nebo výjimečných geotechnických podmínek se k výše uvedeným činnostem razícího cyklu přidávají různé typy **prostojů**. Autor disertační práce po dobu své praxe nezažil stavbu, kde by nenastaly některé významné prostoje. V Tab. 7.1 jsou uvedeny příklady několika typů činností a prostojů v závislosti na typu ražby. Softwarová aplikace Tunnel Supervision [1] rozlišuje pro každý typ ražby na cca 50 specifických typů činností a prostojů, které jsou sdruženy do cca 10 až 15 skupin.

Podrobná specifikace událostí resp. skupin událostí je nutná pro jednoznačné a správné vyhodnocení činností a prostojů. Nezřídka se nutnost podrobné evidence událostí projeví až s postupem časem, kdy už ovšem může být pozdě zpětně takovou evidenci a vyhodnocení událostí provést. Jedná se například o řešení vícenároků zhotovitele apod. Proto je vhodné provádět pečlivou a pravidelnou evidenci událostí a posuzovat jejich uznatelnost již od začátku ražeb.

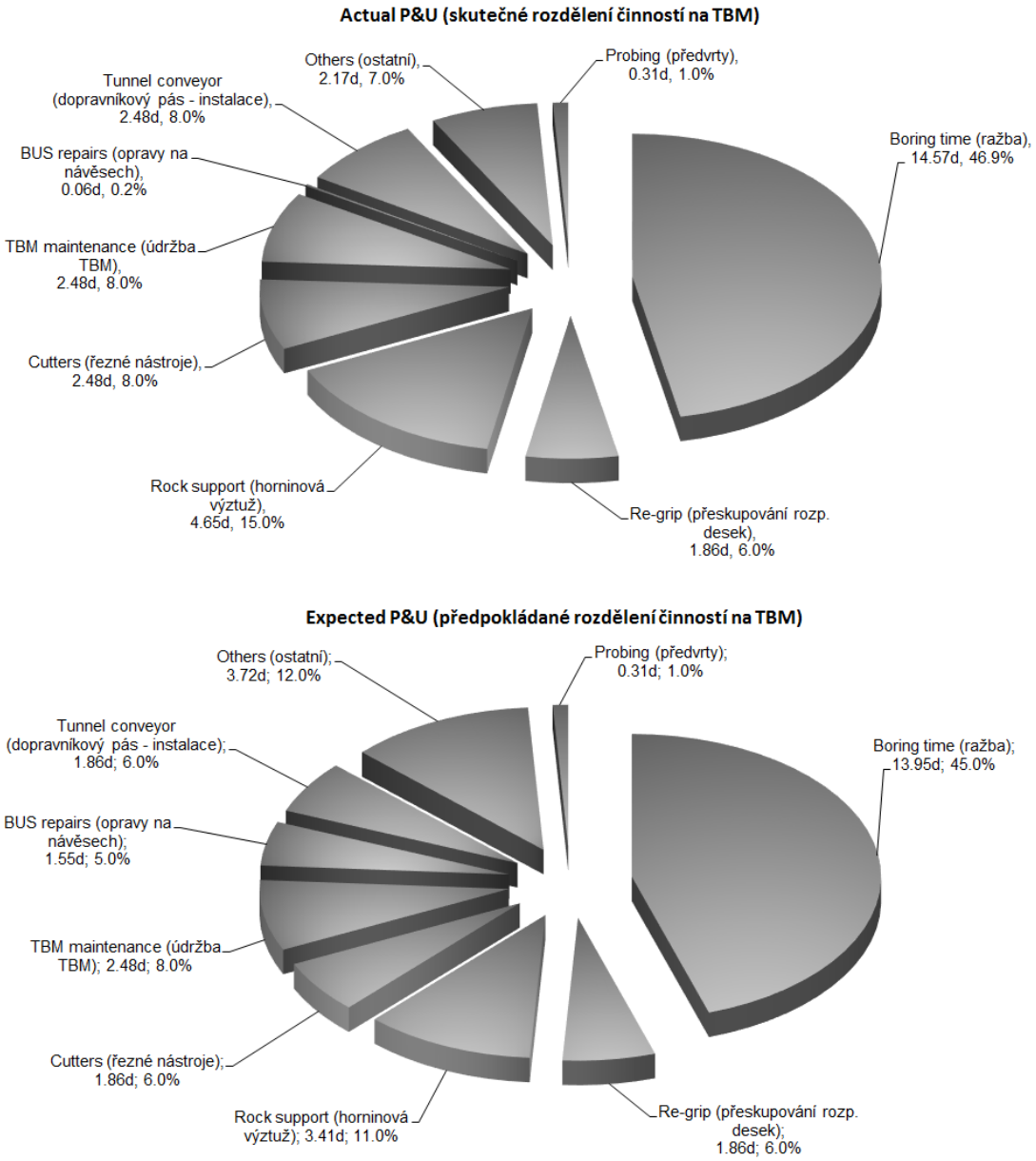
Tab. 7.1 Příklady činností ražby a prostojů v závislosti na typu ražby [1].

Konvenční ražba	Ražba pomocí TBM otevřeného typu	Ražba pomocí EPBM
Označení profilu (poloha vrtů pro odstřel)	Ražba a odtěžování	Ražba a odtěžování
Vrtání pro odstřel	Geologické mapování	Primární injektáž za segmenty
Nabíjení vrtů	Horninová výztuž - stříkaný beton - stabilizační vrstva	Budování prstence
Odstřel - plná čelba	Horninová výztuž - stříkaný beton - 1. vrstva	Dodatečná injektáž za segmenty
Odstřel - selhání	Horninová výztuž - ocel. sítě - 1. vrstva	Kontrola řezné hlavy a/nebo řezných nástrojů
Mechanická ražba	Horninová výztuž - ocel. výztužný oblouk	Čištění řezných nástrojů
Odvětrání	Horninová výztuž - svorníky - vrtání, instalace, injektování	Výměna řezných nástrojů
Odtěžování	Horninová výztuž - dodatečné a opravné práce	Tun. stroj – údržba
Profilování	Předinjektáž - vrtání	Tun. stroj – elektro porucha
Geologické mapování	Předinjektáž - injektáž	Návěsy – porucha, oprava apod.
Horninová výztuž - stříkaný beton	Průzkumné předvrty (bezjádrové)	Dopravníkový pás – prodlužování
atd.	atd.	atd.

Různé druhy prostojů, často provázející práce v podzemí, mohou být způsobeny řadou faktorů, z nichž jedním z nejvýznamnějších je kvalita zhotovitele a jeho motivace. Někdy se může ukázat, že prostoje jsou neúměrně prodlužovány z důvodu nekvalitně sepsané smlouvy o dílo, která patřičně neošetřuje zpoždění prací ze strany zhotovitele. Dalším významným důvodem zpoždění postupu ražeb, který je téměř vždy uplatňován, je výskyt obtížných geologických podmínek, které nebyly projektem očekávány … GBR

Sledování činností a prostojů a doby jejich trvání má proto význam pro všechny účastníky výstavby a pro různé typy smluvních podmínek. Zatímco zhotovitel může sledovat zefektivnění svých činností v tunelu, zájmem objednatele je rozlišení vlivu geotechnických podmínek od vlivu prostojů zaviněných zhotovitelem na prodloužení doby výstavby a ceny díla.

Na Obr. 7.1 je uvedeno porovnání mezi skutečným a ve smlouvě o dílo předpokládaným **rozdělením činností a prostojů** při ražbě tunelu pomocí TBM otevřeného typu na projektu podzemní hydroelektrárny Kárahnjúkar [8] a příloha 1. Jedno ze tří nasazených TBM dosáhlo v měsíci červnu 2007 velmi dobré shody skutečných a očekávaných činností. Očekávané zastoupení činnosti je již aktualizováno tak, aby odpovídalo skutečně zastiženým třídám ražby, tj. kombinaci skutečných tříd horninové výztuže SC a skutečných tříd ražnosti tunelovacího stroje BC.



Obr. 7.1 Porovnání mezi skutečným a očekávaným rozdělením skupin činností a prostojů při ražbě tunelu pomocí TBM otevřeného typu, červen 2007.

Ačkoli jsou specifikace, sledování a vyhodnocování činností a prostojů při ražbě velmi důležité, jsou v současné praxi zanedbávané. Na většině projektů je praxe taková, že zaznamenávání činností a prostojů při ražbě má formu ručně psaných časových snímků neboli směnových listů. **Specifikace činností a prostojů a doby jejich trvání ve smluvní dokumentaci a následné jejich monitorování a vyhodnocování v průběhu ražeb již není často patřičně řešeno!** Jedním z důvodů je i skutečnost, že zpracování rozsáhlého množství dat je bez specializované softwarové aplikace časově extrémně náročné a vzhledem k okamžitým potřebám informací prakticky nerealizovatelné.

Vyhodnocení činností a prostojů musí probíhat v pravidelných intervalech anebo okamžitě dle potřeby a to pro různé zadání jako např. různé časové intervaly, třídy ražby, podmínky stavby apod. Bez takového monitorování činností a prostojů nemají účastníci výstavby úplnou a pravdivou představu o důvodech vedoucích k případnému prodlení, tj. zda práce při ražbách jsou vykonávány kvalitně a efektivně a v souladu se smlouvou o dílo. Vytvoření pravdivého „obrázku“ o tom, co se děje při ražbách, je klíčové pro správné rozhodování/optimalizaci ražeb a pro schvalování uznatelnosti provedených prací. Rovněž je třeba, aby bylo možné provádět vyhodnocení zpětně a to třeba i s odstupem několika let.

Sledování a vyhodnocování činností a prostojů je náročné na množství informací, které je třeba řádně zadat, zkontrolovat a vyhodnotit. Za tím účelem se jeví jako nezbytné použití **speciální softwarové aplikace**, viz kapitola 4.6.

V této kapitole 7 bude podrobně popsáno, jak vyhodnocovat činnosti a prostoje při ražbách. Vzhledem k rozsáhlosti problematiky byly vybrány pouze některé činnosti – odtěžování (kapitola 7.4) a aplikace stříkaného betonu (kapitola 7.5) – v kterých zavedeme teorii, ukážeme si postupy při vyhodnocování činností a prostojů a dopad na výstavbu. Budou uvedeny příklady z praxe. Pro další činnosti jako např. injektáže, kontrola a výměna řezných nástrojů, instalace ocelových rámů a sítí, instalace svorníků, vrtání čelby, nabíjení a mnohé další platí obdobný princip jako pro výše uvedené dvě činnosti.

Kapitola 7.6 bude věnována zaučovacímu procesu, který nastává u každé činnosti a bude rozebrán konkrétně při činnosti budování prstenců.

V kapitole 7.7 budou uvedeny některé parametry, které se sledujíc při ražbách pomocí tunelovacích strojů a bude provedeno jejich vyhodnocení pomocí statistických metod. Všechna tato data a příklady nám dají náhled do problematiky potřebné pro pochopení predikce harmonogramu ražby (kapitola 8).

7.2 Cyklus ražby

Cyklus ražby sestává z jednotlivých kroků neboli činností, které musí zhotovitel vykonat, aby vyrazil jeden záběr. To se týká všech sledovaných typů ražeb – konvenční, pomocí TBM otevřeného typu a pomocí EPBM.

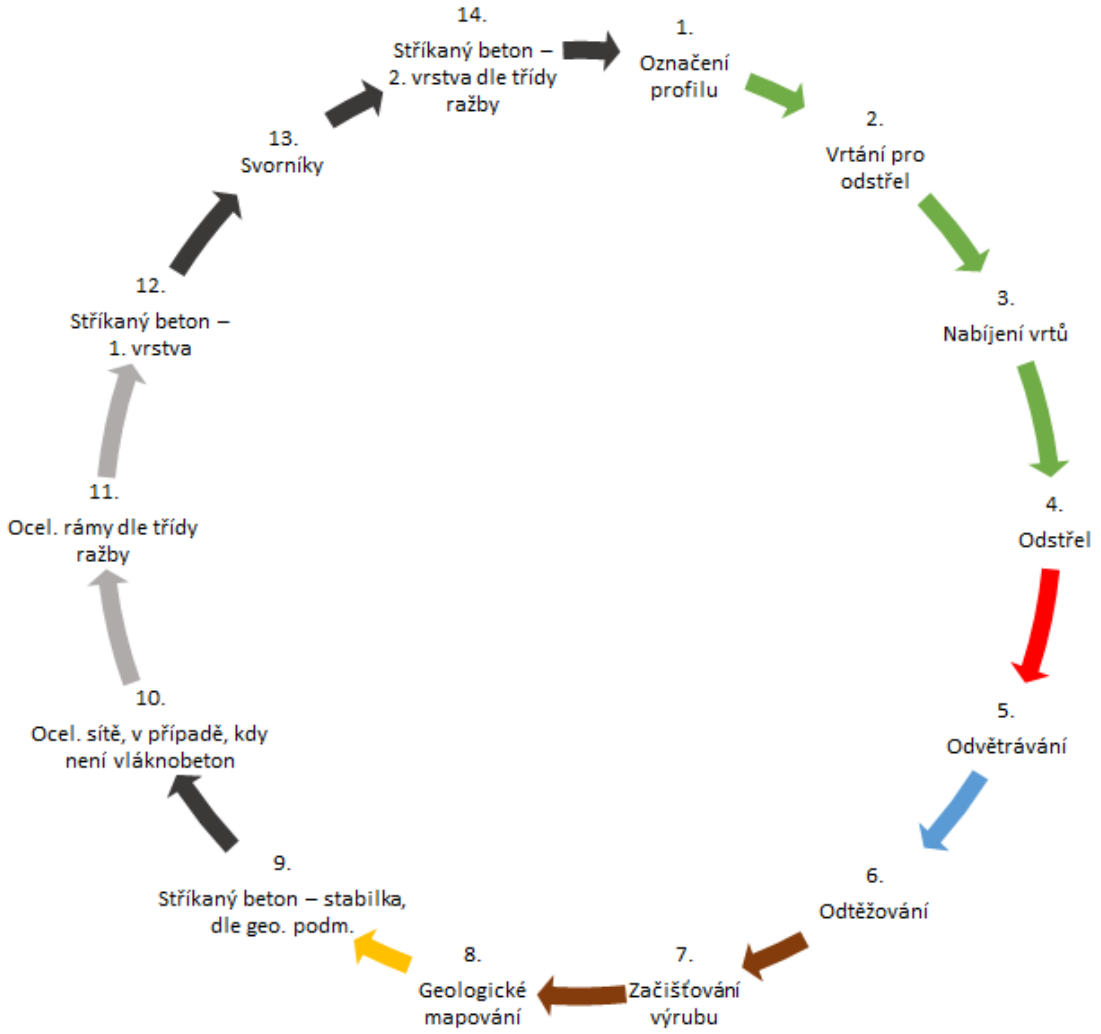
V razícím cyklu je často možné začít s činností na čelbě až po ukončení předchozí činnosti. Jen někdy je umožněn částečný souběh činností jako např. současné vrtání čelby a nabíjení. Plánování sledu činností v průběhu výstavby může velmi zrychlit postup výstavby. Rozhodující pro rychlost výstavby je skladba a trvání činností ležících **na kritické cestě** (viz kapitola 7.3). Čas výstavby je redukován, pokud se některé z činností podaří realizovat souběžně. V takovém případě zůstává na kritické cestě jen jedna z těchto činností a dosahuje se časové úspory.

Kritická cesta

V případě, kdy probíhá více událostí najednou je jen vždy pouze jen jedna z těchto událostí tzv. kritická. Součet časů činností a prostojů ležících na kritické cestě v průběhu trvání jedné směny se vždy rovná přesně časovému trvání směny, např. 12 hodin pro půldenní směny. Softwarová aplikace [1] umožňuje zaznamenávat a vyhodnocovat činnosti na kritické cestě, ale také souhrnně všechny činnosti najednou nebo případně pouze činnosti ležící mimo kritickou cestu.

7.2.1 Cyklus ražby u konvenčních metod

Konvenční metody ražby podzemních děl mají velmi podobný cyklus ražby, který se liší pouze v některých činnostech. Proto bude pro jednoduchost dále ukázán jen cyklus ražby pro metodu D&B, viz schéma na Obr. 7.2. Jedná se o cyklus činností, charakteristický pro určitou technologickou třídu, v které předpokládáme instalaci svorníků, ocelových sítí a rámů a dvou vrstev stříkaného betonu spolu se stabilizační vrstvou. U vyšších/těžších tříd ražby může cyklus sestávat z více činností jako např. instalace rámu, více vrstev ocelových sítí nebo stříkaného betonu, jehel, mikropilotového deštníku nebo deštníku z tryskové injektáže, odčerpávání podzemní vody, instalace drenáže na stěny a klenbu výrubu, zhotovení předvrtů, provedení předinjektáže atd.



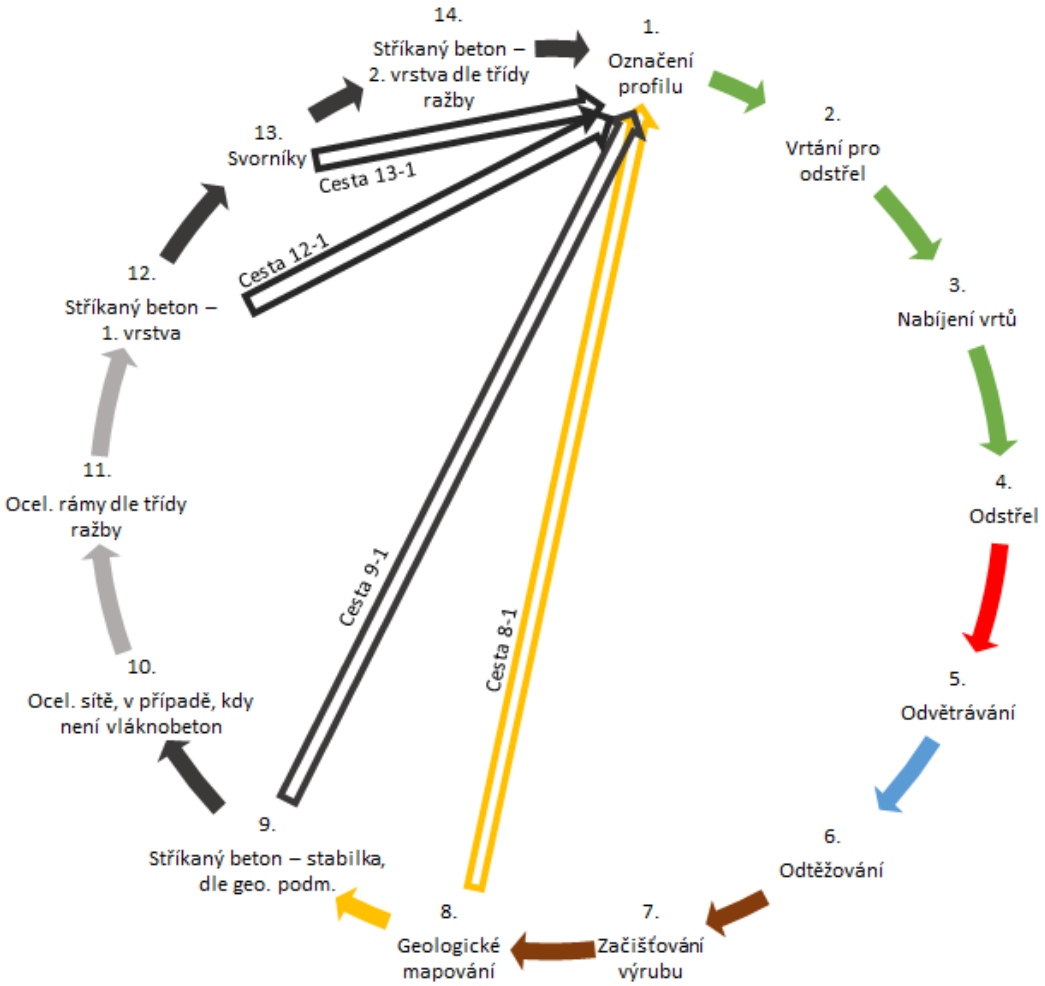
Obr. 7.2 Příklad složení jednoho cyklu ražby metodou D&B; seznam činností na kritické cestě.

Přechod mezi jednotlivými činnostmi, výměna mechanizace a posádek na čelbě vyžadují určitý čas. Nezřídka dochází při změně činností k prostojům, obvykle krátkého trvání. Čas nutný k přípravě a změně činností na čelbě a drobné prostoje v řádu minut s tímto spojené nejsou obvykle odděleně zaznamenávány. Tyto drobné prostoje a/nebo přípravy se tak stávají součástí jednotlivých výše uvedených činností. Je důležité na tyto prostoje nezapomínat, protože v celkovém součtu času a hledání úspor hrají svoji roli.

Zkrácení trvání razícího cyklu je např. možné omezením počtu jeho činností. Pokud lze odložit instalaci některých prvků horninové výztuže tak, aby tyto byly prvky instalovány později v jednom kroku např. po dvou až čtyřech záběrech souvisle najednou, vede takové uspořádání ke zkrácení doby ražby, protože se ušetří čas spojený s výměnou činností na čelbě. Na Obr. 7.3 jsou vyznačeny některé možnosti zkrácení trvání cyklu. V případě použití cesty 8-1 je počet činností v cyklu snížen téměř o polovinu.

Ve skutečnosti se činnosti instalace horninové výztuže nelze zcela vyhnout. V realitě je cesta 8-1 možná jen na tunelových úsecích s velmi kvalitní geologií a v zemích, kde bezpečnostní předpisy nejsou příliš striktní. V tunelářské praxi je doporučováno, a to i v případech velmi dobré kvality horninového masívu, v každém záběru aplikovat

bezpečnostní stabilizační vrstvu stříkaného vláknobetonu alespoň v klenbě. Důvodem je možné rozvolnění horninového masívu v bezprostředním okolí výrubu způsobené odstřelem. Cesta 9-1 představuje snížení počtu činností v cyklu ražby zhruba o 1/3. Takovéto zkrácení cyklu je u úseků ražených ve velmi dobré geologii.



Obr. 7.3 Omezení počtu činností a střídání mechanizace v průběhu jednoho cyklu; činnosti na kritické cestě.

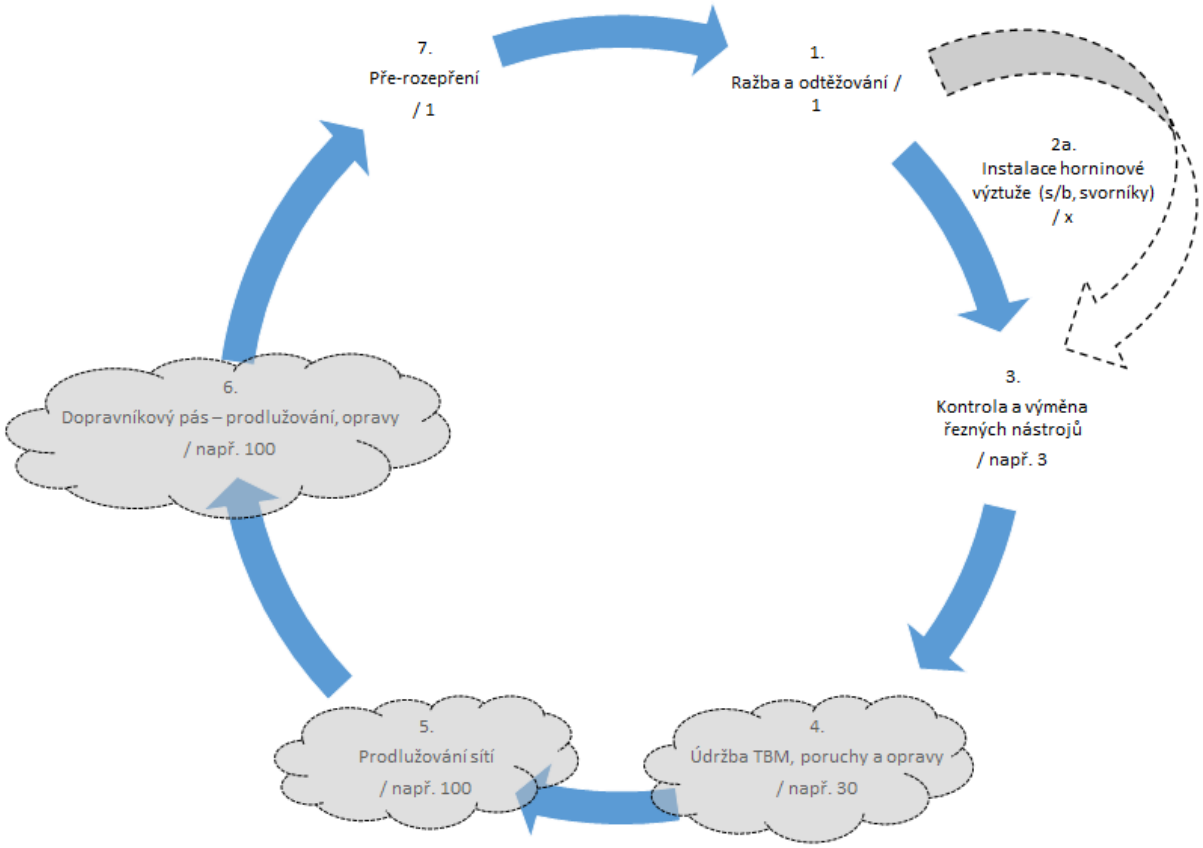
Dalším způsobem optimalizace razícího cyklu je takové uspořádání činností, kdy dochází k jejich současnému vykonávání. To znamená, že některé z činností se zcela nebo částečně přesunou mimo kritickou cestu.

7.2.2 Cyklus ražby na TBM otevřeného typu

Ačkoli je ražba pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů označována jako kontinuální a cyklickou ražbou je nazývána ražba konvenční [49], ve skutečnosti je ražba plnoprofilovými tunelovacími stroji ražbou sestávající z cyklicky se opakujících činností.

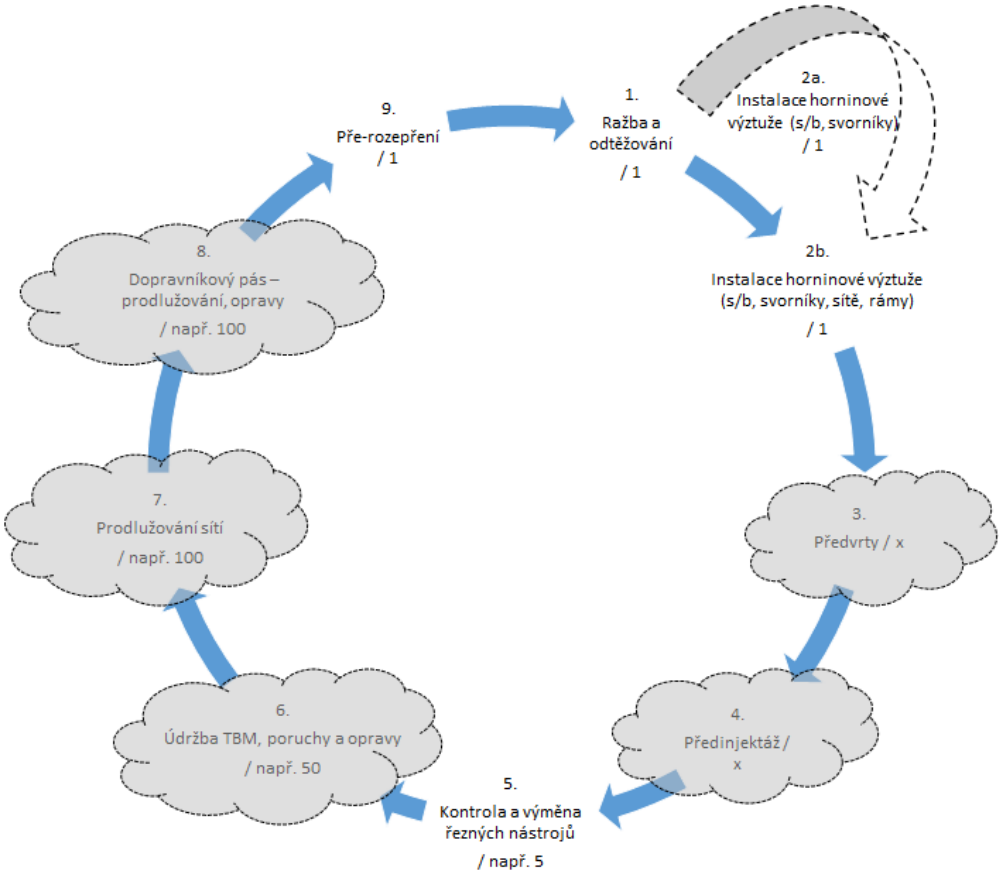
Při ražbě pomocí TBM otevřeného typu se při ražbě v cyklu obvykle opakuje několik málo činností, viz Obr. 7.4. Na schématu je vedle každé činnosti uvedena za lomítkem

frekvence záběrů, kdy je tato činnost realizována. Jedna znamená, že se činnost odehrává v každém záběru, číslo větší než jedna znamená, že se činnost odehrává v každém x-tém záběru.



Obr. 7.4 Příklad složení typického cyklu ražby TBM otevřeného typu při ražbě v nižší třídě horninové výztuže SC; horninová výztuž je instalována v průběhu ražby, tj. mimo kritickou cestu; plné modré šipky ukazují činnosti na kritické cestě, čárkovaná šipka představuje činnost mimo kritickou cestu, činnosti opakujíce se s výrazně nižší četností jsou v šedých bublinách; za lomítkem frekvence záběrů, kdy je činnost realizována.

Ve zhoršených geotechnických podmínkách, vyžadujících instalaci ocelových sítí a rámů a v případě vysokých přítoků podzemní vody vyžadujících předinjektáž, se cyklus může rozšířit o činnosti uvedené na Obr. 7.5. V takových případech již instalace horninové výztuže zasahuje na kritickou cestu. Provedení časově velmi zdlouhavé předinjektáže je vždy na kritické cestě a má výrazný dopad na rychlost výstavby.

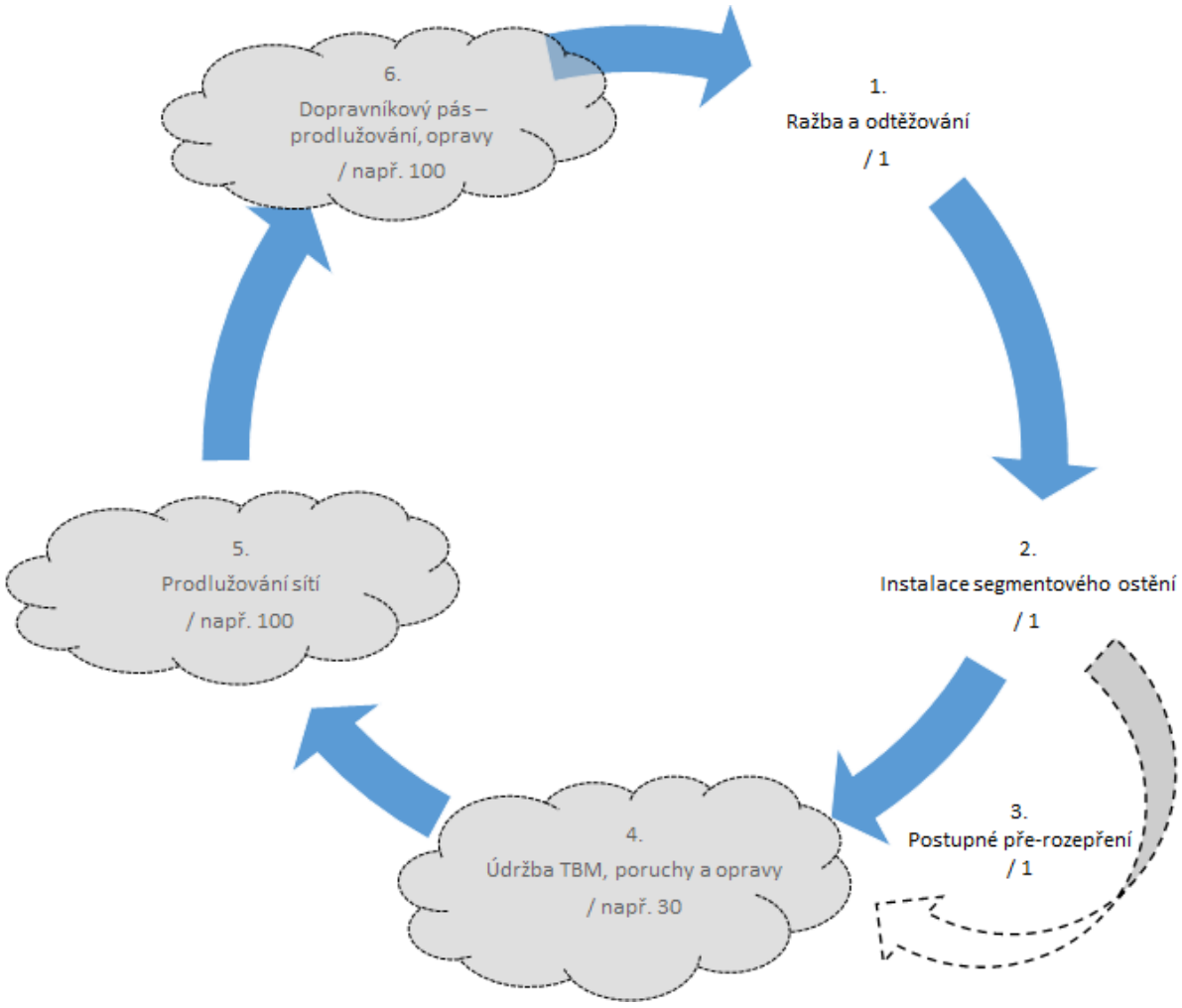


Obr. 7.5 Příklad složení jednoho cyklu ražby TBM otevřeného typu při ražbě ve vyšších/náročnějších třídách SC a s vyššími přítoky podzemní vody, kdy je např. nutno provést předvrty a/nebo předinjektáž; plné modré šipky ukazují činnosti na kritické cestě, čárkovaná šipka představuje činnost mimo kritickou cestu, činnosti opakujíce se s výrazně nižší četností jsou v šedých bublinách; za lomítkem frekvence záběrů, kdy je činnost realizována.

Optimalizaci cyklu ražby plnoprofilovými tunelovacími stroji lze provádět plánováním činností jako např. prodlužování sítí, dopravníkového pásu tak, aby tyto probíhaly souběžně s kontrolou/opravou řezné hlavy a /nebo kontrolou a výměnou řezných nástrojů, jakož i s dalšími pracemi související s údržbou tunelovacího stroje. Je proto vhodné pečlivě plánovat pravidelné odstávky v ražbě, při kterých dojde k simultánnímu provedení nezbytných činností.

7.2.3 Cyklus ražby na EPBM

Činnosti v cyklu ražby pomocí EPBM jsou obdobné jako u ražby pomocí TBM otevřeného typu s tím rozdílem, že se instaluje prefabrikované ostění z jednotlivých segmentů a pře-rozepření tunelovacího stroje probíhá postupně v průběhu instalace ostění, viz Obr. 7.6.



Obr. 7.6 Příklad složení typického cyklu ražby EPBM; pře-rozepření tlačných lisů probíhá postupně v průběhu instalace segmentového ostění, tj. mimo kritickou cestu; plné modré šipky ukazují činnosti na kritické cestě, čárkovaná šipka představuje činnost mimo kritickou cestu, činnosti opakujíce se s výrazně nižší četností jsou v šedých bublinách; za lomítkem frekvence záběrů, kdy je činnost realizována.

U tunelových ražeb typu EPBM se předinjektáže a předvrty provádí výjimečně, protože tyto tunelovací stroje jsou již konstruovány pro ražbu v nepříznivých geotechnických podmínkách. Případná opatření ke zlepšení geotechnických podmínek před čelbou, např. za účelem vstupu do odtěžovací komory a výměny řezných nástrojů, je snahou provádět z povrchu.

Pro optimalizaci cyklu ražby platí, co bylo uvedeno v předcházející kapitole týkající se ražby pomocí TBM otevřeného typu. Optimalizaci cyklu ražby lze provádět plánováním činností jako např. prodlužování sítí, dopravníkového pásu tak, aby tyto probíhaly souběžně s kontrolou/opravou řezné hlavy a /nebo kontrolou a výměnou řezných nástrojů, jakož i s dalšími údržbovými pracemi na tunelovacím stroji. Je proto vhodné pečlivě plánovat pravidelné odstávky v ražbě, při kterých dojde k simultánnímu provedení nezbytných činností.

Při ražbě v souvislém úseku zhoršených geotechnických podmínek je nutné již ve fázi přípravy projektu navrhnout opatření, která zajistí stabilitu horninového masivu tak, aby bylo možné provést kontrolu a výměnu řezných nástrojů v odtěžovací komoře a případné opravné práce. Poslední možností je přístup a práce v odtěžovací komoře pod přetlakem vzduchu, což je velmi náročné a obnáší specifická rizika.

7.3 Produktivity a trvání činností, celkový vztažný čas

Má-li výstavba podzemního díla probíhat efektivně, je také třeba, aby i jednotlivé činnosti ražby byly prováděny efektivně a aby byly minimalizovány prostoje. Pro vyhodnocení skutečné rychlosti ražby a její porovnání s nabídkou je nutné:

- sledovat a zaznamenávat činnosti a prostoje při skutečné ražbě a jejich trvání,
- znát plánované složení činností a jejich trvání z nabídky, odděleně pro jednotlivé třídy ražby a tato aktualizovat s ohledem na skutečně zastižené/aplikované třídy ražby. Výsledkem jsou očekávané produktivity a trvání činností.

Pokud **plánované činnosti ražby** a jejich trvání není v nabídce uvedeno, existuje za určitých okolností způsob, jak **zpětně** takovou informaci získat[5].

V kapitole 4.2 a na Obr. 4.3 bylo ukázáno, jak lze definovat trvání činnosti jako procento celkového času. Celkový vztažný čas lze však uvažovat různými způsoby:

a) **kalendářní čas** – uvažuje všechny dny mezi počátečním a koncovým dnem
b) **pracovní čas** – uvažuje pouze pracovní dny. Nepracovní dny jsou jednoznačně specifikovány. Může se jednat o vyjmenované svátky apod.
c) **speciální smluvní čas** – od pracovního času jsou dále odečteny některé vybrané specializované činnosti jako např. předinjektáž, předvrty výměna směn na tunelovacím stroji apod.[6]

Tyto vztažné časy mají být v nabídkách a smluvní dokumentaci specifikovány a procentuální trvání činností má být navázáno k pracovnímu času. Případně jsou některé vybrané činnosti navázány i na speciální smluvní čas (*2).

[5] Pokud byly v nabídce uvedeny pouze rychlosti ražby v jednotlivých třídách, např. v jednotkách m/den, bez specifikace činností a jejich trvání, lze v některých případech plánované trvání činností získat zpětnou analýzou. K tomu je potřeba, aby byl již vyražen dostatečně dlouhý úsek tunelu, na kterém bylo dosaženo rychlosti ražby odpovídající nabídce pro danou třídu ražby. V takovém případě lze za jistých podmínek trvání činností na tomto úseku považovat za plánované trvání (jedná se o přibližné a nouzové řešení). Zpětnou analýzou autor disertační práce určoval plánovaná trvání činností např. na projektu Ejpovice, viz příloha 5.

[6] Na projektu Kárahnjúkar (příloha 1) bylo procento času, kdy měl tunelovací stroj razit, vztaženo k celkovým pracovním dnům a zároveň také ke speciálním smluvním celkovým dnům. Tyto speciální smluvní dny byly upraveny tak, že se od celkového pracovního času odečítaly v každém pracovním dnu:

1. 2 hodiny (jako čas na výměnu směn na tunelovacím stroji)
2. pokud byly realizovány průzkumné předvrty, tak se započítávaly pouze v případech, kdy jejich celkový čas přesáhl trvání 2 hodiny za den; potom se odečítal pouze čas přesahující 2 hodiny trvání
3. čas spojený s realizací předinjektáží.

Vyhodnocení skutečné využitelnosti tunelovacího stroje se provádělo porovnáním s očekávanou využitelností stanovenou k upravenému speciálnímu smluvnímu času.

Př. 9 Porovnání skutečných a očekávaných trvání činností atd. – projekt Kárahnjúkar

Při ražbě cca 70 km dlouhé soustavy tunelů na projektu podzemní hydroelektrárny Kárahnjúkar byly pravidelně vyhodnocovány činnosti a prostoje při ražbě, viz [8] a příloha 1. V Tab. 7.2 je příklad vyhodnocení ražby cca 3,6 km dlouhého tunelového úseku pomocí TBM otevřeného typu. V tomto případě je vyhodnocení provedeno ke dvěma vztažným časům – pracovnímu (prostřední sloupec) a kalendářnímu (pravý sloupec).

Tab. 7.2 Vyhodnocení skutečných trvání činností a prostojů, rychlostí postupu ražby a dob ražby ke dvěma vztažným celkovým časům – pracovnímu a kalendářním – na cca 3,6 km dlouhém úseku tunelu raženého pomocí TBM otevřeného typu [3].

ACTUAL 24h 24 hours Production & Utilisation

Between Dates: 05/01/2006 - 22/08/2006
(range of Chainages: 19015.15 - 15462.09)
Originally demanded range Between Dates: 05/01/2006 - 22/08/2006

	Statistics w/o Holidays and Sunday's Downtime			Statistics including Holidays and Sunday's Downtime		
Total Time [d] / [hr]:	213.39 / 5121.25	100.00 %		230.00 / 5520.00	100.00 %	
Advance [m]:	3553.07			3553.07		
Daily Advance [m/d]:	16.65			15.45		
Boring Time [hr]: Calc_1 / Calc_2	1170.08	22.85 % / 22.85		1170.08	21.20 % / 21.20	
Net Penetration [m/hr]:	3.04			3.04		
Reported Boring Time [hr]:	1107.38	21.62 %		1107.38	20.06 %	
Total Delays [hr]:	3951.16	77.15 %		4349.66	78.80 %	
Re-Grip [hr]:	130.08	2.54 %		130.08	2.36 %	
Support [hr]:	566.07	11.05 %		566.07	10.25 %	
Cutter Check [hr]:	89.18	1.74 %	Sum:	89.18	1.62 %	Sum:
Cutter Change [hr]:	93.52	1.83 %	247.92	93.52	1.69 %	247.92
Cutter Cleaning [hr]:	65.22	1.27 %	4.84 %	65.22	1.18 %	4.49 %
TBM Maintainance [hr]:	157.50	3.08 %	Sum:	157.50	2.85 %	Sum:
TBM Mech. Breakdown [hr]:	96.93	1.89 %	434.35	96.93	1.76 %	434.35
TBM Elec. Breakdown [hr]:	179.92	3.51 %	8.48 %	179.92	3.26 %	7.87 %
BUS Repairs [hr]:	72.55	1.42 %		72.55	1.31 %	
Tunnel Conveyor Install [hr]:	379.15	7.40 %	Sum:	379.15	6.87 %	Sum:
Tunnel Conveyor Repairs [hr]:	481.20	9.40 %	860.35	481.20	8.72 %	860.35
			16.80 %			15.59 %
Service Extension [hr]:	71.37	1.39 %	Sum:	71.37	1.29 %	Sum:
Other [hr]:	1107.43	21.62 %	1178.80	1107.43	20.06 %	1178.80
			23.02 %			21.36 %
Probing [hr]:	436.22	8.52 %		436.22	7.90 %	
Downtime [hr]:	24.83	0.48 %	Sum:	378.33	6.85 %	Sum:
- not Sunday's Downtime [hr]:	(24.83)	(0.48) %	24.83	(24.83)	(0.45) %	423.33
- Sunday's Downtime [hr]:	(0.00)	(0.00) %	0.48 %	(353.50)	(6.40) %	7.67 %
Holiday [hr]:	0.00	0.00 %		45.00	0.82 %	

Zejména procentuální vyjádření času, kdy probíhala ražba tunelovacím strojem, byl velmi sledovaný údaj. Jedná se o součinitel využitelnosti tunelovacího stroje (anglicky Utilization Factor, UF). Pravidelně se počítaly skutečně dosažené hodnoty UF ve vztahu ke speciálně nastavenému smluvnímu času. Speciální smluvní čas zohledňoval trvání předvrtů, předinjektáží a výměnu pracovních směn, viz Tab. 7.3.

Tab. 7.3 Různé součinitele využitelnosti tunelovacího stroje UF v závislosti na speciálním smluvním vztažném vztahu. Rozhodující v těchto případech byl první řádek v 22h-p, tj. UF=26% [3].

Notes:
This statistics take into account only time without holidays and without Sunday's downtimes.
Calculation_1 of Boring Time is based on data from Clock Counters and Override values.
Calculation_2 of Boring Time takes Boring Time as difference between Total Time and Total Delays.
Reported Boring Time is based straight on values inputted into database in correspondent field.

Type of Actual Utilisation	Actual Utilisation (%)
24h-p	
24h-p Utilisation based on Boring Time calculation_1 and 24h shift w/o probing per day as max as acc to the Contract [%]:	23.81
24h-p Utilisation based on Boring Time calculation_2 and 24h shift w/o probing per day as max as acc to the Contract [%]:	23.81
24h-p Utilisation based on Reported Boring Time and 24h shift w/o probing per day as max as acc to the Contract [%]	22.54
22h-p	
22h-p Utilisation based on Boring Time calculation_1 and 22 hours shift w/o probing time per day as max as acc to the Contract [%]	26.00
22h-p Utilisation based on Boring Time calculation_2 and 22 hours shift w/o probing time per day as max as acc to the Contract [%]	26.00
22h-p Utilisation based on Reported Boring Time and 22 hours shift w/o probing time per day as max as acc to the Contract [%]	24.61

Skutečně dosažené hodnoty se porovnávaly s očekávanými. V Tab. 7.4 jsou uvedeny očekávané hodnoty pro 3,6 km dlouhý tunelový úsek, který byl shodný s výše uvedeným úsekem. Z tabulky jsou mimo jiné patrné dva podstatné údaje:

a) Skutečně potřebný čistý čas ražby 1170 hodin pro vyražení tohoto 3,6 km dlouhého úseku byl o cca 150 hodin menší než očekávaný 1318,9 hodin. Důvodem je, že skutečná dosažená čistá penetrační rychlost NPR byla vyšší než očekávaná (3,04 m/h > 2,69 m/h).

b) Skutečné procentuální zastoupení čistého času ražby UF bylo výrazně nižší oproti očekávanému (26,0% < 48,74%). V tomto případě byly důvodem zejména prostoje způsobené poruchami dopravníkového pásu. Ačkoli jeho délka přesáhla 10 km, tak se zhotovitel rozhodl ušetřit čas s instalací přídavného pohonu (booster) a místo toho dokončit ražbu zbývajících cca 4 km. V důsledku toho docházelo k přetrhávání dopravníkového pásu a jeho časově velmi náročnému spojování.

Výsledkem výše uvedeného bylo, že ačkoli bylo ve skutečnosti dosaženo vyšší čisté penetrační rychlosti, tak ražba 3,6 km dlouhého úseku byla opožděna o cca 100 dní (= 213,4 - 112,8) a to zejména z důvodů poruch dopravníkového pásu, pomalé instalaci horninové výztuže a dalším prostojům.

Tab. 7.4 Očekávané hodnoty trvání činností, čisté penetrační rychlosti NPR, rychlostí postupu ražby a dob ražby ke dvěma speciálním smluvním vztažným celkovým časům – a) uvažujícím trvání realizace předvrtů v jejich očekávaném trvání (prostřední sloupec), b) skutečná doba realizace předvrtů (pravý sloupec). Cca 3,6 km dlouhý úseku tunelu ražený pomocí TBM otevřeného typu [3].

EXPECTED

24h 24 hours Production & Utilisation

Between Dates: 05/01/2006 - 22/08/2006

Expected last day: 16/05/2006; see notes.

(range of Chainages: 19015.15 - 15462.09)

Originally demanded range Beteen Dates: 05/01/2006 - 22/08/2006

Calculation for "working" time (holidays and downtime are not included).	with Expected Probing Time		with Actual Probing Time as max Day Expected Probing Time	
Expected "Working" Total Time [d] / [hr]:	114.54 / 2748.85	100.00 %	112.76 / 2706.16	100.00 %
Advance [m]:	3553.07		3553.07	
Expected Daily Advance [m/d]:	31.02		31.51	
Expected Boring Time [hr]:	1318.93	47.98 %	1318.93	48.74 %
Expected Net Penetration [m/hr]:	2.69		2.69	
Expected Total Delays [hr]:	1429.91	52.02 %	1387.22	51.26 %
Expected Regripping [hr]:	148.76	5.41 %	148.76	5.50 %
Expected Support [hr]:	46.89	1.71 %	46.89	1.73 %
Expected Cutter Time [hr]:	139.33	5.07 %	139.33	5.15 %
Expected Repair TBM [hr]:	217.31	7.91 %	217.31	8.03 %
Expected Repair Back-Up [hr]:	130.91	4.76 %	130.91	4.84 %
Expected Utilities Extension [hr]:	169.91	6.18 %	169.91	6.28 %
Probe Hole [hr]:	249.87	9.09 %	207.18	7.66 %
Expected Other [hr]:	326.93	11.89 %	326.93	12.08 %

Softwarová aplikace [3] prováděla automaticky různá porovnání pro uživatelem vybrané tunelové úseky a generovala data pro speciální reporty jako např. na Obr. 5.3.

Při podávání nabídky je jednou z povinností budoucího zhotovitele zpracovat časový harmonogram ražby tunelu. Úroveň, do jakých podrobností má být časový harmonogram ražby tunelu zpracován, se v praxi velmi liší. Nezřídka se v nabídkách objevuje resp. je požadován pouze harmonogram tvořený počátečním a koncovým datem ražby a plánovanými rychlostmi ražby v jednotlivých třídách. Taková informace není dostačující. V dalších kapitolách bude na příkladech doloženo, proč je tato jednoduchá specifikace nedostatečná.

Harmonogram obsažený v nabídce by měl obsahovat minimálně níže uvedené údaje.

1. Plánovaný počáteční (DATE $START_{PLANNED}$) a koncový den (DATE $END_{PLANNED}$) ražby tunelu a odtud vyplývající počet kalendářních dnů ražby (CALENDAR $DAYS_{PLANNED}$). Počet dnů, kdy se plánuje práce (WORKING $DAYS_{PLANNED}$) a počet plánovaných nepracovních dnů (NON-WORKING $DAYS_{PLANNED}$) jako např. prázdniny a odstávky. Platí následující vztahy.

$$\text{CALENDAR DAYS}_{PLANNED} = \text{DATE END}_{PLANNED} - \text{DATE START}_{PLANNED} + 1$$
$$\text{CALENDAR DAYS}_{PLANNED} = \text{WORKING DAYS}_{PLANNED} + \text{NON-WORKING DAYS}_{PLANNED}$$

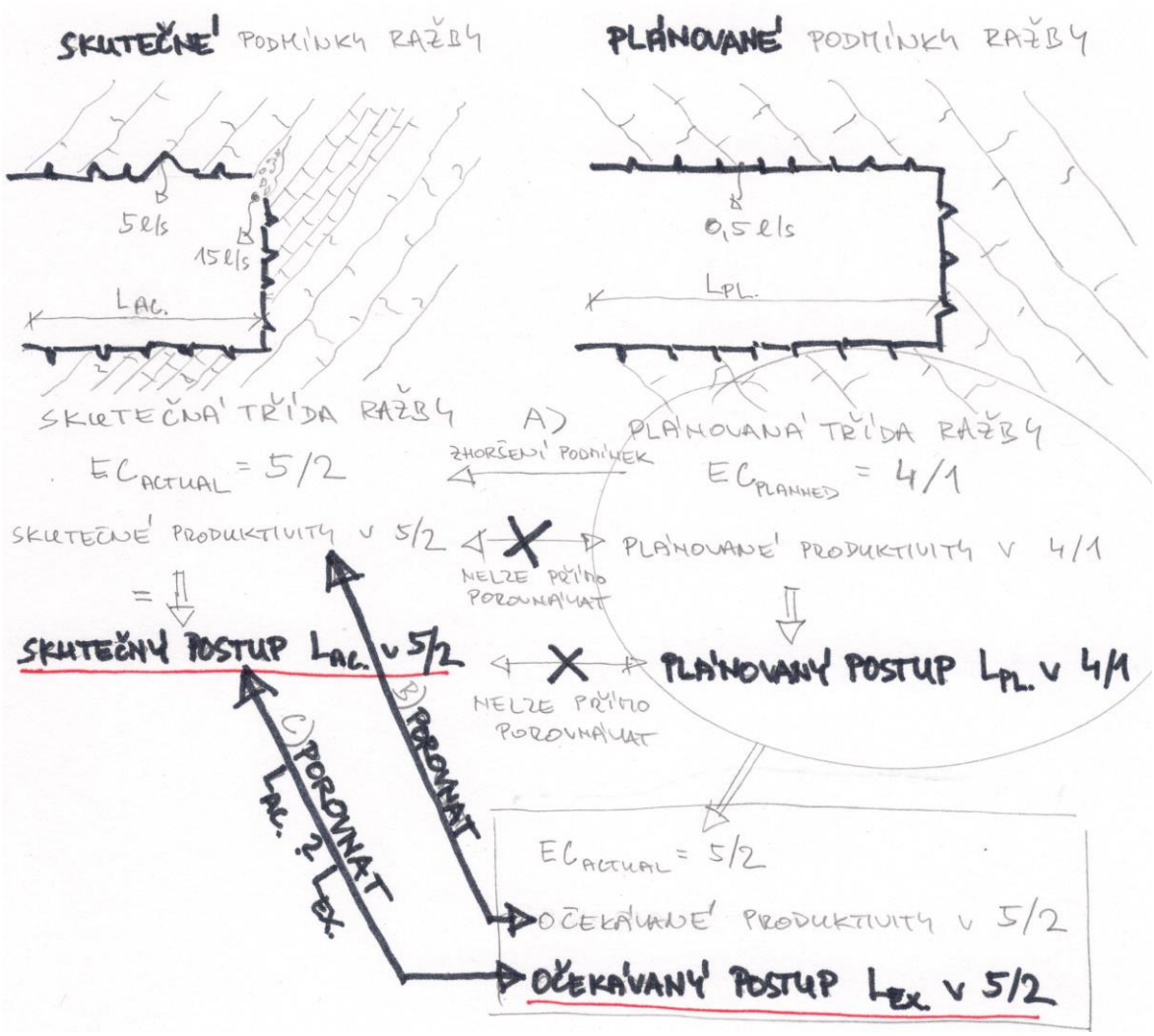
2. Celkový počet nepracovních dnů (NON-WORKING $DAYS_{PLANNED}$) a jejich plánovanou skladbu tj. počet dnů tvořených svátky ($HOLIDAYS_{PLANNED}$), plánovaným zastavením prací jako např. firemní volno okolo svátků, plánované exkurze výstavby tunelu většího rozsahu nebo jeho slavnostní prorážky apod. ($DOWNTIME_{PLANNED}$). Nepracovní dny mohou být z důvodu na straně zhotovitele nebo případně i objednatele. Je vhodné odhadnout jejich počet již v nabídce.

$$\text{NON-WORKING DAYS}_{PLANNED} = \text{HOLIDAYS}_{PLANNED} + \text{DOWNTIME}_{PLANNED}$$

3. Celkový počet pracovních dnů (WORKING $DAYS_{PLANNED}$) spolu s plánovanou skladbou činností (procentuálními zastoupeními).

4. V nabídkách obvykle uváděnou rychlost postupu ražby ($AS_{PLAN,i}$) pro jednotlivé třídy ražby v jednotkách m/den je vhodné při provádění posuzování efektivity ražby převést na inverzní veličinu trvání ražby 1 bm tunelu. Jak bude dále demonstrováno, při posuzování např. efektivity ražby nebo víceprací bývá použití trvání postupu ražby v hod/m vhodnější.

Pokud máme seznam a trvání plánovaných činností, je posléze v průběhu ražby možné porovnávat skutečně dosažené výkony (ACTUAL) s výkony určenými na základě nabídky. Pro účely porovnání je nutné plánované výkony (PLAN) aktualizovat tak, aby reflektovaly skutečně zastižené třídy ražby. Touto aktualizací se z plánovaných výkonů stanou očekávané (EXPECTED), viz schéma na Obr. 7.7.



Obr. 7.7 Schéma porovnání očekávaného a skutečného postupu ražby. Důvod, proč je nutno použít očekávané produktivity.

V dalších kapitolách je podrobně popsán postup vyhodnocení efektivity provádění činností ražby a jsou uvedeny příklady z praxe.

7.4 Trvání a produktivita při činnosti odtěžování

7.4.1 Úvod

Odtěžování rubaniny z podzemního díla, představuje dopravu rubaniny těžkou technikou, obvykle nakladači a dampry nebo kolejovými důlními vozy a/nebo pomocí pásových dopravníků z čelby tunelu na skládku rubaniny.

V prvním případě, odtěžování těžkou technikou, se jedná o přerušované odtěžování. Toto bývá nejčastěji používané při ražbách konvenčních. Druhý případ – odtěžování pásovými dopravníky – představuje nejčastěji kontinuální odtěžování, které je používané zejména při ražbách plnoprofilovými tunelovacími stroji.

U některých ražeb se může ukázat jako výhodná kombinace výše uvedených způsobů. Může se jednat například o uspořádání při konvenčních ražbách, kdy se razí na několik čeleb s přerušovaným odtěžováním a rubanina je odvážena na mezideponii, umístěnou např. v některé jiné části tunelu. Z mezideponie je potom rubanina dopravována dopravníkovým pásem na povrch. Při takovém uspořádání odtěžování je nutné před dopravníkový pás osadit drtičku tak, aby rubanina byla vhodně upravena pro přepravu po dopravníkovém pásu. Jiným případem může být uspořádání při ražbě pomocí tunelovacích strojů, kdy je rubanina z čelby odtěžována dopravníkovým pásem do prostoru za tunelovací stroj a odtud dále kolejovými důlními vozy na povrch.

Za zmínění jistě stojí relativně často používaný způsob odtěžování do jiné volné části podzemního díla, tzv. mezideponie. Může se jednat o řešení vhodné v případech, kdy je nedostatek damprů na čelbě. Zkrácením vzdáleností mezi čelbou a mezideponií se sníží nutný počet damprů. Odtěžování z mezideponie poté probíhá mimo kritickou cestu a nezpomaluje tak rychlost ražby tunelu. Takové řešení s sebou nese určité zvýšené náklady z důvodu přidané překládky rubaniny.

V dalším textu bude rozebírána pouze metoda přerušovaného odtěžování pomocí nakladačů a damprů. Hlavním důvodem je, že tento relativně jednoduchý proces je v praxi často zanedbáván[7] a na stavbách způsobuje vlivem nižší produktivity a prostojů komplikace s plněním harmonogramu ražeb.

Produktivita odtěžování

Produktivita odtěžování je ovlivněna zejména počtem a výkonem nakladačů. Pokud to rozměr výrubu umožňuje, tak je v některých případech vhodné nasadit na čelbu více než jeden nakladač, viz Obr. 7.8. V takovém případě je produktivita odtěžování zvýšena, což vede ke zkrácení odtěžovacího času, v daném konkrétním případě až o 35 %. Celková doba razicího cyklu je tím snížena a dochází ke zrychlení výstavby a ušetření celkových cenových nákladů i při zahrnutí ceny za jeden nakladač navíc.

[7] Při odtěžování, tomto relativně jednoduchém procesu, je v tunelu spousta prachu, vysoká teplota, riziko úrazu atd. Tzn. že panují podmínky, ve kterých se nikdo nerad vyskytuje. Různé prostoje se často nezaznamenávají odděleně, ale stávají se součástí činnosti odtěžování.

Obr. 7.8 Odtěžování za pomocí dvou nakladačů, které současně nakládaly rubaninu na dumpry. Šířka výrubu 11 m.

Proces odtěžování je tím více efektivní, čím více se nakladač věnuje samotnému nakládání rubaniny. K tomu je zejména nutné, aby dampry byly nepřetržitě[8] k dispozici na čelbě pro nakládku. V praxi však dochází k tomu, že dampry z různých důvodů nejsou na čelbě nepřetržitě k dispozici nebo nakladač nemůže nepřetržitě nakládat. Nejvíce časté důvody jsou následující.

- Nedostatečný počet damprů

  V případě nevyužití mezilehlé dočasné mezideponie je počet damprů odvozen od času potřebného pro jeden dampr k překonání vzdálenosti mezi čelbou a deponií, složením materiálu a návratem na čelbu. Počet damprů by měl být takový, aby k nakládání docházelo téměř nepřetržitě bez zbytečných prostojů způsobených čekáním na další volný dampr. Více v samostatném odstavci „Počet damprů“ níže.

- Zkušenost a motivace posádek

  Toto platí o jakékoli činnosti. Na Obr. 7.9 je vidět, jak se nákladní vozidlo otáčí v tunelu, aby mohlo nacouvat k čelbě. Problém v tomto případě spočíval v tom, že tato otočka byla provedena v čase, kdy na čelbě nebylo k dispozici vozidlo pro nakládku, přičemž otočka mohla být provedena v předstihu

[8] Pozn.: Odtěžování pomocí nakladačů a damprů představuje přerušovaný proces. Pro účely této práce je termín nepřetržitý použit pro stav, kdy jsou na čelbě vždy dostupné dampry pro nakládku rubaniny nakladačem a nedochází tak k prostojům z důvodu čekání nakladače na dampr.

a mimo kritickou cestu, tj. v čase, kdy bylo nakládáno předchozí vozidlo. Řidiči nákladních vozidel však dávali přednost tomu, otáčet se bezprostředně před čelbou po odjezdu předchozího naloženého vozidla. Tím umístili tuto otočku a couvání k čelbě trvající 1 minutu na kritickou cestu. Při uvážení počtu těchto otoček v jednom záběru, cca 30, se jednalo o prodloužení razícího cyklu o půl hodiny na jeden záběr. U zhotovitele motivovaného k podání maximálního výkonu by k takovéto prodlevě nedocházelo.

Obr. 7.9 Otáčení nákladního vozidla v tunelu před nacouváním k čelbě za účelem naložení rubaniny.

Tento příklad je uveden i z jiného důvodu. Demonstruje totiž skutečnost, že velmi krátké zpoždění se stává kritickým v případech jeho četného opakování. Např. pro tunel délky 5 km s průměrnou délkou jednotlivých záběrů 2,5 m by výše uvedený jednominutový prostoj při každém najetí dampru k čelbě představoval po ukončení ražeb časové zpoždění v délce 42 dní (= 5000 / 2,5 x 1 x 30 = 60 000 minut = 42 dní). Takové zpoždění poté může představovat nárůst nákladů výstavby i přes jeden milión EUR zejména z důvodů fixních denních nákladů (např. u větších projektů s pevnými denními náklady několik desítek tisíc EUR). Další významný dopad na cenu, pokud je tunel na kritické cestě výstavby celého projektu, je způsoben opožděným uvedením díla do provozu. Vyplatí se proto všechny prostoje včetně „zanedbatelných“ a opoždění pečlivě monitorovat, vyhodnocovat a snažit se ražbu optimalizovat tak, aby k nim docházelo jen minimálně.

- Vzduchotechnika a osvětlení

  Přívod čerstvého vzduchu na čelbu v dostatečném množství je nezbytnou podmínkou k tomu, aby nakládání na čelbě probíhalo efektivně. Při odtěžování rubaniny hluboko v tunelu dochází k nárůstu prašnosti a teploty. Při pracích v prostředí, kde se teplota pohybuje přes 35 °C, s vysokou vlhkostí a prašností dochází v případech, kdy nakladače nemají klimatizované kabiny,

brzy k vyčerpání jejich posádek. Tyto pak přerušují práci nebo v horším případě omdlévají.

Zvýšená prašnost a nedostatečné osvětlení jsou bezpečnostním rizikem a snižují významně efektivitu odtěžování, viz
Obr. 7.10.

Obr. 7.10 Vlevo: Odtěžování na projektu Neelum-Jhelum: nedostatečné osvětlení čelby pouze pomocí nakladačů, co není vidět – nedostatečná vzduchotechnika, vysoká prašnost, teplota 45 °C, špatný stav počvy; Vpravo: odtěžování na projektu Považský Chlmec: dobré osvětlení čelby, lutna vzduchotechniky přivedena do blízkosti čelby, běžná teplota, upravená počva.

- Použitá mechanizace a její stav

  Zhotovitel by měl na stavbu tunelů používat mechanizaci v souladu s jeho nabídkou. Součástí smlouvy o dílo má být typ mechanizace, její kvalita a počet prostředků, které zhotovitel plánuje nasadit pro ražbu. Skutečností je, že mechanizace nezřídka neodpovídá podané nabídce a je méně kvalitní a/nebo je jí nedostatečné množství. Již citovaný Obr. 7.9 ukazuje, že použitá mechanizace pro odtěžování sestávala na daném projektu z nákladních vozidel méně vhodných pro použití do tunelu v porovnání s v nabídce uvedenými dampry (poloměr otáčení, výkon, poruchovost apod.).

  Mělo by být úkolem účastníků výstavby stav mechanizace monitorovat, rozdíly s nabídkou identifikovat a určovat dopad na rychlost ražby a harmonogram. V praxi tento (více)úkol často připadá supervizi.

- Stav počvy

  Počva v celé délce tunelu by měla být pravidelně upravována tak, aby neomezovala přepravní rychlosti a bezpečnost. Špatně udržovaná počva má za následek vyšší poruchovost mechanizace a snížení produktivit u činností, zejména u odtěžování. Účastníci výstavby by měli mít na paměti, že jakékoli

drobné zpoždění se stává kritickým při jeho častém opakování, viz výše uvedený příklad s otáčením vozidel.

Dalším faktorem, který může snižovat produktivitu odtěžování, je přítomnost podzemní vody. V horších případech způsobuje voda zvýšenou lepivost hornin. Na Obr. 7.11 je uveden příklad uvíznutí tunelbagru na čelbě a jeho pracné vytahování, které způsobilo prostoj na kritické cestě v trvání cca 6 hodin.

Obr. 7.11 Uvíznutí tunelbagru na čelbě v lepivé rubanině.

- Přetížení vozidel

  Nakládání více rubaniny na nákladní vozidla než je doporučeno nemusí představovat jen bezpečnostní riziko při dopravě, viz Obr. 7.12, ale může způsobovat prostoje z důvodů jako např. vyprošťování uvíznutého nákladního vozidla v tunelu ve stoupání. Takové případy se stávaly na jednom z projektů, kde byli řidiče subdodavatele placeni za váhu přivezeného materiálu na skládku.

Obr. 7.12 Množství rubaniny na nákladním vozidle přesahující rozumnou míru; navíc chybí zadní sajtna.

Počet damprů

V případě, kdy zhotovitel nepoužívá dočasnou mezideponii v tunelu, lze nutný počet damprů odvodit z následujících údajů:

- trvání jednoho odtěžovacího cyklu jednoho dampru (od jeho naložení na čelbě – odjezd z tunelu na skládku – vyložení – příjezd do tunelu a přistavení na čelbu),
- trvání nakládky dampru,
- trvání úpravy počvy a rubaniny nakladačem na čelbě.

Pokud by například cyklus jednoho dampru od čelby na skládku a zpět k čelbě trval 15 minut, nakladač by provedl nakládku dampru za 2,5 minuty a další 0,5 minuty by v průměru potřeboval pro úpravu počvy a rubaniny před příjezdem dalšího dampru, tak by bylo potřeba celkem 5 damprů (= 15 / (2,5 + 0,5)) pro zajištění nepřetržité nakládky.

Jakkoli je tento výpočet jednoduchý, je faktem, že počet damprů bývá v praxi často nedostatečný pro zajištění nepřetržité nakládky rubaniny na čelbě a její odvoz. Je proto velmi důležité, aby byl zhotovitel motivován výkonově a aby v takových případech upravil organizaci odtěžování. Například v případech, kdy není dampr k dispozici na čelbě, může zhotovitel ukládat rubaninu na dočasnou mezideponii v tunelu (pokud je k tomu vyhrazeno místo). Posléze lze rubaninu z dočasné mezideponie odtěžit, ale to se děje již mimo kritickou cestu.

Trvání odtěžování

Při nepřetržité dostupnosti damprů na čelbě lze trvání odtěžování zjistit z následujících údajů:

- Objem rubaniny k odtěžení: Vrub

$$Vrub = kn \times (L \times Avyr + Vnad) \qquad \text{Rovnice 34}$$

kde
kn – koeficient nakypření rubaniny oproti rostlému stavu (obvykle 1,3 – 1,6)
L – délka záběru
Avyr – teoretická plocha výrubu včetně všech nadvýšení, limitů a tolerancí
Vnad – objem nadvýlomů

- Objem lžíce nakladače: VL

- Počet lžic nutných k naložení jednoho dampru: nL

- Trvání nakládky jednoho dampru: Td

- Trvání úpravy počvy a rubaniny nakladačem na čelbě: Tu

Příklad výpočtu potřebného počtu damprů, teoretického trvání odtěžování a porovnání se skutečností, jakož i další příklady týkající se problematiky odtěžování, jsou uvedeny v kapitole 7.4.3.

Na některých projektech docházelo k prodloužení razicího cyklu o pět a více hodin na jeden záběr z důvodu nedostatečného počtu damprů a/nebo nevhodné organizace odtěžování, případně i z jiných důvodů. V Př. 10 jsou uvedeny extrémní případy trvání odtěžování – deset a více hodin – v jednom cyklu ražby vypočtené jako průměrné hodnoty za jeden měsíc. Tyto hodnoty vícenásobně překračují obvyklou a očekávanou délku trvání odtěžování. V takových případech dochází nejen k významnému zpomalení rychlosti ražby a prodloužení doby výstavby, ale také může docházet k nárůstu rizika tvorby nadvýlomů, zvýšenému rozvolnění horninového masivu v čase, nutnosti aplikace těžší horninové výztuže, resp. vyšších tříd vyztužení SC z těchto důvodů atd.

7.4.2 Teorie

Teoretická produktivita $P_{TEOR,OD}$a trvání $T_{TEOR,OD}$, plánovaná produktivita $P_{PLAN,OD}$ a trvání $T_{PLAN,OD,}$ skutečná produktivita $P_{SKUT,OD}$ a trvání $T_{SKUT,OD}$ činnosti odtěžování, specifikované níže, jsou závislé na specifických a obecných parametrech. Tyto parametry jsou pro přerušované odtěžování pomocí nakladačů a damprů uvedeny a podrobně popsány dále v textu.

$P_{TEOR,OD}$ Jedná se o teoretickou maximální produktivitu odtěžování danou strojní sestavou, specifikovanou v nabídce a ve smlouvě o dílo. Lze uvádět v jednotkách m^3/h.

$T_{TEOR,OD}$ Trvání činnosti odtěžování při maximální teoretické produktivitě. Platí, že fod = 1,0.

$f_{PLAN,OD}$ Plánovaný koeficient vlivu na produktivitu, který může nabývat hodnot z intervalu (0, 1)

$P_{PLAN,OD}$ Jedná se o plánovanou produktivitu odtěžování vycházející z použití plánované strojní sestavy, ze zkušeností zhotovitele a jeho plánu. Určuje se v čase podání nabídky a stává se závaznou uzavřením smlouvy o dílo.

$T_{PLAN,OD}$ Plánované trvání činnosti odtěžování při použití plánovaného koeficientu vlivu $f_{PLAN,OD}$. Mělo by platit $f_{PLAN,OD} < 1,0$.

$P_{SKUT,OD}$ Jedná se o skutečnou produktivitu odtěžování určenou při výstavbě ze změřeného trvání činnosti a skutečných objemů.

$T_{SKUT,OD}$ Skutečné trvání činnosti odtěžování, které lze přesně měřit. Zpětně lze odvozovat s určitou mírou nepřesnosti vliv jednotlivých koeficientů $f_{SKUT,OD,i}$.

$f_{SKUT,OD}$ Skutečný koeficient vlivu na produktivitu, pro který obvykle platí $f_{SKUT,OD} < 1,0$. Koeficienty vlivu můžou měnit svoji hodnotu v čase. Pro zjednodušení je budeme uvažovat průměrnými hodnotami za každý záběr. Koeficient může být větší než 1,0, pokud se použije mechanizace s vyšší produktivitou, než bylo plánováno v nabídce.

$Z_{SKUT,OD}$ Skutečné zpoždění dané tím, že obvykle $f_{SKUT,OD} < 1,0$. Může nastat situace, spíše ve výjimečných případech, že $f_{SKUT,OD} > 1,0$. Příčinou může být změna mechanizace na výkonnější oproti mechanizaci specifikované v nabídce.

Pro produktivity a trvání odtěžování platí následující vztahy.

$$P_{PLAN,OD} = P_{TEOR,OD} \times f_{PLAN,OD}$$ Rovnice 35

$$P_{SKUT,OD} = P_{TEOR,OD} \times f_{SKUT,OD}$$ Rovnice 36

$$Z_{PLAN,OD} = T_{PLAN,OD} - T_{TEOR,OD}$$ Rovnice 37

$$Z_{SKUT,OD} = T_{SKUT,OD} - T_{TEOR,OD}$$ Rovnice 38

Jednotlivé koeficienty vlivu na produktivitu fod_i nabývají obvykle hodnot z intervalu <0, 1>. Při hodnotě 1 není žádný vliv na teoretickou produktivitu, naopak hodnota 0 by znamenala, že činnost neprobíhá. Zod_i znamená zpoždění způsobené jedním daným konkrétním vlivem/činitelem. Může se jednat o průměr za více záběrů např. ve stejné třídě ražby apod.

Pro koeficient celkového vlivu platí

$$f_{SKUT,OD} = \frac{T_{TEOR,OD}}{T_{SKUT,OD}} = \frac{T_{TEOR,OD}}{T_{TEOR,OD} + Z_{SKUT,OD}}$$

Rovnice 39

Pro jednotlivé dílčí koeficienty vlivu platí

$$f_{SKUT,OD_i} = \frac{T_{TEOR,OD}}{T_{TEOR,OD} + Zod_i}$$

Rovnice 40

Tyto rovnice platí i pro plánované hodnoty $f_{PLAN,OD,i}$.

Pro jednotlivá dílčí zpoždění platí, že

$$Zod_i = \left(\frac{1}{fod_i} - 1\right) \times T_{TEOR,OD}$$

Rovnice 41

Jednotlivé koeficienty vlivů lze přímo násobit mezi sebou a získat tak výsledný koeficient vlivu na odtěžování. V praxi je vhodný i opačný postup, kdy teoretické trvání odtěžování je relativně dobře známé, skutečné trvání odtěžování je přesně změřené a zpětně se stanovují koeficienty vlivu jednotlivých činitelů. Vlivy na jakoukoli činnost lze rozdělit na 1) specifické a 2) obecné. Níže je uveden jejich výčet, který však nemusí být konečný.

1. Specifické vlivy, parametry, produktivity, trvání a zpoždění týkající se přerušovaného odtěžování pomocí nakladačů a damprů jsou uvedeny níže.

fod,s Koeficient celkového vlivu specifických parametrů na $T_{TEOR,OD}$. Platí, že

$$fod,s = fod,s_1 \; x \; fod,s_2 \; x \; fod,s_3 \; x \; fod,s_4 \; x \; fod,s_5 \; x \; fod,s_6$$

Rovnice 42

Zod,s Pro celkové zpoždění odtěžování dané specifickými vlivy platí:

$$Zod,s = \sum_{i=1}^{6} Zod,s_i$$

Rovnice 43

fod,s_1 Vliv nakypření rubaniny, resp. převrácená hodnota koeficientu nakypření rubaniny. Horninový masiv má v rostlém stavu nižší objem než ve stavu po jeho rozpojení. Koeficient nakypření se nejčastěji pohybuje v rozmezí 1,3 až 1,6 v závislosti na materiálu, kvalitě rozpojování apod. V této disertační práci je pro jednoduchost koeficient nakypření uvažován hodnotou 1,5.

Zod,s_1 Zpoždění dané vlivem nakypření rubaniny.

fod,s_2 Koeficient vlivu kvality, zkušenosti a motivace operátorů nakladačů a damprů na $PROD_{TEOR,OD}$. Operátoři by měli být zkušení pro práci v podzemí a měli by být patřičně motivovaní. Někdy se může výrazně lišit motivace denních a nočních směn.

Zod,s_2 Zpoždění dané vlivem méně kvalitních, nezkušených a/nebo nemotivovaných operátorů nakladačů a damprů.

fod,s_3 Nevyužití objemových kapacit damprů a nakladačů při odtěžování a vliv na $PROD_{TEOR,OD}$.

Zod,s_3 Zpoždění dané vlivem nevyužití objemových kapacit damprů a nakladačů.

fod,s_4 Zvýšená lepivost rubaniny. Důsledkem může být zpomalení odtěžování – nakládka, úprava povrchu u čelby, vykládka.

Zod,s_4 Zpoždění dané vlivem zvýšené lepivosti rubaniny.

fod,s_5 Vliv přerušení odtěžování v důsledku nutnosti okamžité instalace, i opakovaně, s/b z důvodu nepříznivých geotechnických podmínek na čelbě.

Zod,s_5 Zpoždění dané přerušením/přerušováním odtěžování v důsledku nutnosti okamžité aplikace s/b z důvodu nepříznivých geotechnických podmínek na čelbě.

fod,s_6 Vliv odtěžování neplánovaně vyšších objemů z důvodu vzniklých nadvýlomů. Rozlišují se uznané a neuznané nadvýlomy.

Zod,s_6 Zpoždění dané vlivem odtěžování neplánovaně vyšších objemů z důvodu vzniklých nadvýlomů.

2. Obecné vlivy, parametry, produktivity, trvání a zpoždění týkající se přerušovaného odtěžování pomocí nakladačů a damprů:

fod,o Koeficient celkového vlivu obecných parametrů na $T_{TEOR,OD}$. Platí, že

$$fod,o = fod,o_1 \; x \; fod,o_2 \; x \; fod,o_3 \; x \; fod,o_4 \; x \; fod,o_5 \; x \; fod,o_6 \; x \; fod,o_7 \; x \; fod,o_8$$

Rovnice 44

Zod,o Celkový čas zpoždění odtěžování daný obecnými vlivy. Platí, že

$$Zod,o = \sum_{i=1}^{8} Zod,o_i$$

Rovnice 45

fod,o_1 Koeficient vlivu zaučování „learning factor" (LF), obvykle vyjádřen jako násobek (menší než 1) produktivity na určité úvodní nezanedbatelné délce ražby. Případně je LF vyjádřen nějakou stoupající funkcí, více viz kapitola 7.6. V daném případě se jedná o LF týkající se odtěžování.

Zod,o_1 Zpoždění dané vlivem zaučování na určité úvodní nezanedbatelné délce ražby.

fod,o_2 Koeficient vlivu zaučování nově příchozích pracovníků jako např. nového operátora nakladače, platný obvykle pro několik záběrů.

Zod,o_2 Zpoždění dané vlivem zaučování nově příchozích pracovníků.

fod,o_3 Koeficient vlivu poruchovosti mechanizace. Jedná se pouze o drobné prostoje způsobené poruchovostí mechanizace. Časově delší prostoje jsou, resp. mají být zaznamenávány do určeného typu události/prostoje a nejsou tak přímo součástí činnosti odtěžování. Naopak časově kratší prostoje nejsou obvykle zaznamenávány zvlášť a zůstávají tak „skryté" v trvání této činnosti.

Zod,o_3 Zpoždění dané vlivem poruchovosti mechanizace, Jedná se pouze o prostoje, které nejsou zaznamenávané zvlášť mimo trvání činnosti odtěžování.

fod,o_4 Koeficient vlivu nedostupnosti mechanizace - damprů pro nakládku na čelbě. Jedná se pouze o drobné prostoje. Časově delší prostoje jsou, resp. mají být zaznamenávány do určeného typu události/prostoje a nejsou tak přímo součástí činnosti odtěžování. Naopak časově kratší prostoje nejsou obvykle zaznamenávány, a to často i v případech, kdy mají vysokou četnost. V tomto koeficientu jsou zahrnuty vlivy přístupnosti staveniště, směrových a výškových

poměrů trasy tunelu, stav počvy a celé trasy mezi čelbou a deponií rubaniny.

Zod,o_4 Zpoždění dané vlivem nedostupnosti mechanizace – damprů pro nakládku na čelbě, tzn. prostoje, které nejsou zaznamenávány odděleně.

fod,o_5 Koeficient vlivu nedostupnosti mechanizace - nakladače na čelbě. Časově delší nedostupnosti nakladače jsou, resp. mají být zaznamenávány do určeného typu události/prostoje a nejsou tak přímo součástí činnosti odtěžování.

Zod,o_5 Zpoždění dané vlivem nedostupnosti nakladače na čelbě, tzn. prostoje, které nejsou zaznamenávány odděleně.

fod,o_6 Koeficient vlivu nepřístupnosti čelby z důvodu zahajování a ukončování činnosti. V případě odtěžování se typicky jedná o čekací dobu, než nakladač zarovná počvu. Doba přistavení nakladače a úpravy počvy před nakládkou může dosahovat např. 1 až 5 minut a nezaznamenává se, tzn. je součástí činnosti odtěžování. Doba odjezdu nakladače se může pohybovat např. v rozmezí 5 až 10 minut a rovněž se nezaznamenává, tzn. je součástí činnosti odtěžování.

Zod,o_6 Zpoždění dané vlivem nepřístupnosti čelby z důvodu zahajování a ukončování činnosti.

fod,o_7 Koeficient vlivu nepřítomnosti pracovního personálu na čelbě. Důvodem může být např. špatný management střídání činností cyklu ražby.

Zod,o_7 Zpoždění dané vlivem nepřítomnosti pracovního personálu na čelbě.

fod,o_8 Vliv nedostatečného odvětrávání čelby, kdy dochází z důvodu prašnosti, zhoršené viditelnosti a případně i vyšších teplot ke snížení produktivity při odtěžování a prodloužení doby odtěžování.

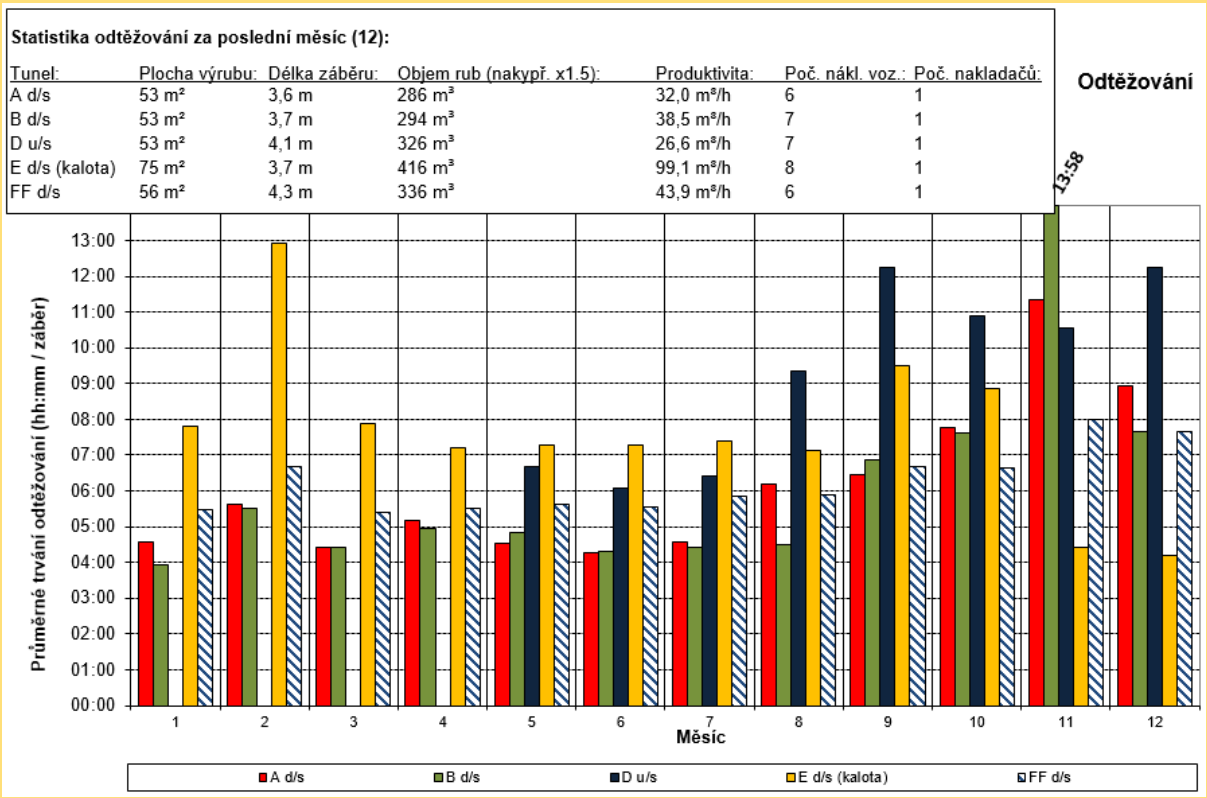
Zod,o_8 Zpoždění dané vlivem nedostatečného odvětrávání čelby.

7.4.3 Produktivita a trvání činnosti odtěžování v příkladech

V níže uvedených příkladech je dokumentováno použití plánovaných produktivit a trvání činnosti odtěžování a jejich porovnání se skutečně dosaženými hodnotami. Jsou popsány dopady rozdílu mezi předpoklady a skutečností na harmonogram a cenu díla.

Př. 10 Skutečná produktivita a trvání činnosti odtěžování, dočasná mezideponie v tunelu

Na jednom z asijských projektů narůstaly časy odtěžování rubaniny z čeleb 5 tunelů s jejich narůstající délkou. Tunely byly raženy metodou D&B. Počet nákladních vozidel pro odtěžbu se pohyboval mezi 6 až 8 pro každou čelbu a byl nedostatečný, navíc jejich typ a technický stav byl neuspokojivý. Zhotovitel nebyl nakloněn tomu, aby upravil uspořádání odtěžování, tj. aby např. zavedl dočasnou mezideponii. V průběhu odtěžování docházelo k různým nežádoucím prostojům. Jak je patrné z níže uvedeného grafu na Obr. 7.13, trvání odtěžování dosáhlo v případě tunelu B d/s téměř 14 hodin v 11. měsíci sledování [2]. Výstižnějším typem grafu, jak si ukážeme v některém dalším příkladu, by byl krabicový typ (Box-Plot). Za účelem vzájemného porovnání výkonů na jednotlivých čelbách je vhodnější trvání činností zobrazovat v časových jednotkách na 1 bm ražby.



Obr. 7.13 Průměrná trvání odtěžování na 5 čelbách za 12 měsíců [2].

Zhotovitel byl upozorňován na přílišné prodloužení doby odtěžování a s tím spojená rizika jako např. nutnost aplikace vyšší SC z důvodu opožděného podepření výrubu apod., prodloužení a prodražení výstavby. Ačkoli bylo možné v některých případech použít dočasnou mezideponii v tunelu, zhotovitel, resp. jeho subdodavatel nebyl k tomuto motivován, naopak by finančně tratil z důvodu zdvojené překládky rubaniny.

Pouze na čelbě E d/s zhotovitel změnil uspořádání odtěžování od 11. měsíce tak, že byla použita dočasná mezideponie v blízkosti za čelbou v případech, kdy na čelbě nebyla k dispozici nákladní vozidla. Zkrácení trvání odtěžování na cca 4 hodiny, tj. polovinu předchozí doby, a nárůst produktivity jsou patrné v grafu od 11. měsíce.

Obr. Nakladače Komatsu a nákladní vozy Bei Ben před portálem.

Po delší době se podařilo zhotovitele přesvědčit k tomu, aby na některých úsecích zavedl odtěžování přes mezilehlé deponie. Tam, kde k tomu nedošlo, adresoval objednatel zhotoviteli skutečnost, že nedostane proplacené fixní náklady odpovídající neúměrnému opoždění výstavby. Zhotovitel ve spolupráci s objednatelem po tomto tlaku navýšil počet nákladních vozidel na dvojnásobek a zlepšil odtěžovací časy.

Otázky k Př. 10:

1. V nabídce nebyla specifikována plánovaná produktivita a plánované trvání odtěžování v jednotlivých třídách. Jaká mohla být plánovaná produktivita a trvání odtěžování? Jaký počet nákladních vozidel by byl potřeba, aby zhotovitel mohl nepřetržitě odtěžovat bez zavedení dočasných mezideponií v tunelu?

2. O času kolik zhotovitel ve skutečnosti zaostal za plánovaným trváním odtěžování (viz výpočet v odpovědi na předchozí otázku) v 9. a 10. měsíci a jaký byl časový dopad zavedení mezideponie za 11. a 12. měsíc na výstavbu? Jaká je celková váha činnosti odtěžování na průběh ražby?

Odpovědi na otázky k Př. 10:

Př. 10. - Ot. 1. V nabídce nebyla specifikována plánovaná produktivita a plánované trvání odtěžování v jednotlivých třídách. Jaká mohla být plánovaná produktivita a trvání odtěžování? Jaký počet nákladních vozidel by byl potřeba, aby zhotovitel mohl nepřetržitě odtěžovat bez zavedení dočasných mezideponií v tunelu?

Odpověď:

Pro účely této disertační práce předpokládejme použití pouze jednoho typu nákladního vozidla s kapacitou 11 m³. Jeden nakladač KOMATSU wa380-3 s kapacitou lžíce 3 m³ potřeboval v průměru 4 náběry, aby naložil jedno nákladní vozidlo z cca 85 % jeho kapacity. V praxi bylo změřeno, že nakládka jednoho nákladního vozidla na čelbě trvala v průměru 2,5 minuty, pokud byl použit jeden nakladač. Toto trvání nakládky mohl zhotovitel ve své nabídce předpokládat. V počátcích ražeb bylo k dispozici více nakladačů a vzhledem k dostatečné velikosti výrubu bylo možno použít dva nakladače současně k nakládání jednoho nákladního vozidla. V takovém případě byl čas nakládky o cca 35 % kratší.

Teoretické trvání odtěžení jedné čelby lze odvodit z výše změřeného času nakládky. Např. u čelby E d/s (kalota) činil objem rubaniny v jednom záběru 12tého měsíce 413 m³ (plocha výrubu 75 m², délka záběru 5,2 m a koeficient nakypření 1,5). Potřebný počet nakládacích cyklů tedy byl 413 / (11x 0,85) = 44.

Pro celkové trvání odtěžení jednoho záběru platí T = T1 + T2 + T3, kde

T1 = cca 5 minut … příjezd nakladače k čelbě a úprava počvy

T2 = 44 x (2,5 min nakládka + 1 min přistavění) … nákladní vozidla neustále k dispozici

T3 = 5 minut … zarovnání počvy a odjezd nakladače od čelby

T = 164 minut = 02:44

Teoretická produktivita P_{TEOR} = 413 / 02:44 = 151 m³/hod

Při zavedení nepřetržitého odtěžování by odtěžení jednoho záběru délky 5,2 m v tunelu E4 d/s trvalo **2 hodiny a 44 minuty**. Odpovídající produktivita činí **151m³/hod**. Tyto hodnoty mohl zhotovitel předpokládat/plánovat ve své nabídce.

Ve 12. měsíci činila vzdálenost mezi čelbou a skládkou rubaniny v tunelu E průměrně 5,2 km. Bylo změřeno, že v průměru jedna trasa nákladního vozidla od čelby na skládku a zpět trvala 86 minut tj. 1,43 hodiny. K tomu, aby bylo zajištěno nepřetržité odtěžování bez dočasné mezideponie, by bylo zapotřebí 86/3,5 (trvání nakládání rubaniny) = **25 nákladních vozidel**.

Pokud uvážíme, že ražba probíhala na více čelbách a docházelo k souběhu odtěžování na několika čelbách najednou, byla skutečná potřeba nákladních vozidel o to vyšší. U delších tunelů je proto vhodné zřídit mezideponii v tunelu tak, aby bylo zajištěno pokud možno nepřetržité odtěžování z čelby a tím zkrácení cyklu ražby. Z mezideponie se rubanina dále odtěžuje již mimo kritickou cestu. Na jiném projektu byl za tímto účelem zřízen záliv, v kterém byla instalována drtička a rubanina byla dále z tunelu odtěžována dopravníkovým pásem.

Př. 10. - Ot. 2. O kolik času se zhotovitel ve skutečnosti zpozdil za plánovaným trváním odtěžování (viz výpočet v odpovědi na předchozí otázku) v 9. a 10. měsíci a jaký byl časový dopad zavedení mezideponie za 11. a 12. měsíc na výstavbu? Jaká je celková váha činnosti odtěžování na průběh ražby?

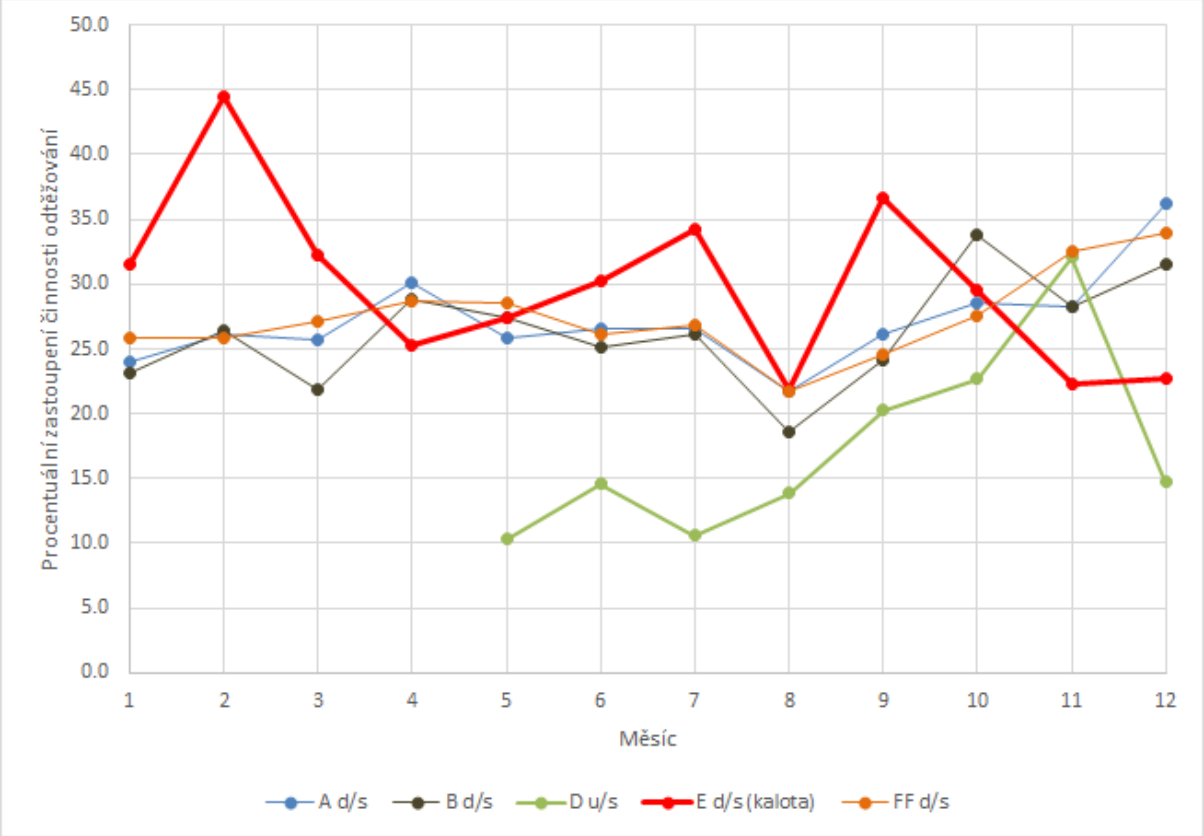
Odpověď:

Při ražbě tunelu E d/s činilo průměrné trvání odtěžování cca 9 hodin za záběr v 9. a 10. měsíci. Jednalo se o měsíce, v kterých zhotovitel nepoužíval dočasnou mezideponii. V průběhu těchto dvou měsíců bylo vyraženo celkem 50 záběrů. Celková prodleva v odtěžování za tyto dva měsíce ražeb oproti plánu činila 50 x (9 – 164/60) = 313 hodin, tj. 13 dnů. Tzn., že za 61 dnů byla ražba opožděna o 13 dnů jen z důvodu neefektivního odtěžování, což představuje 21,5 % času!

Po zavedení mezilehlé deponie, ovšem až v určité vzdálenosti za čelbou, se průměrná doba odtěžování zkrátila v měsících 11 a 12 na 4,3 hodiny za záběr. Zpoždění zaviněné neefektivním odtěžováním v 9. a 10. měsíci, kdy nebyla použita mezideponie, tak činilo cca 50x (9 - 4,3) = 235 hodin, což odpovídá cca **10 dnům** (16 % celkového času za dva měsíce)!

Délka úseku, který zbývalo vyrazit v tunelu E d/s, činila ve 12. měsíci 2,8 km. V tomto úseku se již používala mezideponie. Průměrná délka záběru byla 3,7 m po zbytek úseku. Celková úspora času způsobená zavedením dočasné mezideponie činila (2,8 x 1000 / 3,7) x (9 - 4,3) = 3557 hodin = **148 dnů**!

Váha činnosti odtěžování v průběhu posledních 12 měsíců je charakterizovaná časovým zastoupením činnosti odtěžování v jednotlivých měsících, které je pro všech pět čeleb zobrazeno v grafu na Obr. 7.14. Příklad časového rozdělení jednotlivých skupin činností při ražbě úseku E d/s v 8. měsíci spolu s popisem podmínek stavby v tomto měsíci ražby je uveden v příloze 13.



Obr. 7.14 Průměrné procentuální zastoupení (váha) činnosti odtěžování na jednotlivých čelbách za posledních 12 měsíců ražeb [2].

Z grafu na Obr. 7.14 jsou patrné tři zajímavosti:

1) relativně nízké procentuální zastoupení činnosti odtěžování, resp. její váha, při ražbě úseku D u/s. Důvodem byly podmínky stavby, konkrétně v měsících 5. až 10. probíhaly intenzivně

předvrty z čelby a od 12. měsíce se z každého třetího záběru realizovala časově vysoce náročná vysokotlaká předinjektáž po celém obvodu výrubu.

2) Pokles procentuálního zastoupení činnosti odtěžování v úseku E d/s počínaje 11. měsícem včetně. Důvodem bylo zřízení mezideponie a zkrácení odtěžovacího času. Tím se uvolnil prostor pro nárůst váhy dalších činností cyklu ražby.

3) Pokles procentuálního zastoupení činnosti odtěžování u všech čeleb v 8. měsíci. Vysvětlením je změna podmínek stavby, kdy na staveništi došlo k přerušení prací na 1 týden z důvodu povstání obyvatel dané oblasti. Prostoj v trvání jednoho týdne – zastavení ražeb – ubral na váze jednotlivým činnostem včetně odtěžování.

V Tab. 7.5 jsou číselně vyjádřena procentuální zastoupení trvání odtěžování na jednotlivých čelbách a v jednotlivých měsících. Váha činnosti odtěžování (= proc. zast.) byla relativně vysoká a činila na čelbách, kde neprobíhaly předvrty a předinjektáž, **19 až 44 % z celkového času.**

Tab. 7.5 Procentuální zastoupení trvání odtěžování na jednotlivých čelbách a v jednotlivých měsících [2].

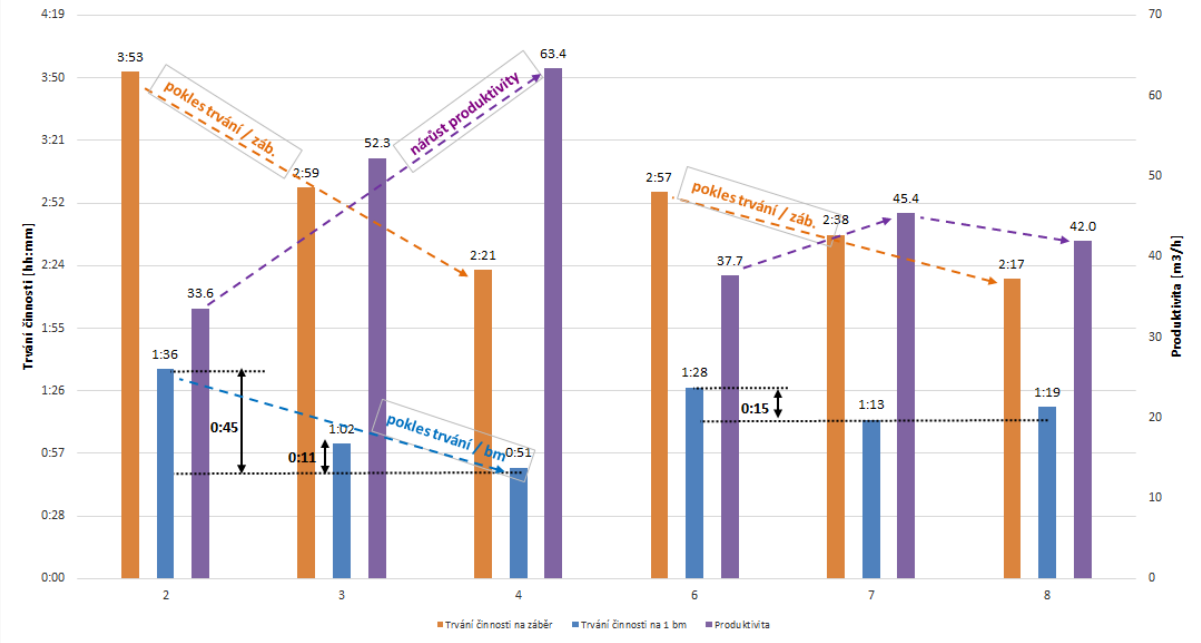
Měsíc	A d/s	B d/s	D u/s	E d/s (kalota)	FF d/s
1	24.0	23.1	---	31.6	25.9
2	26.2	26.4	---	44.5	25.9
3	25.7	21.9	---	32.2	27.1
4	30.1	28.9	---	25.3	28.7
5	25.9	27.4	10.3	27.4	28.6
6	26.5	25.1	14.6	30.2	26.1
7	26.6	26.1	10.6	34.2	26.9
8	21.7	18.6	13.9	21.9	21.7
9	26.1	24.2	20.3	36.7	24.6
10	28.6	33.8	22.7	29.5	27.5
11	28.2	28.3	32.1	22.3	32.5
12	36.3	31.5	14.7	22.7	33.9

Vzhledem k tomu, že ražba čelby E d/s byla na kritické cestě celého projektu, tak se na ní vztahovaly nejen fixní denní náklady, ale i cena za pozdní uvedení celého projektu do provozu. Náklady za použití více nákladních vozidel a/nebo zřízení mezilehlé deponie a překládky jsou ve vztahu k výše uvedeným vícenákladům zanedbatelné.

Bohužel v daném případě bylo vlivem nedůsledné smlouvy o dílo a dalších podmínek stavby velmi obtížné přesvědčit zhotovitele o zavedení mezideponie.

Př. 11 Skutečná produktivita a trvání činnosti odtěžování, vliv podmínek stavby

Při ražbě kaloty s plochou výrubu cca 55 m^2 metodou NRTM bylo dosahováno v jednotlivých 6 úsecích ražby skutečných produktivit a trvání odtěžování dle grafu uvedeného na Obr. 7.15.



Obr. 7.15 Skutečné trvání a produktivity odtěžování na 6 čelbách, plocha výrubu cca 55 m^2 [2].

V úsecích 2, 3, 4 resp. 6, 7, 8 byla použita shodná třída ražby. Každý úsek byl charakterizován podmínkami stavby. V úsecích č. 2, 3 a 4, které byly součástí tunelu 1, byla použita třída SC1 a v úsecích 6, 7 a 8, které byly součástí tunelu 2, byla použita třída SC2. Tomu odpovídají plochy výrubu. Ze znalosti skutečných délek záběrů a odhadnutého koeficientu nakypření 1,5 byly dopočteny objemy rubaniny nutné k odtěžení v průměrném záběru, viz Tab. 7.6. Objemy nadvýlomů byly v příkladu při výpočtu produktivit zanedbány. Délky jednotlivých úseků ražby činily cca 70 až 200 m.

V Tab. 7.6 jsou uvedeny následující základní parametry odtěžování jednotlivých úseků:
- průměrný čas odtěžování jednoho záběru,
- průměrný čas odtěžování přepočtený na 1bm tunelu,
- průměrná produktivita odtěžování,
- průměrná vzdálenost čelby od portálu,
- počet damprů, které byly k dispozici pro odtěžování dané čelby.

Tab. 7.6 Skutečné parametry odtěžování v 6 úsecích [2].

Úsek tunelu	Třída	Plocha výrubu v dané třídě	Průměrná vzdálenost od portálu k čelbě	Průměrná délka záběru	Celkem za jeden záběr			Průměrné skutečné trvání činnosti odtěžování		Produktivita odtěžování	Počet nakladačů na čelbě	Počet nákladních aut na čelbě
					Teoretický objem rubaniny	Koeficient nakypření	Objem rubaniny s vlivem nakypření					
		m^2	m	m	m^3	-	m^3	hh:mm / záb	hh:mm / bm	m^3/h	ks	ks
2	RSC1	54.0	137	2.42	130.5	1.5	195.7	3:53	1:36	33.6	1	3
3	RSC1	54.0	262	2.90	156.7	1.5	235.0	2:59	1:02	52.3	1	4
4	RSC1	54.0	460	2.78	150.0	1.5	225.0	2:21	0:51	63.4	1	4
6	RSC2	55.3	145	2.02	111.7	1.5	167.5	2:57	1:28	37.7	1	3
7	RSC2	55.3	224	2.16	119.6	1.5	179.4	2:38	1:13	45.4	1	4
8	RSC2	55.3	315	1.75	96.5	1.5	144.8	2:17	1:19	42.0	1	4

Výrazné rozdíly v produktivitách odtěžování v jednotlivých úsecích byly způsobeny rozdílnými podmínkami stavby. Podmínky stavby v jednotlivých úsecích byly následující:

Úseky č. 2, resp. 6: Úseky počínající několik desítek metrů za portálem (průměrná vzdálenost úseků od portálu 137, resp. 145 m), SC1, resp. SC2, časté prostoje různého důvodu, významný vliv Learning Factor LF, a to zejména u trhacích prací – časté přistřelování nebo profilování z důvodu podvýlomů, neodešlá trhavina apod. mělo za následek přerušování odtěžování i několikrát za záběr, časté poruchy nakladače, částečná nedostupnost mechanizace z důvodu současné ražby více úseků, střídání jejich priorit a vliv managementu.

Úsek č. 3, resp. 7: Ražba dále za portálem (262 m, resp. 224 m), SC1, resp. SC2, prostoje různého důvodu méně časté, vliv Learning Factor LF méně významný, u trhacích prací však stále značný – časté přistřelování nebo profilování z důvodu podvýlomů, neodešlá trhavina apod. mělo za následek přerušování odtěžování, poruchy nakladače méně časté.

Úsek č. 4, resp. 8: Ražba ve větší vzdálenosti za portálem (460 m, resp. 315 m), SC1, resp. SC2, prostoje různého důvodu méně časté, vliv Learning Factor LF zanedbatelný, zlepšení u trhacích prací, poruchy nakladače zanedbatelné.

U úseků 6, 7 a 8 mělo částečný vliv na odtěžování profilování výrubu, které probíhalo současně s odtěžováním. Zejména u úseku č. 8 došlo k výraznému nárůstu profilování v souvislosti s částečnou změnou kvality horniny, lehce zkrácenou délkou záběru, nikoli však třídy SC.

Zhotovitel měl k odtěžování k dispozici max. 4 dampry, každý o kapacitě 12 m³. Pro jednotlivé úseky byly změřeny průměrné trvání nakládky a cesty dampru na deponii a zpět:

- úseky 2 a 6: 14 min
- úseky 3 a 7: 14,5 min
- úseky 4 a 8: 15 min

Nakládka jednoho dampru činila v průměru 2,5 min, viz Obr. 7.16. Dočasná mezideponie nebyla použita ani v jednom z uvedených úseků.

Obr. 7.16 Probíhající nakládka dampru na čelbě, dostatečné osvětlení a větrání [1].

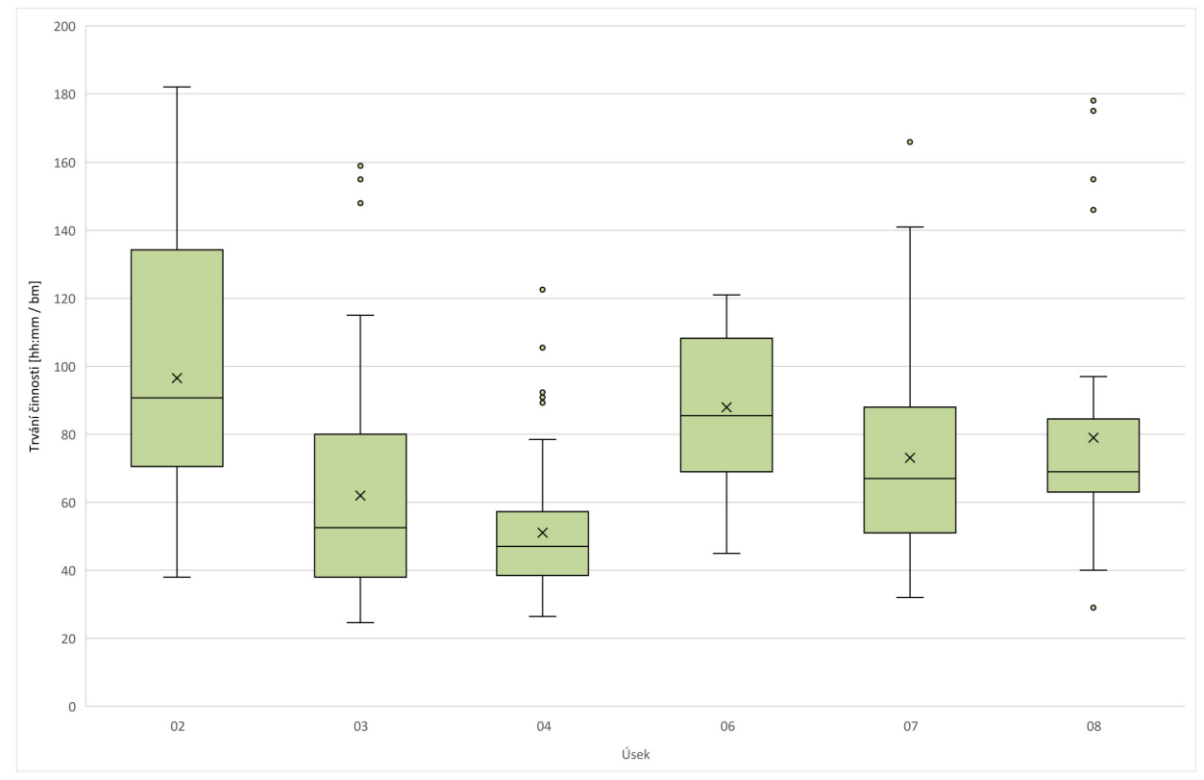
Jak je patrné z grafu v úvodu příkladu, produktivita odtěžování postupně narůstala s postupujícím časem výstavby, ačkoli se vzdálenost čelby od portálu postupně zvyšovala, a to i u úseků 3–4 a 7–8, kde byl počet damprů shodný. Důvody, proč při neměnném počtu damprů

a narůstající vzdálenosti čelby od portálu nedošlo k opačnému a očekávanému jevu, tj. snižování produktivity a prodlužování trvání odtěžování, jsou výše popsané podmínky stavby v jednotlivých úsecích.

Z uvedeného je zřejmé, že podmínky stavby – vliv faktoru zaučení zejména u trhacích prací, poruchy nakladačů, přerušování odtěžování z důvodu nutnosti profilování apod. – způsobily minimálně na prvním půl kilometru ražeb obou tunelů výrazná zpoždění.

Na Obr. 7.17 jsou zobrazeny trvání odtěžování 1bm tunelu v jednotlivých úsecích pomocí krabicového grafu. Pro každý úsek získáváme rychlou představu o průměrném trvání (křížek), mediánu (mezilehlá čára), spodním a horním kvartilu resp. krabici s 50% obsahem všech hodnot, rozptylu na úrovni ± 2,7x σ (paprsky zakončené krátkými vodorovnými úsečkami) a představu o asymetrii hodnot a odlehlých hodnotách. Tento typ grafu je vhodný pro porovnání odtěžování v jednotlivých úsecích.

Z grafu je patrná asymetrie hodnot značící, že hodnoty jsou zhuštěné k dolní části (kratší trvání), zatímco horní část (delší trvání) má poměrně větší rozptyl a více odlehlých hodnot. To dává smysl – očekáváme, že trvání odtěžování se bude více blížit nějaké menší hodnotě a občas délka trvání odtěžování „ustřelí“ a bude vyšší. Podrobnější analýza trvání odtěžování bude provedena v další části této v kapitole.



Obr. 7.17 Krabicové grafy trvání odtěžování 1bm tunelu v jednotlivých úsecích [2].

Otázky k Př. 11:

Př. 11. - Ot. 1 Jaká mohla být plánovaná produktivita a plánované trvání odtěžování při nepřetržitém odtěžování? Jaký počet nákladních vozidel by byl potřeba, aby zhotovitel mohl nepřetržitě odtěžovat bez zavedení mezideponie v tunelu?

Př. 11. - Ot. 2 O kolik se zhotovitel zpozdil za takto odhadnutým plánovaným trváním odtěžování a jaký je časový dopad na výstavbu? Jaká je celková váha činnosti odtěžování v průběhu **ražby?**

Př. 11. - Ot. 3 Jaké byly skutečné koeficienty vlivu? Tzn. provést jejich zpětné stanovení ze znalosti skutečného trvání odtěžování.

Př. 11. - Ot. 4 Jak vypadají histogramy trvání odtěžování v jednotkách min/bm v jednotlivých úsecích a jaké jsou odpovídající pravděpodobnostní rozložení této náhodné veličiny?

Odpovědi na otázky k Př. 11:

Př. 11. - Ot. 1. Jaká mohla být plánovaná produktivita a plánované trvání odtěžování při nepřetržitém odtěžování? Jaký počet nákladních vozidel by byl potřeba, aby zhotovitel mohl nepřetržitě odtěžovat bez zavedení mezideponie v tunelu?

Odpověď:

Průměrné plánované trvání odtěžení jedné čelby v jednotlivých úsecích mohlo být vypočteno např. následujícím způsobem. Pro celkové trvání odtěžení jednoho záběru platí T = T1 + T2 + T3, kde

T1 = cca 5 minut … příjezd k čelbě a úprava počvy

T3 = 5 minut … zarovnání počvy a odjezd od čelby

Vod … Objem rubaniny k odtěžení

V1d … objem rubaniny na jednom dampru = 12 m³ x 0,85 = 10,2 m³

Tn … trvání nakládky jednoho dampru = 2,5 min

T2 = Vod / V1d x Tn … při nepřetržitém odtěžování, tj. dampry neustále k dispozici na čelbě s následujícími koeficienty:

f_{od,s_1}= 1 / 1,5… vliv nakypření rubaniny; již zahrnut ve Vod

f_{od,s_2} = 0,96 … vliv kvality, zkušenosti a motivace operátorů nakladačů a damprů; zhotovitel již v nabídce uvažoval s méně motivovanými pracovníky

f_{od,s_3} = 0,85 … vliv nevyužití objemových kapacit damprů a nakladačů při odtěžování; již zahrnut ve Vod, a proto do výpočtu uvažován hodnotou 1,0

f_{od,s_4} = 1,0 … vliv zvýšené lepivosti rubaniny

f_{od,s_5} = 1,0 … vliv přerušení odtěžování v důsledku nutnosti okamžité instalace, i opakovaně, s/b z důvodu nepříznivých geotechnických podmínek na čelbě

f_{od,s_6} = 0,98 … vliv odtěžování neplánovaně vyšších objemů z důvodu vzniklých nadvýlomů

f_{od,o_1} = 1,0 … vliv zaučování „learning factor LF“; pro odtěžování by měl být pouze na prvních desítkách metrů ražby a dané úseky lze považovat již jako úseky nacházející se za touto vzdáleností

fod,o_2 = 1,0 … vliv zaučování nově příchozích pracovníků, jako např. nového operátora nakladače

fod,o_3 = 1,0 … vliv poruchovosti mechanizace

fod,o_4 = 0,99 … vliv nedostupnosti damprů pro nakládku na čelbě

fod,o_5 = 1,0 … vliv nedostupnosti nakladače na čelbě

fod,o_6 = x … vliv nepřístupnosti čelby z důvodu zahajování nebo ukončování činnosti; zahrnut v časech T1 a T3, a proto do výpočtu T2 vzat jako 1,0, možno zpětně dopočítat

fod,o_7 = 1,0 … vliv nepřítomnosti pracovního personálu na čelbě

fod,o_8 = 1,0 … vliv nedostatečného odvětrávání čelby

„fod“ = fod,s x fod,o = (0,95 x 0,98) x 0,99 = 0,92169 … ale bez započtení vlivu fod,o_6 a fod,s_1

Plánované trvání a produktivity odtěžování v jednotlivých úsecích jsou uvedeny v Tab. 7.7 pro jednotlivé úseky. Plánované produktivity se pohybují v rozmezí **179 až 195 m³/hod**. Délky záběrů byly převzaty ze skutečných hodnot. Má se za to, že nabídka je podána takovým způsobem a s takovými informacemi, že umožňuje přepočet produktivit a trvání odtěžování na skutečnou délku záběru. Počet damprů nutných pro nepřetržité odtěžování byl dopočten na základě znalosti trvání jednoho cyklu dampru v jednotlivých úsecích a trvání nakládky a byl stanoven na **6 ks**, viz Tab. 7.7. Plánované trvání odtěžování 1 bm tunelu mohlo činit cca **24 až 27 min.**

Tab. 7.7 Možné plánované parametry odtěžování v 6 úsecích.

Úsek tunelu	Třída	Plocha výrubu v dané třídě	Průměrná délka záběru	Celkem za jeden záběr			Průměrné plánované trvání operace odtěžování T2 = (Vi / Vd x Tn) / fod = (Vi / 10.2 x 2.5) / 0.92169					Plánovaná produktivita odtěžování	Průměrné trvání jednoho prac. cyklu	Plán. počet damprů
				Teoretický objem rubaniny	Koeficient nakypření	Objem rubaniny s vlivem nakypření								
		m³	m	m³	-	m³	T1 (min)	T2 (min)	T3 (min)	hh:mm / záb	hh:mm / bm	m³/h	m	ks
2	RSC1	54.0	2.42	130.5	1.5	195.7	5	52	5	1:02	0:25	189.3	14.0	6
3	RSC1	54.0	2.90	156.7	1.5	235.0	5	62	5	1:12	0:24	194.5	14.5	6
4	RSC1	54.0	2.78	150.0	1.5	225.0	5	60	5	1:09	0:25	193.3	15.0	6
6	RSC2	55.3	2.02	111.7	1.5	167.5	5	45	5	0:54	0:27	184.3	14.0	6
7	RSC2	55.3	2.16	119.6	1.5	179.4	5	48	5	0:57	0:26	186.5	14.5	6
8	RSC2	55.3	1.75	96.5	1.5	144.8	5	38	5	0:48	0:27	179.1	15.0	6

Př. 11. - Ot. 2. O kolik se zhotovitel zpozdil za takto odhadnutým plánovaným trváním odtěžování a jaký je časový dopad na výstavbu? Jaká je celková váha činnosti odtěžování v průběhu ražby?

Odpověď:

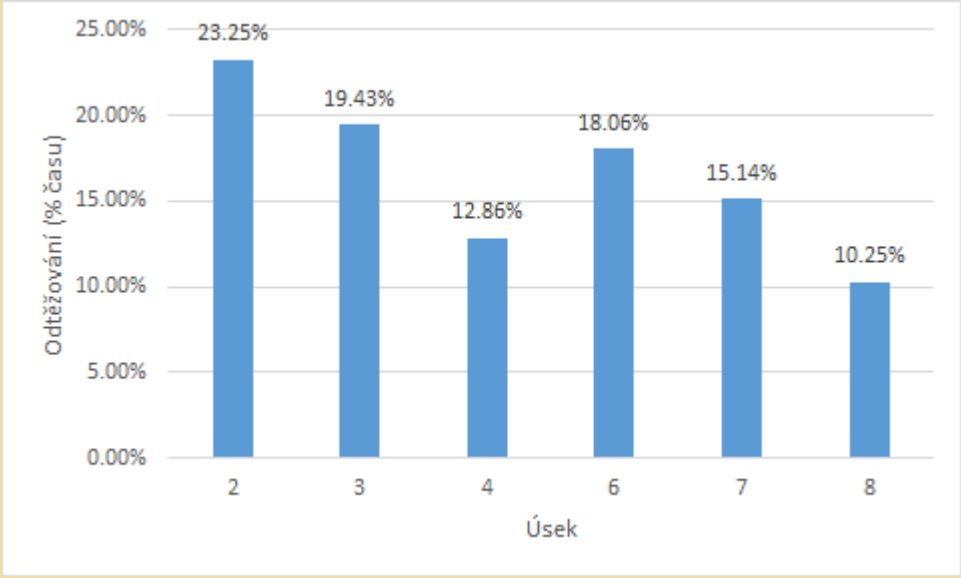
Rozdíl plánovaného a skutečného trvání odtěžování na 1 bm je zřejmý ze sloupců „hh:mm / bm“ z Tab. 7.6 a Tab. 7.7. V jednotlivých úsecích činí tento rozdíl na 1 bm 26 až 71 minut, viz Tab. 7.8.

Tab. 7.8 Zpoždění skutečného trvání odtěžování oproti plánovanému na jednotlivých 6 úsecích a celkem [2].

úsek	skut odtěž. (min/bm)	plán odtěž. (min/bm)	rozdíl (min/bm)	délka (m)	zpoždění (dny)
2	96	25	71	74.9	3.7
3	62	24	38	168.3	4.4
4	51	25	26	219.5	4.0
6	88	27	61	50.5	2.1
7	73	26	47	101.7	3.3
8	79	27	52	80.3	2.9
				695.2	**20.5**

Na 6 úsecích ražby v celkové délce 695 m činila časová prodleva, tj. rozdíl mezi plánovaným a skutečným trváním činnosti, způsobená nižší produktivitou odtěžování, téměř **21 dnů!**

Váha činnosti odtěžování v jednotlivých úsecích je charakterizovaná procentuálním časovým zastoupením této činnosti. Tato váha je pro všech šest čeleb zobrazena v grafu na Obr. 7.18.



Obr. 7.18 Váha činnosti odtěžování na 6 úsecích ražby [2].

Z grafu je zjevné, že s tím, jak se zlepšovala postupně produktivita odtěžování, resp. snižovala doba jeho trvání, tak docházelo i ke snižování procentuálního zastoupení odtěžování v celkovém čase ražby. V úseku č. 8 nedošlo ke snížení váhy vlivem vyšší produktivity odtěžování, ale z důvodu nárůstu jiných činností a to zejména profilování. Váha odtěžování se v prvním tunelu postupně snižovala z **23 % na 13 %** a v druhém tunelu odpovídajícím způsobem z **18 % na 10 %.**

Př. 11. - Ot. 3. Jaké byly skutečné koeficienty vlivu? Tzn. provést jejich zpětné stanovení ze znalosti skutečného trvání odtěžování.

Odpověď:

Teoretické trvání odtěžování 1 bm při odhadnuté max. produktivitě nakládky 245 m^3/h (= (12x0,85)/2,5x60) činilo cca 13,5 minut (= cca 55 / 245 x 60) na 1bm tunelu.

Skutečné resp. plánované koeficienty vlivu vypočítáme ze znalosti skutečného resp. plánovaného trvání odtěžování 1 bm tunelu. Platí, že

$$f_{PLAN,OD} = \frac{T_{TEOR,OD}}{T_{PLAN,OD}} \qquad \text{Rovnice 46}$$

$$f_{SKUT,OD} = \frac{T_{TEOR,OD}}{T_{SKUT,OD}} = \frac{f_{PLAN,OD}\, x\, T_{PLAN,OD}}{T_{SKUT,OD}} \qquad \text{Rovnice 47}$$

Výpočet je proveden v Tab. 7.9 níže. Hodnoty koeficientu vlivu na produktivitu a trvání odtěžování byly ve skutečnosti ($f_{SKUT,OD}$) výrazně odlišné od teoretických, ale i od plánovaných hodnot. Skutečné koeficienty vlivu nabyly hodnot 0,138 až 0,259. Vůči plánovaným hodnotám potom trvání odtěžování 1bm tunelu vzrostlo 2x až 3,8x.

Tab. 7.9 Porovnání teoretického, plánovaného a skutečného trvání odtěžování na jednotlivých úsecích.

Úsek tunelu	Třída	Plocha výrubu v dané třídě	Průměrná vzdálenost od portálu k čelbě	Průměrná délka záběru	Teoretické trvání dtěžování	Průměrné plánované trvání operace odtěžování		Průměrné skutečné trvání operace odtěžování		f skut,od / f plan,od	**f plan,od / f skut,od**
		m^2	m	m	min / bm	min / bm	f plan,od	min / bm	f skut,od		
2	RSC1	54.0	137	2.42	13.2	25	0.529	96	0.138	0.260	**3.84**
3	RSC1	54.0	262	2.90	13.2	24	0.551	62	0.213	0.387	**2.58**
4	RSC1	54.0	460	2.78	13.2	25	0.529	51	0.259	0.490	**2.04**
6	RSC2	55.3	145	2.02	13.6	27	0.502	88	0.154	0.307	**3.26**
7	RSC2	55.3	224	2.16	13.6	26	0.521	73	0.186	0.356	**2.81**
8	RSC2	55.3	315	1.75	13.6	27	0.502	79	0.172	0.342	**2.93**

V níže uvedené Tab. 7.10 jsou pro úsek č. 2 částečně výpočtem a částečně odborným odhadem zpětně vypočteny/stanoveny jednotlivé koeficienty vlivu, které vycházejí ze znalosti skutečného trvání. Podstatný rozdíl mezi plánovanými a teoretickými vlivy je patrný u obecných koeficientů a to zejména u vlivu nedostatek damprů.

Z praktického hlediska je vhodné co nejdříve stanovovat jednotlivé koeficienty vlivů a určovat jejich uznatelnost.

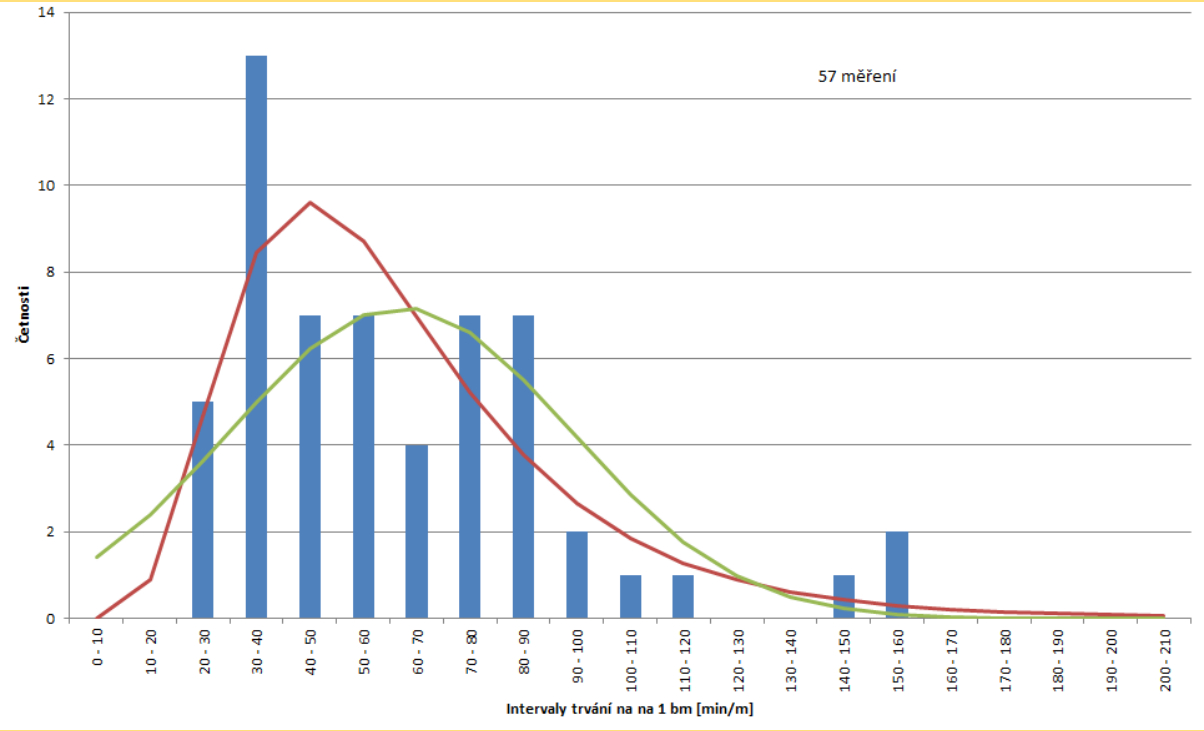
Tab. 7.10 Koeficienty vlivu na úseku č. 2.

Koef.	Popis	teor.	plán.	skut.	váha skut. koef. (%)
fod,s1	Vliv nakypření rubaniny = 1/1.5	1	0.67	0.67	9.1
fod,s2	Koeficient vlivu kvality, zkušenosti a motivace operátorů nakladačů a damprů	1	0.96	0.93	6.5
fod,s3	Nevyužiti objemových kapacit damprů a nakladačů při odtěžování	1	0.85	0.85	7.1
fod,s4	Zvýšená lepivost rubaniny	1	1.00	1.00	6.0
fod,s5	Vliv přerušeni odtěžování v důsledku nutnosti okamžité instalace, i opakovaně, s/b	1	1.00	1.00	6.0
fod,s6	Vliv odtěžování neplánovaně vyšších objemů z důvodu vzniklých nadvýlomů	1	0.98	0.96	6.3
fod,s	Koeficient celkového vlivu specifických parametrů	1	0.533	0.506	
fod,o1	vliv zaučováni „learning factor" (LF)	1	1.00	0.95	6.4
fod,o2	vliv zaučováni nově příchozích pracovniků	1	1.00	1.00	6.0
fod,o3	vliv poruchovosti mechanizace	1	1.00	0.90	6.7
fod,o4	vliv nedostupnosti damprů pro nakládku na čelbě = (3x 2.5) / (14+2.5)	1	1.00	0.45	13.3
fod,o5	vliv nedostupnosti nakladače na čelbě	1	1.00	0.76	7.9
fod,o6	vliv nepřistupnosti čelby z důvodu zahajování a ukončování činnosti	1	0.99	0.95	6.4
fod,o7	vliv nepřitomnosti pracovního personálu na čelbě	1	1.00	0.98	6.2
fod,o8	vliv nedostatečného odvětrávání čelby	1	1.00	0.99	6.1
fod,o	Koeficient celkového vlivu obecných parametrů	1	0.99	0.27	
fod	Koeficient celkového vlivu	1	0.528	0.138	100

Př. 11. - Ot. 4. Jak vypadají histogramy trvání odtěžování v jednotkách min/bm v jednotlivých úsecích a jaké jsou odpovídající pravděpodobnostní rozložení této náhodné veličiny?

Odpověď:

Příklad histogramu pro úsek č. 3 spolu s normálním a log-normálním pravděpodobnostními rozloženími je zobrazen na Obr. 7.19. Grafy histogramů spolu s funkcemi pravděpodobnostních rozdělení jsou zobrazeny pro všech 6 úseků v příloze 12 spolu s vypočtenými parametry rozdělení. Parametry odpovídajícího normálního a log-normálního rozdělení jsou vypsány v Tab. 7.11.



Obr. 7.19 Histogram trvání činnosti odtěžování na úseku č. 3. Proloženy jsou funkce hustoty normálního pravděpodobnostního rozdělení (zeleně) a logaritmicko-normálního pravděpodobnostního rozdělení (červeně).

Tab. 7.11 Parametry normálního a logaritmicko-normálního rozdělení odpovídající vzorkům dat pro jednotlivé úseky, n značí počet měření.

		2	3	4	6	7	8
Normal	Průměr	96.5	62.0	51.1	88.0	73.1	79.0
	sm.odch	38.9	31.5	19.1	23.1	28.4	32.8
	n	28	57	75	24	47	45
LN	Průměr	4.486669	4.014179	3.87635	4.439377	4.225007	4.302025
	sm.odch	0.425125	0.473033	0.32798	0.289865	0.36193	0.356484
	n	28	57	75	24	47	45

Dále provedeme vyhodnocení vhodnosti jednotlivých pravděpodobnostních rozdělení pomocí testu dobré shody a to jednotlivě pro každý úsek (referenční). Výsledky testu jsou uvedeny v Tab. 7.12.

Tab. 7.12 Vyhodnocení vhodnosti volby pravděpodobnostního rozdělení, A – vhodné, Ap – podmínečně vhodné, N – nevhodné.

P-rozd.	Úsek	2	3	4	6	7	8
Normální	součet	4.92	17.71	21.90	3.27	16.28	14.50
	k	2	6	4	1	5	2
	chí.kv - kritická hodnota	6.0	12.6	9.5	3.8	11.1	6.0
	vhodnost	**A**	N	N	**A**	N	N
LN	součet	6.69	5.74	4.97	2.86	11.80	14.97
	k	2	5	3	1	4	2
	chí.kv - kritická hodnota	6.0	11.1	7.8	3.8	9.5	6.0
	vhodnost	**Ap**	**A**	**A**	**A**	N	N

Pro realizaci testu bylo nutné přeuspořádat intervaly tak, aby v každém intervalu bylo alespoň 5 pozorování.

Pro většinu úseků vychází logaritmicko-normální rozdělení (LN) v porovnání s normálním rozdělením pravděpodobnosti (N) jako vhodnější. Pouze na úseku č. 2 vyšlo jako vhodnější normální rozdělení. Úseky 7 a 8 nejsou dobře popsatelná N a LN rozděleními. Je však možné, že s větším množstvím pozorování by se rozdělení pravděpodobnosti přiblížilo logaritmicko-normálnímu.

Ve skutečnosti se trvání nějaké činnosti snaží přiblížit minimální hodnotě a proto je více hodnot při nižší hranici resp. vlevo na ose x. Naopak občas se stane, že dojde k prodloužení trvání a hodnota se odchýlí doprava na ose x. Takovému popisu lépe odpovídá LN rozdělení než N rozdělení pravděpodobnosti.

Určovat vhodné rozdělení pravděpodobnosti je důležité např. za účelem zobecnění a predikce jiných tunelů.

7.4.4 Shrnutí

Jak bylo ukázáno v Př. 10 a Př. 11, činnost odtěžování má poměrně vysokou váhu, tj. procentuální zastoupení v celkovém času ražby. V uvedených příkladech se tato hodnota pohybovala mezi 10 % až cca 35 %. Je velmi důležité maximálně optimalizovat jednotlivé operace, které dohromady tvoří činnost odtěžování. Jedná se o operace nakládka a odvoz rubaniny. Tyto operace se opakují mnohokrát v rámci jedné činnosti odtěžování. Např. odvoz rubaniny představuje desítky operací, obvykle do 50. Nakládka představuje 3 až 4násobně více operací než odvoz. Činnost odtěžování je tak vysoce citlivá na jakoukoli menší změnu trvání těchto jednotlivých operací.

Vzhledem k oběma výše uvedeným skutečnostem je činnost odtěžování činností, která významnou měrou ovlivňuje celkovou rychlost postupu ražeb a je proto důležité, aby této činnosti byla věnována pozornost. Je třeba provádět pravidelné kontroly činnosti odtěžování tak, aby bylo garantováno, že tato činnost je vykonávána v souladu s nabídkou, tj. její trvání a produktivita odpovídají smlouvě o dílo. K tomu je nutné, aby již ve fázi podávání nabídek byla produktivita činnosti odtěžování podrobně stanovena tak, aby bylo možné jednoznačně určit plánovanou produktivitu a trvání této činnosti v jednotlivých třídách a délkách záběrů, viz Př. 11. - Ot. 1.

Činnost odtěžování může být negativně ovlivněna různými faktory/vlivy, které nemusí být na první pohled patrné, ale jednotlivě nebo v součtu způsobují významné prodlevy. Výčet těchto faktorů, spolu s jejich rozdělením na specifické a obecné, je uveden v kapitole 7.4.2.

Za účelem dosažení vyšší produktivity odtěžování, resp. snížení jejího trvání je vhodné např.:

- Zajistit kvalitní mechanizaci v dostatečném počtu spolu s náhradními díly.
- Pokud není dostatečný počet damprů pro zajištění nepřetržité nakládky, je nutné zřídit v krátké vzdálenosti za čelbou dočasnou mezideponii. Odtěžení mezideponie umístit mimo kritickou cestu.
- Pokud to umožní rozměry výrubu a mechanizace, použít pro nakládku dva nakladače.
- Zajistit kvalitní odvětrávání čelby po celý čas odtěžování. Zajistit řádné osvětlení tunelu. Pravidelně udržovat počvu a zejména odvodnění ve vhodném stavu v celé délce tunelu.
- Limitovat tvorbu nadvýlomů.
- Provádět trhací práce tak, aby byla dodržena vhodná velikost kusů rubaniny pro odtěžování.
- Používat zkušené operátory nakladačů a damprů a tyto motivovat.
- Zkrátit počáteční vliv zaučování, tzv. „learning factor LF“.

Supervize by měla mít k dispozici dostatek inspektorů k občasné až časté podrobné kontrole této činnosti tak, aby bylo možno stanovit, s jakou efektivitou probíhá odtěžování, zda se jedná o nepřetržité odtěžování nebo zda dochází k nežádoucím zpožděním a prostojům a tyto kvalifikovat a kvantifikovat. S pojmem kvalifikovat souvisí určení uznatelnosti zpoždění/prostojů, resp. koeficientů vlivu na odtěžování. Pod kvantifikací jednotlivých zpoždění a prostojů se rozumí nejen jejich prosté časové vyjádření, ale také

stanovení rozdílů mezi očekávanými smluvně závaznými hodnotami trvání a skutečnými hodnotami trvání odtěžování. Rozdíly se myslí rozdíly a) uznatelné, b) neuznatelné a c) celkový rozdíl, který je součtem a) + b).

7.5 Trvání a produktivita při činnosti aplikace stříkaného betonu

7.5.1 Úvod

Stříkaný beton (s/b) – prostý nebo vyztužený vlákny - je dominantní zajišťovací prvek v podzemním stavitelství. Uplatňuje se v maximální míře u konvenčních ražeb a ražeb pomocí TBM otevřeného typu. U ražeb pomocí EPBM, SPBM, tj. tam, kde jsou jako systematický výztužný prvek použity prefabrikované segmenty, je s/b zcela nebo téměř zcela vypuštěn.

U konvenčních ražeb se činnost aplikace s/b nachází na kritické cestě téměř u všech záběrů. U ražeb pomocí TBM otevřeného typu je možné s/b aplikovat v určitém rozsahu souběžně s ražbou. Proto u těchto ražeb v případě nižších tříd SC činnost aplikace s/b většinou neleží na kritické cestě, zatímco u vyšších tříd SC tj. tam, kde je třeba instalovat více s/b, se tato činnost naopak na kritické cestě částečně nachází. Je to dáno tím, že stříkací souprava umožňuje určitý limitovaný pohyb nezávislý na pohybu tunelovacího stroje.

Důležitost produktivity při aplikaci s/b tedy závisí na typu ražby a rozsahu s/b v jednotlivých třídách SC. Při vyšších třídách SC je dopad této činnosti na celkovou produktivitu a postup ražby vyšší než u nižších tříd SC.

7.5.2 Teorie

Teoretická produktivita $P_{TEOR,SB}$ a trvání $T_{TEOR,\ SB}$, plánovaná produktivita $P_{PLAN,\ SB}$ a trvání $T_{PLAN,\ SB,}$ skutečná produktivita $P_{SKUT,\ SB}$ a trvání $T_{SKUT,\ SB}$ činnosti aplikace s/b, specifikované níže, jsou závislé na specifických a obecných parametrech. Tyto parametry jsou pro aplikaci s/b mokrou cestou při konvenčních ražbách podrobně popsány dále v textu.

$P_{TEOR,\ SB}$ Maximální teoretický proud nástřiku betonové směsi umožněný danou stříkací soupravou, nejlépe specifikovanou v nabídce a ve smlouvě o dílo, který se uvádí nejčastěji v jednotkách m^3/h.

$T_{TEOR,SB}$ Trvání činnosti aplikace s/b při maximální teoretické produktivitě. Platí, že fsb = 1,0.

$f_{PLAN,SB}$ Plánovaný koeficient vlivu na trvání činnosti, který může nabývat hodnot z intervalu (0, 1).

$P_{PLAN,SB}$ Jedná se o plánovanou produktivitu činnosti aplikace s/b vycházející z použití plánované strojní sestavy, ze zkušeností zhotovitele a jeho plánu. Určuje se v čase podání nabídky a stává se závaznou uzavřením smlouvy o dílo.

$T_{PLAN,SB}$ Plánované trvání činnosti aplikace s/b při použití plánovaného koeficientu vlivu $f_{PLAN,SB}$. Musí platit, že $f_{PLAN,SB} < 1,0$.

$Z_{PLAN,SB}$ Plánované zpoždění dané skutečností, že $f_{PLAN,SB} < 1,0$.

$P_{SKUT,SB}$ Skutečná produktivita činnosti aplikace s/b určená při výstavbě ze změřeného skutečného trvání činnosti a znalosti skutečného množství aplikované betonové směsi.

$T_{SKUT,SB}$ Skutečné trvání činnosti aplikace s/b, které lze změřit při výstavbě. Zpětně lze odvozovat s určitou mírou nepřesnosti vliv jednotlivých koeficientů fsb,i.

$f_{SKUT,SB}$ Skutečný koeficient vlivu na trvání činnosti, pro který obvykle platí $f_{SKUT,SB} < 1$. Pokud skutečnost odpovídá plánu, pak $f_{SKUT,SB} = f_{PLAN,SB} < 1,0$. Záleží na kvalitě plánu a na skutečné situaci. V současné praxi ve většině případů platí $f_{SKUT,SB} < f_{PLAN,SB} < 1,0$. Koeficient může být větší než 1,0, pokud se použije mechanizace s vyšší produktivitou, než bylo plánováno v nabídce.

$Z_{SKUT,SB}$ Zpoždění dané skutečností, že $f_{SKUT,SB}$ je obvykle menší 1,0.

Pro trvání činnosti aplikace s/b platí následující vztahy.

$$T_{PLAN,SB} = T_{TEOR,SB} \times f_{PLAN,SB}$$ Rovnice 48

$$T_{SKUT,SB} = T_{TEOR,SB} \times f_{SKUT,SB}$$ Rovnice 49

$$Z_{PLAN,SB} = T_{PLAN,SB} - T_{TEOR,SB}$$ Rovnice 50

$$Z_{SKUT,SB} = T_{SKUT,SB} - T_{TEOR,SB}$$ Rovnice 51

Jednotlivé koeficienty vlivu na trvání činnosti fsb,i můžou nabývat hodnot z intervalu <0,1). Při hodnotě blízké 1,0 je vliv na trvání činnosti nepatrný, naopak hodnota 0 znamená, že činnost neprobíhá. Zsb_i znamená zpoždění způsobené jedním daným konkrétním vlivem/činitelem. Může se jednat o průměr za více záběrů, např. ve stejné třídě ražby apod.

Pro skutečný koeficient celkového vlivu platí

$$f_{SKUT,SB} = \frac{T_{TEOR,SB}}{T_{SKUT,SB}} = \frac{T_{TEOR,SB}}{T_{TEOR,SB} + Zsb}$$

Rovnice 52

Pro jednotlivé dílčí koeficienty vlivu platí

$$f_{SKUT,SB_i} = \frac{T_{TEOR,SB}}{T_{TEOR,SB} + Zsb_i}$$

Rovnice 53

Obdobné rovnice platí i pro plánované hodnoty $f_{PLAN,SB,i}$.

Pro jednotlivá dílčí zpoždění platí, že

$$Zsb_i = \left(\frac{1}{fsb_i} - 1\right) \times T_{TEOR,SB}$$

Rovnice 54

Jednotlivé dílčí koeficienty lze přímo násobit mezi sebou a získat tak celkový výsledný vliv na činnost aplikace s/b. V praxi je vhodný i opačný postup, kdy teoretické trvání činnosti aplikace s/b je známé, skutečné trvání činnosti aplikace s/b je přesně změřené a zpětně se stanovují hodnoty vlivu jednotlivých činitelů.

1. Specifické vlivy, parametry, produktivity, trvání a zpoždění týkající se činnosti aplikace s/b realizované mokrou cestou pomocí stříkací soupravy:

fsb,s — Koeficient celkového vlivu specifických parametrů na $PROD_{TEOR,SB}$. Platí, že

$$fsb,s = fsb,s_1 \; x \; fsb,s_2 \; x \; fsb,s_3 \; x \; fsb,s_4 \; x \; fsb,s_5 \; x \; fsb,s_6 \; x \; fsb,s_7 \; x \; fsb,s_8 \; x \; fsb,s_9 \; x \; fsb,s_{10}$$

Rovnice 55

Zsb,s — Pro celkové zpoždění činnosti aplikace s/b dané specifickými vlivy platí

$$Zsb,s = \sum_{i=1}^{10} Zsb,s_i$$

Rovnice 56

fsb,s_1 — Koeficient vlivu kvality betonové směsi – zrnitostní křivka, maximální velikost zrna, množství záměsové vody, množství a kvalita cementu, dávkování urychlovače atd. a tím i vliv na přilnavost s/b k podkladu ovlivňující množství spadu s/b, zpracovatelnost betonu atd.
Příklad opadávání s/b z důvodu nekvalitní betonové směsi je zobrazen a popsán na Obr. 7.20 a Obr. 7.30. V případě již instalovaných ocelových sítí se k tomu přidává nutnost časově náročného

vyfoukávání neboli začišťování popadaného betonu zpoza těchto sítí, viz Obr. 7.20.

Obr. 7.20 Pracné a časové náročné vyfoukávání opadnutého betonu zpoza nainstalovaných ocelových sítí pomocí proudu vzduchu z trysky stříkací soupravy. V klenbě jsou patrné opadnuté kusy betonu zachycené za ocelovou sítí, které je třeba také odstranit.

Zsb,s_1 Zpoždění dané vlivem zhoršené kvality betonové směsi a tím i např. nízkou přilnavostí betonu k podkladu.

fsb,s_2 Koeficient vlivu kvality, zkušenosti a motivace operátora stříkací soupravy na $PROD_{TEOR,SB}$. Operátor stříkací soupravy by měl být zkušený, nejlépe certifikovaný pracovník. Někdy se může výrazně lišit motivace denních a nočních směn.

Zsb,s_2 Zpoždění dané vlivem méně kvalitních, nezkušených a/nebo nemotivovaných operátorů stříkacích souprav.

fsb,s_3 Vliv nastavení proudu nástřiku betonové směsi jako část maximálního teoretického proudu nástřiku $PROD_{TEOR,S/B}$ umožněného stříkací soupravou.

Zsb,s_3 Zpoždění dané vlivem praktického nastavení proudu betonové směsi.

fsb,s_4 Vliv nutnosti aplikovat s/b ve více tenkých subvrstvách z důvodu velmi zhoršených geotechnických podmínek. Tzn. limit pro maximální tloušťku jedné subvrstvy nástřiku, ve spojitosti s případným čekáním na dostatečné zatuhnutí/ztvrdnutí vrstvičky tak, aby mohla být aplikována další subvrstva. Důvodem je výrazné opadávání s/b a částí horninového masivu zejména z klenby výrubu z důvodu velmi zhoršené

kvality horninového masivu. Toto platí i v případech, že je aplikována kvalitní betonová směs zkušeným operátorem a s optimálním proudem nástřiku. V případě již instalovaných ocelových sítí se k tomu přidává nutnost časově náročného vyfoukávání neboli začišťování popadaného betonu zpoza těchto sítí. U výrubu nevyztuženého ocelovými sítěmi, kde je výztuž v podobě vláken součástí betonu, zpoždění vlivem začišťování odpadá.

Zsb,s_4 Zpoždění dané vlivem nutnosti aplikovat s/b ve více tenkých vrstvičkách.

fsb,s_5 Vliv nutnosti okamžité instalace s/b, i opakované, ještě v průběhu odtěžování z důvodu nepříznivých geotechnických podmínek na čelbě. Dokončení instalace s/b po odtěžení. Tzn. s/b se instaluje ve více krocích v jednom záběru.

Zsb,s_5 Zpoždění dané nutností okamžité aplikace s/b ještě v průběhu odtěžování z důvodu nepříznivých geotechnických podmínek na čelbě. Stříkaný beton se instaluje ve více krocích v jednom záběru.

fsb,s_6 Vliv četnosti a velikosti přítoků podzemní vody do výrubu z míst, kde se má aplikovat s/b a kvalita případně nainstalovaného drenážního systému, pokud je tento nutný instalovat před samotnou aplikací s/b. Riziko vyplavování čerstvého betonu a nutnost okamžitých a pozdějších dodatečných nástřiků betonu. Příklad vyplavených ploch a žlabů ve stěně ostění tunelu je uveden na Obr. 7.21.

Obr. 7.21 Na stěně jsou patrné žlaby a relativně velké plochy po vyplaveném nastříkaném betonu a drenážní trubky v tunelu o průměru

8 m. Nutnost reinstalace s/b případně i s drenáží.

Zsb,s_6 Zpoždění dané vlivem četnosti a velikosti přítoků podzemní vody do výrubu z míst, kde se má aplikovat s/b a kvalita případně nainstalovaného drenážního systému.

fsb,s_7 Vliv stříkání vyšších objemů betonu než teoretických. Důvodem můžou být nadvýlomy (Obr. 7.22) nebo objednávka vyššího množství betonové směsi z důvodu rezervy a zaokrouhlení. Rozlišují se uznané a neuznané nadvýlomy. Netýká se vlivu vyplavování s/b, odrazu a spadu s/b, a opadávání s/b při jeho aplikaci z důvodu zhoršených geotechnických podmínek – je zahrnuto v koeficientech fsb,s_6, fsb,s_8 a fsb,s_9.

Obr. 7.22 Výrazné a časté nadvýlomy při ražbě pomocí TBM na pozicích 8 a 4 hodin, způsobené méně pevnější 2 m mocnou vrstvou sedimentů, subhorizontálně upadající ve směru ražby. Problém zesílil při kontaktech s rozpěrnými deskami tunelovacího stroje.

Je nutno zvážit, nakolik je nutno nadvýlomy vyplňovat betonem a zda je nutné použít s/b nebo lze použít levnější litý beton. U některých typů projektů je možné nadvýlomy, v závislosti na jejich tvaru, ponechat. Jako příklad lze uvést hydrotechnické tunely opatřené s/b jako definitivním ostěním, u kterých větší příčný profil není na překážku, ale tvar nadvýlomu, hladkost a vlnitost profilu mají zásadní vliv samozřejmě se zajištěním dlouhodobé stability díla.

Zsb,s_7 Zpoždění dané vlivem zastříkávání vyšších objemů betonu než teoretických. Netýká se vliv odrazu a spadu s/b při jeho aplikaci, který je zahrnut v Zsb,s_8.

f_{sb,s_8} Vliv odrazu, spadu s/b, tj. převrácená hodnota koeficientu ztrát při aplikaci s/b vzniklých odrazem kameniva od povrchu a obvykle dosahujícím hodnot 7 až 15 % z celkového objemu betonové směsi. Vliv na spad má zejména zkušenost operátora, strojní vybavení atd.

Obr. 7.23 Nadměrné množství spadu v počvě tunelu raženého pomocí TBM. Občasné problémy s niveletou koleje a následně s dopravou materiálu a personálu na tunelovací stroj byly způsobeny ne zavčas odstraněným spadem s/b.

Na řadě projektů je definováno maximální povolené množství spadu, tzn. uznatelné. V takových případech by měla nabídková produktivita s/b a trvání činnosti aplikace s/b již počítat se zvýšeným objemem betonové směsi. V případě vyššího množství spadu se potom jedná o neuznatelné množství, ze kterého je potom nutné zvážit časový dopad na trvání činnosti aplikace s/b.

Z_{sb,s_8} Zpoždění dané vlivem odrazu, spadu s/b.

f_{sb,s_9} Vliv opadávání s/b z důvodu zhoršených geotechnických podmínek. S/b v takových případech často opadává společně s kusy horniny/zeminy.

Z_{sb,s_9} Zpoždění dané vlivem opadávání s/b z důvodu zhoršených geotechnických podmínek.

$f_{sb,s_{10}}$ Vliv vytíženosti stříkací soupravy v průběhu činnosti bez započtení obecných vlivů jako např. přerušení dodávky materiálu atd. Operátor např. potřebuje provést kontrolu nástřiku atd. Nástřik neprobíhá 100% plynule.

$Z_{sb,s_{10}}$ Zpoždění dané vlivem vytíženosti stříkací soupravy.

2. Obecné vlivy, parametry, produktivity, trvání a zpoždění týkající se činnosti aplikace s/b realizované mokrou cestou pomocí stříkací soupravy:

fsb,o Koeficient celkového vlivu obecných parametrů na trvání činnosti. Platí, že

$$fsb,o = fsb,o_1 \; x \; fsb,o_2 \; x \; fsb,o_3 \; x \; fsb,o_4 \; x \; fsb,o_5 \; x \; fsb,o_6 \; x \; fsb,o_7$$

Rovnice 57

Zsb,o Celkový čas zpoždění odtěžování daný obecnými vlivy. Platí, že

$$Zsb,o = \sum_{i=1}^{7} Zsb,o_i$$

Rovnice 58

fsb,o_1 Koeficient vlivu zaučování „learning factor LF“ obvykle vyjádřený jako násobek (menší než 1,0) produktivity na určité úvodní nezanedbatelné délce ražby nebo jako stoupající funkce k hodnotě 1,0 se vzdáleností a časem. V daném případě se jedná o LF týkající se aplikace s/b.

Zsb,o_1 Zpoždění dané vlivem zaučování na určité úvodní délce ražby.

fsb,o_2 Koeficient vlivu zaučování nově příchozích pracovníků, jako např. nového operátora stříkací soupravy. Vzhledem k požadavku zkušených, resp. certifikovaných nastříkávačů by tento vliv měl být patrný pouze pro několik záběrů.

Zsb,o_2 Zpoždění dané vlivem zaučování nově příchozích pracovníků platný obvykle pro několik záběrů.

fsb,o_3 Koeficient vlivu poruchovosti mechanizace, resp. stříkací soupravy. Jedná se pouze o drobné prostoje způsobené poruchovostí mechanizace. Časově delší prostoje jsou, resp. mají být zaznamenávány do určeného typu události/prostoje a nejsou tak přímo součástí činnosti aplikace s/b. Naopak časově kratší prostoje nejsou obvykle zaznamenávány zvlášť a zůstávají tak skryté v trvání dané činnosti – proto je zaveden koeficient fsb,o_3.

Zsb,o_3 Zpoždění dané vlivem poruchovosti mechanizace, resp. stříkací soupravy.

fsb,o_4 Koeficient vlivu plynulosti dodávek materiálu, tj. dostupnosti mixů s betonovou směsí na čelbě. Jedná se pouze o drobné prostoje způsobené plynulosti dodávek. Časově delší prostoje jsou, resp. mají být zaznamenávány do určeného typu události/prostoje a nejsou tak

přímo součástí činnosti aplikace s/b. Naopak časově kratší prostoje nejsou obvykle zaznamenávány, a to často i v případech, kdy mají vysokou četnost.

Zsb,o_4 Zpoždění dané vlivem nedostatečné plynulosti dodávek materiálu, tj. dostupností mixů s betonovou směsí na čelbě, v rámci činnosti aplikace s/b (tzn. pouze zvlášť nezaznamenávané prostoje). Jedná se o poměrně častý prostoj na nezanedbatelném množství projektů. Např. na projektu ražby TBM tunelů, kde probíhala dodávka betonové směsi na čelby vzdálené až 15 km kolejovou dopravou, bylo poměrně frekventované vykolejení souprav z důvodu špatného stavu koleje případně souprav, viz Obr. 7.24. Celkový dopad na postup ražeb byl významný. Tyto časově delší prostoje však byly zvlášť zaznamenávány.

Obr. 7.24 Vykolejení lokomotivy s mixem před portálem přerušilo dodávku betonu na čelbu. Z toho důvodu musel tunelovací stroj přerušit ražbu.

fsb,o_5 Koeficient vlivu nepřístupnosti čelby z důvodu zahajování a ukončování činnosti. V případě aplikace s/b se jedná o doby přistavení soupravy na stříkaný beton, připravení povrchu pro nástřik a odstavení soupravy po dokončení nástřiku. Doba přistavení stříkací soupravy a úprava povrchu před nástřikem (Obr. 7.25) se může pohybovat v rozmezí 3 až 10 minut a nezaznamenává se, tzn. je součástí činnosti aplikace s/b. Doba odjezdu stříkací soupravy se může pohybovat např. okolo 3 až 5 minut a rovněž se nezaznamenává, tzn. je součástí činnosti aplikace s/b. Časově delší nedostupnosti stříkací soupravy jsou, resp. mají být zaznamenávány do určeného typu události/prostoje a nejsou tak přímo součástí činnosti aplikace s/b.

Obr. 7.25 Mytí povrchu tlakovou vodou z trysky stříkací soupravy před aplikací s/b.

Zsb,o_5 Zpoždění dané vlivem nepřístupnosti čelby z důvodu zahajování a ukončování činnosti. Na některých projektech byly zaznamenány případy, kdy se souprava na s/b čistila přímo na čelbě, a tak byl zbytečně zpomalován celkový postup ražeb, viz Obr. 7.26.

Obr. 7.26 Čištění stříkací soupravy ihned po aplikaci nástřiku, avšak na čelbě, tudíž na kritické cestě.

fsb,o_6 Koeficient vlivu nepřítomnosti pracovního personálu na čelbě. Důvodem může být např. špatný management střídání činností cyklu ražby. V muslimských zemích pak např. odchod posádek z tunelu za

účelem modliteb.

Zsb,o_6 Zpoždění dané vlivem nepřítomnosti pracovního personálu na čelbě.

fsb,o_7 Vliv nedostatečného odvětrávání čelby, kdy dochází z důvodu prašnosti, zhoršené viditelnosti a případně i vyšších teplot ke snížení produktivity při aplikaci s/b (kouskování vkládáním přestávek) s dopadem na kvalitu a bezpečnost prací.

Zsb,o_7 Zpoždění dané vlivem nedostatečného odvětrávání čelby.

7.5.3 Produktivita a trvání činnosti aplikace stříkaného betonu v příkladech

V níže uvedených příkladech z praxe a na modelových příkladech je dokumentováno použití plánovaných produktivit a trvání činnosti aplikace s/b a jejich porovnání se skutečně dosaženými hodnotami. Jsou popsány dopady rozdílu mezi předpoklady a skutečností na harmonogram a cenu díla.

Př. 12 Výpočet plánované produktivity a trvání činnosti aplikace stříkaného betonu

V Tab. 7.14, která je umístěna na dalších stránkách, je modelový příklad, ve kterém je uveden postup, jak mohou být vypočteny plánované produktivity činnosti aplikace s/b $P_{PLAN,SB}$ a její trvání $T_{PLAN,SB}$ v závislosti na třídě ražby, délce záběru, profilu tunelu, ztrátách betonu, proudu s/b směsi, koeficientu využitelnosti strojní sestavy, nadvýlomech apod. Podrobný výpočet je součástí přílohy 16.

Tento příklad, ačkoli je modelový, je z části založen na údajích ze skutečných konvenčních ražeb. V Tab. 7.13 je souhrnně prezentován výsledek pro dané tři třídy horninové výztuže.

Tab. 7.13 – Modelový příklad - Plánované produktivity a trvání aplikace s/b – shrnutí.

	Třída:	SC1(4/1)	SC2(4/2)	SC3(5/2)
Plánovaná průměrná délka záběru	[m]	3,0	1,85	1,35
Projektovaný teor. objem s/b V_{TEOR}	[m³ / záběr]	5,48	5,23	5,74
	[m³ / 1 bm]	1,83	2,83	4,25
Předpokl. celk. objem s/b V_{CELK}	[m³ / záběr]	7,0	7,25	8,0
	[m³ / 1 bm]	2,33	3,92	5,93
Koef. nav. objemu Kplan	---	1,28	1,39	1,39
$T_{TEOR,SB}$	[min / záběr]	16	16	17
	[min / 1 bm]	**5**	**8**	**13**
$f_{PLAN,SB}$	---	**0,59**	**0,48**	**0,50**
$T_{PLAN,SB}$	[min / záběr]	28	33	35
	[min / 1 bm]	**9**	**18**	**26**
$P_{PLAN,SB,CELK}$	[předp. celk. objem m³ / h]	15,0	13,4	13,8

Tab. 7.14 Modelový příklad – Výpočet trvání aplikace s/b pro tři třídy SC.

Třída ražby	Profil výrubu	Plánovaný nejčastější rozsah délky záběru a jeho průměrná délka (*1)	Popis vystrojení stříkaným betonem/drátkobetonem proj. teor. objem a předp. skutečný objem v mixech (*2)	$T_{PLAN,SB}$ na 1bm - $T_{PLAN,SB}$ na záběr – ($T_{TEOR,SB}$ na záběr) - $P_{PLAN,CELK}$ (*3)
SC1 (4/1)	Kalota	2,0 – 4,0 m **3,0 m**	- 1x vrstva tl. 10 cm na stěny a klenbu v každém záběru; čelba bez s/b $V_{S/B,TEOR,\ 3,0}$ = **5,48 m³** / 0,85 (navýšení obj. o nadvýlomy a zaokr.) x 1,08 (navýšení objemu o spad) $V_{S/B,MIX,\ 3,0}$ = 6,80 = **7,0 m³**	**9 min / 1bm – 28 min / záb. - (16 min / záb.) - 15,0 m3 / h** = 5,48 m³ (teor.. nastříkávaný objem) / 20,0/ 0,9 (fsb,s3 předp. proud bet. směsi) / 0,98 (fsb,s10 vytíženost) / 0,93 (fsb,s8 spad) / 0,85 (fsb,o5 přistav, odstav) / 0,85 (fsb,s7 nadvýlomy, zaokr.)
SC2 (4/2)	Kalota	1,5 – 2,2 m **1,85 m**	a) 50% záběrů bez stabil. vrstvy a čelba bez s/b: 1x vrstva tl. 15 cm na stěny a klenbu v každém záběru $V_{S/B,TEOR,\ 1,85,a}$ = **5,11 m³** / 0,79 (navýšení obj. o nadvýlomy a zaokr.) x 1,08 (navýšení objemu o spad) $V_{S/B,MIX,\ 1,85,a}$ = 6,62 = **7,0 m³** b) 50 % záběrů se stabil. vrstvou a čelba se s/b v tl. 4c m a ploše 6 m²: 1x vrstva tl. 7,5 cm v každém záběru + 1x vrstva tl. 4 cm na 6 m² čelby + 1x vrstva tl. 7,5 cm na stěny a klenbu v každém záběru $V_{S/B,TEOR,\ 1,75}$ = 2,55 + 0,24 + 2,55 = **5,35 m³** / (0,52 až 0,79) (nav. obj. o nadvýlomy a zaokr.) x 1,08 (navýšení objemu o spad) $V_{S/B,MIX,\ 1,85,b}$ = 6,88 = **7,5 m³**	**18 min / 1bm - 33 min / záb. - (16 min / záb.) – 13,4 m3 / h** = a) /2 + b) / 2 a) 1 vrstva: **31 min** = 5,11 m³ (teoretický objem) / 20,0/ 0,9 (fsb,s3 předp. proud bet. směsi) / 0,98 (fsb,s10 vytíženost) / 0,93 (fsb,s8 spad) / 0,85 (fsb,o5 přistav, odstav) / 0,79 (fsb,s7 nadvýlomy, zaokr.) b) 2 vrstvy á 7,5 cm a s/b na čelbu: **35 min** stab. na kalotu a stěny: 16 min = 2,55 m³ (teoretický objem) / 20,0/ 0,9 (fsb,s3 předp. proud bet. směsi) / 0,98 (fsb,s10 vytíženost) / 0,93 (fsb,s8 spad) / 0,85 (fsb,o5 přistav, odstav) / 0,79 (fsb,s7 nadvýlomy, zaokr.) stab. na čelbu: 2 min = 0,24 m³ (teoretický objem) / 20,0/ 0,9 (fsb,s3 předp. proud bet. směsi) / 0,98 (fsb,s10 vytíženost) / 0,93 (fsb,s8 spad) / 1,0 (fsb,o5 přistav, odstav) / 0,52 (fsb,s7 nadvýlomy, zaokr.) 1 vrstva: 17 min = 2,55 m³ (teoretický objem) / 20,0/ 0,9 (fsb,s3 předp. proud bet. směsi) / 0,98 (fsb,s10 vytíženost) / 0,93 (fsb,s8 spad) / 0,85 (fsb,o5 přistav, odstav) / 0,79 (fsb,s7 nadvýlomy, zaokr.)

Tab. 7.14 – pokračování: Modelový příklad – Výpočet trvání aplikace s/b pro tři třídy SC.

Třída ražby	Profil výrubu	Plánovaný nejčastější rozsah délky záběru a jeho průměrná délka (*1)	Popis vystrojení stříkaným betonem/drátkobetonem proj. teor. objem a předp. skutečný objem v mixech (*2)	$T_{PLAN,SB}$ na 1bm - $T_{PLAN,SB}$ na záběr – ($T_{TEOR,SB}$ na záběr) - $P_{PLAN,CELK}$ (*3)
SC3 (5/2)	Kalota	1,0 – 1,7 m **1,35 m**	100% záběrů se stabil. vrstvou a čelba se s/b v tl. 5cm a ploše 15 m²: a) 1x vrstva tl. 5 cm v každém záběru b) + 1x vrstva tl. 5 cm na 15 m² čelby c) + 1x vrstva tl. 7,5 cm na stěny a klenbu v každém záběru d) + 1x vrstva tl. 7,5 cm na stěny a klenbu v každém záběru, ale dále za čelbou $V_{S/B,TEOR,\ 1,35}$ = 1,25 + 0,75 + 1,87 + 1,87 = **5,74 m³** x 1,0 až 1,2 (navýšení objemu o nadvýlomy) x 1,1 až 1,2 (navýšení objemu o ztráty s/b) $V_{S/B,MIX,\ 1,35}$ = 6,46 = **8,0 m³**	**26 min / 1bm – 35 min / záb. - (17 min / záb.) – 13,8 m3 / h** = (a + b) + (c + d) a) stab. na kalotu a stěny: 9 min = 1,25 m³ (teoretický objem) / 20,0/ 0,9 (fsb,s3 předp. proud bet. směsi) / 0,98 (fsb,s10 vytíženost) / 0,93 (fsb,s8 spad) / 0,83 (fsb,o5 přistav, odstav) / 0,67 (fsb,s7 nadvýlomy, zaokr.) b) stab. na čelbu: 4 min = 0,75 m³ (teoretický objem) / 20,0/ 0,9 (fsb,s3 předp. proud bet. směsi) / 0,98 (fsb,s10 vytíženost) / 0,93 (fsb,s8 spad) / 1,0 (fsb,o5 přistav, odstav) / 0,81 (fsb,s7 nadvýlomy, zaokr.) c) 1. vrstva na kalotu a stěny: 11 min = 1,87 m³ (teoretický objem) / 20,0/ 0,9 (fsb,s3 předp. proud bet. směsi) / 0,98 (fsb,s10 vytíženost) / 0,93 (fsb,s8 spad) / 0,83 (fsb,o5 přistav, odstav) / 0,81 (fsb,s7 nadvýlomy, zaokr.) d) 2. vrstva na kalotu a stěny: 10 min = 1,87 m³ (teoretický objem) / 20,0/ 0,9 (fsb,s3 předp. proud bet. směsi) / 0,98 (fsb,s10 vytíženost) / 0,93 (fsb,s8 spad) / 0,9 (fsb,o5 přistav, odstav) / 0,81 (fsb,s7 nadvýlomy, zaokr.)

Tab. 7.14 – pokračování: Modelový příklad – Výpočet trvání aplikace s/b pro tři třídy SC.

(*1) V případě potřeby a dle skutečných podmínek se může délka záběru lišit od plánované délky. Podmínky uplatnění/změn je nutné popsat ve smlouvě o dílo. Zároveň je nutné specifikovat úpravu produktivit, resp. trvání činností v jednotlivých třídách, jestliže se skutečná délka záběru liší od jeho plánované délky nebo délkového rozsahu.

(*2) Velikost výrubu v každé třídě se bere v úvahu při výpočtu teoretického objemu s/b. Koeficient objemu s/b, který bude zaplňovat nadvýlomy, je stanoven z předpokladu, že tloušťka s/b se po obvodu výrubu zvětší o 15, 30, resp. 50 mm ve třídách SC1, SC2 resp. SC3.

(*3) V rovnicích je uvedeno, jak může Zhotovitel dospět k plánovanému trvání a produktivitě činnosti. Tento údaj by měl vycházet ze zkušeností Zhotovitele a jeho nejlepšího odborného odhadu pro daný projekt. Detaily výpočtu jsou uvedeny v příloze 16.

Důležitost produktivity a trvání činnosti „aplikace s/b“ ve smyslu ceny díla je patrná z níže uvedeného modelového Př. 13, který není daleko od skutečnosti.

Př. 13 Produktivita a trvání činnosti aplikace s/b a vliv na cenu díla

Tunel délky 5 km byl ražen pomocí metody NRTM. Fixní náklady zhotovitele – zařízení staveniště, strojní vybavení, personál, energie apod. – na jeden den stavby činily 12.000 EUR. Tunel byl vyražen v délce 4 km ve třídě SC2, tj. z 80 %. Pro jednoduchost předpokládejme, že projektem předpokládaná délka ražby v SC2 se rovná skutečné délce ražby v SC2. Zhotovitel plánoval a ve smlouvě o dílo se zavázal, že bude aplikovat s/b na ostění tunelu do **33 minut** v každém záběru délky 1,85 m ve třídě SC2, viz předchozí Př. 12. To odpovídá **18 minutám na 1 bm** tunelu, $P_{PLÁN,CELK}$ = 13,4 m^3/h.

Ve skutečnosti mohlo například dojít k tomu, že kvalita betonové směsi nebyla dostatečná při její aplikaci na stěny a klenbu výrubu a docházelo k jejímu častému opadávání z klenby výrubu. Následně bylo nutné provádět časově velmi zdržující odstraňování popadaného s/b zpoza ocelových sítí. Také dodávky betonu nemusely být bez chyby, mohlo docházet k prostojům při čekání na mixy. Někteří operátoři nemuseli být dostatečně zkušení a nedodržovali pravidla pro aplikaci s/b, což mělo za následek větší spad betonu a v konečném důsledku další časové zdržení. Motivace posádek nemusela být nejvyšší a určitá zdržení se přičítávala výměnám mechanizace a personálu na čelbě.

Průměrná skutečná produktivita $P_{SKUT,CELK}$ při stavbě tunelu byla 7 m^3/h, tzn. o 6,4 m^3/h nižší než plánovaná. Takto nízká produktivita byla zaznamenána na více projektech.

Snížená produktivita aplikace s/b odpovídá průměrnému trvání této činnosti **63 min** na jeden záběr délky 1,85 m ve třídě SC2. Přepočteno na 1 bm délky tunelu se jedná o trvání **34 min/1bm** a z toho vyplývající průměrné zpoždění **16 min/1bm** oproti původně plánovanému času 18 min/1bm. Toto zdánlivě malé zpoždění se stane velmi patrným po vyražení celého 4 km dlouhého úseku tunelu v SC2 a bude činit celkových 1067 hodin neboli **44,5 dní**. Bohužel jsou v praxi takováto původně nepatrná zpoždění často opomíjena a v momentě, kdy se stanou patrnými, již není způsob, jak vzniklou škodu napravit. A jaká může být vzniklá škoda?

Zpoždění z důvodu nižší produktivity aplikace s/b na délce úseku tunelu 4 km činilo celkem 44,5 dní. Pouze fixní vícenáklady zhotovitele za toto období přesahují částku **500.000 EUR**.

Další náklady jsou tvořeny vyšší spotřebou s/b. Porovnáním teoretického a plánovaného objemu z Př. 12 dostaneme navýšení objemu o cca 8000 m³ na délce ražby 4 km (= 4000 x (7,25 – 5,23)), což představuje 38,6 % z původně plánovaného objemu s/b v SC2. Pokud by například stál 1 m³ s/b 100 EUR, pak tomu odpovídající částka představuje cca **800.000 EUR**. Pozor, jedná se o navýšení plánované spotřeby oproti teoretické a zhotovitel by měl tento náklad zahrnout do své nabídky a cenu s/b v nabídce upravit. To, co potřebujeme v tomto případě vědět, je rozdíl skutečné spotřeby s/b oproti plánované spotřebě. Pokud by toto navýšení spotřeby bylo například také 8000 m³, tak by se vícenáklady za skutečně vyšší spotřebu s/b oproti plánované spotřebě také rovnaly půl miliónu EUR.

Vícenáklady za vyšší spotřebu s/b a fixní vícenáklady by si v tomto modelovém případě řádově odpovídaly.

K tomu je třeba přičíst cenu za opožděné uvedení díla do provozu. V závislosti na významu díla mohou tyto náklady dosáhnout vyšších částek, než je součet fixních a materiálových vícenákladů. Například u projektů podzemních hydroelektráren s výrobní kapacitou 1000 MW mohou činit příjmy z prodeje elektrické energie **více než 1 milión EUR denně**. Nutno dodat, že zisk z tohoto příjmu je samozřejmě nižší. Na druhou stranu však existuje významný společenský dopad.

V našem modelovém případě by tak vliv času z opožděného uvedení díla do provozu významně převážil vliv vyšší spotřeby materiálu: (0,5 mil + (44,5 x např. 1 mil?)) > 0,8 mil.

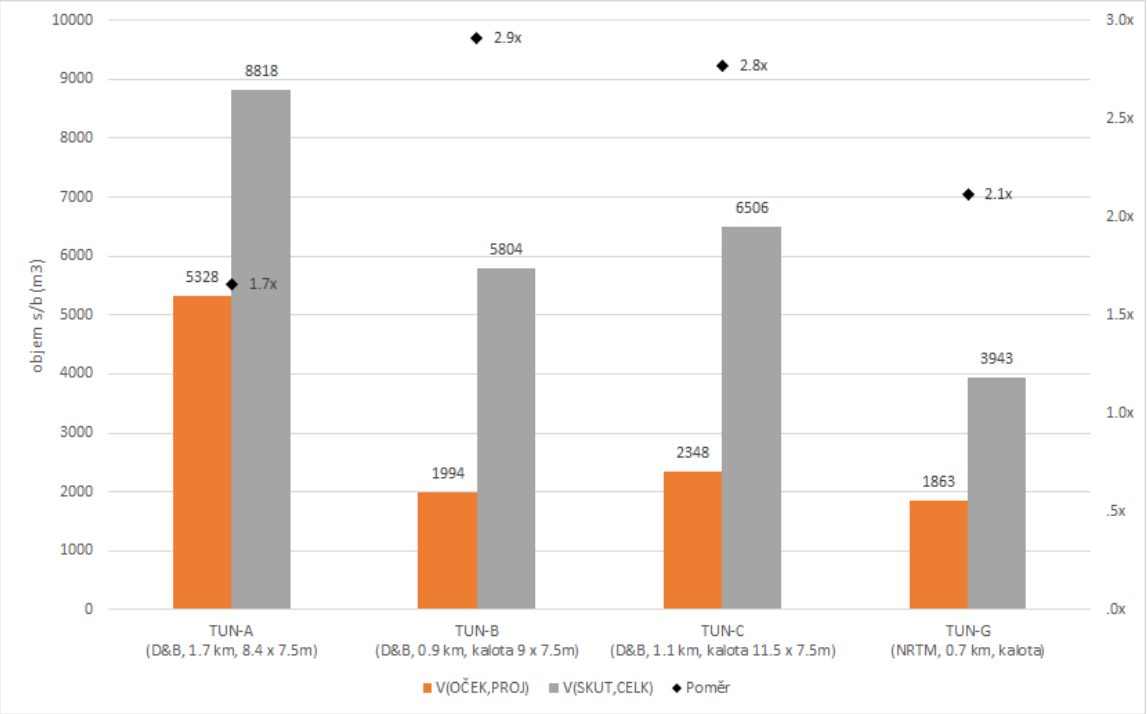
Vzhledem k výše uvedenému je pro objednatele velmi důležité znát při návrhu a výstavbě podzemního díla vztah nákladů materiálových a časových (fixní + společenské + např. zisk). Objednatel řeší možnost opožděného uvedení díla do provozu nejčastěji pomocí penále specifikovaného ve smlouvě o dílo. Toto penále však nemusí nutně nahradit výši škod způsobených opožděným zprovozněním díla.

Pozn.: Bylo by jistě zajímavé na toto téma provést důkladnou analýzu různých typů projektů. Je pravděpodobné, že výsledkem takové analýzy by mohlo být zjištění, že ve většině projektů časový faktor z finančního pohledu několikanásobně převažuje faktor materiálový. To by mohlo vést k tomu, že by již ve fázi návrhu existoval požadavek např. na použití materiálů, resp. prvků, které jsou sice cenově nákladnější, ale umožňují zrychlení výstavby. Příklady jsou všeobecně známy – stříkaný vláknobeton, dočasné hydraulicky rozpínané svorníky v kombinaci s později nainstalovanými trvalými svorníky, prefabrikovaná ostění apod. Pokud tyto prvky nejsou součástí návrhu a/nebo smlouva o dílo nespecifikuje jejich použití, bývá později obtížné je do výstavby zavést.

Při ražbách podzemních děl, kdy je výrub zajišťován stříkaným betonem, ať už prostým, nebo vyztuženým vlákny, dochází pravidelně k tomu, že skutečné aplikované množství s/b je významně vyšší než množství teoretické, specifikované projektem a mnohdy také než množství očekávané, tj. množství plánované zhotovitelem se zohledněním skutečných tříd ražeb. Na Obr. 7.27 je prezentováno navýšení objemu s/b při ražbách skutečných tunelů. Poměr navýšení skutečné a teoretické spotřeby stříkaného betonu $V_{SKUT,SB}$ / $V_{OCEK,SB}$, nabýval hodnot od 1,7 do 2,9. Při ražbách pomocí TBM na projektu Kárahnjúkar, neuvedených na obrázku, se tento koeficient pohyboval nejčastěji v rozmezí 1,5 až 2,2.

Pamatujete na navýšení plánovaného objemu s/b v modelovém Př. 12? Dle třídy ražby se koeficient navýšení objemu pohyboval v rozmezí 1,28 až 1,39, viz Tab. 7.13. Tato hodnota

koeficientu navýšení spotřeby s/b je zřejmě pro řadu projektů optimistická. V Př. 13 jsme řešili možný dopad prodloužení trvání činnosti aplikace s/b na harmonogram ražby a přenesený finanční dopad, který byl významný.



Obr. 7.27 Navýšení objemu s/b na skutečných stavbách a poměr navýšení $V_{SKUT,SB}$ / $V_{TEOR,SB}$ se zohledněním skutečných tříd horninové výztuže SC.

Toto navýšení reálné spotřeby s/b je dáno kombinací vlivů, z nichž některé jsou specifikovány v kapitole 7.5.2. Proč a k jakému navýšení spotřeby dochází, bylo nastíněno v předchozích Př. 12 a Př. 13. Nyní v Př. 14 popíši podrobně rozdíl ve spotřebách stříkaného betonu na několika reálných tunelových úsecích a určím důvody zapříčiňující tento rozdíl. Následně se pokusím jednotlivé vlivy kvantifikovat.

Př. 14 Plánované, očekávané a skutečné objemy s/b

Tento příklad se zakládá na reálných datech ze skutečného projektu ražby kaloty šířky 11,5 m a výšky 6,5 m metodou NRTM. Pouze v několika případech jsou reálná data doplněna modelovými daty. To však dle autora není na překážku, protože cílem je obecně porozumět problematice a nikoli řešit jeden specifický případ.

Byla získána data o skutečné spotřebě s/b na 6 úsecích a tato spotřeba byla porovnána s teoretickou spotřebou (teor. nad skutečnými třídami SC) a s očekávanou spotřebou (plán. nad skutečnými třídami SC), viz Tab. 7.15. V souhrnu bylo na úseku délky 0,7 km potřeba 2,62krát více s/b, než bylo původní teoretické množství pro třídy SC aplikované při ražbě a zároveň 1,97krát více než mohlo být očekávané množství. Koeficienty navýšení spotřeby s/b K_{skut} oproti teoretickým hodnotám se pohybují v závislosti na úseku od 1,73 do 3,33; oproti očekávaným hodnotám (model. data) se pohybují v závislosti na úseku od 1,35 do 2,40. Jinými slovy, pokud si zhotovitel připravil plán spotřeby s/b podobný našemu příkladu a tuto spotřebu promítl do své cenové nabídky, tak skutečnost ho musela nemile zaskočit.

Liší se tato spotřeba s/b od dat z jiných projektů, viz např. Obr. 7.27? Překvapivě ne, zapadá do celkového obrazu toho, co se může stát, když působí společně více nepříznivých vlivů/podmínek stavby.

Tab. 7.15 Spotřeby s/b na 6 úsecích ražby NRTM.

Úsek tunelu	Délka úseku	Třída RSC	Prům. dl. záběru	V teor,sb		Kplan	V ocek,sb		V skut,sb		Kskut	Kskut / Kplan
	m		m	m³ / bm	m³		m³ / bm	m³	m³	m³ / bm		
2	74.9	1	2.42	1.83	136.8	1.28	2.34	175.2	282.0	3.8	**2.06**	1.61
3	168.3	1	2.90	1.83	307.5	1.28	2.34	393.6	532.0	3.2	**1.73**	1.35
4	219.5	1	2.78	1.83	401.0	1.28	2.34	513.3	971.0	4.4	**2.42**	1.89
6	50.5	2	2.02	2.84	143.3	1.39	3.94	199.2	464.0	9.2	**3.24**	2.33
7	101.7	2	2.16	2.84	288.6	1.39	3.94	401.2	934.5	9.2	**3.24**	2.33
8	80.3	2	1.75	2.84	227.9	1.39	3.94	316.8	759.0	9.5	**3.33**	2.40
Celkem	695.2		2.51		1505.2	**1.33**		1999.2	3942.5		**2.62**	**1.97**

Otázky k Př. 14:

1. Jaké bylo teoretické množství s/b stanovené na původně plánovaných třídách v porovnání s teoretickým množstvím s/b stanoveného na skutečných třídách a v porovnání se skutečným množstvím s/b?

2. Provést zpětný odhad hodnot jednotlivých vlivů na prodloužení trvání činnosti aplikace s/b a navýšení spotřeby s/b. Proč bylo skutečně aplikované množství s/b výrazně vyšší než očekávané množství s/b?

3. Jaká je váha činnosti aplikace s/b? Jaký je časový dopad nutnosti aplikovat vyšší objem s/b založený pouze na skutečně měřených časech? Jaká je cena za opožděné uvedení díla do provozu z důvodu nutnosti instalace většího objemu s/b? A co uznatelnost?

Odpovědi na otázky k Př. 14:

Př. 14. - Ot. 1. Jaké bylo teoretické množství s/b stanovené na původně plánovaných třídách v porovnání s teoretickým množstvím s/b stanoveným na skutečných třídách a v porovnání se skutečným množstvím s/b?

Odpověď:

Pro odpověď na tuto otázku potřebujeme nejprve určit původně projektem očekávané třídy SC a také skutečně aplikované třídy SC. Rozdělení očekávaných a skutečných tříd SC je provedeno níže v Tab. 7.16.

Tab. 7.16 Porovnání původně projektem očekávaných tříd SC a skutečně zastižených tříd SC na 6 úsecích ražby.

Úsek	Délka (m)	RSC1(4/1)		RSC2(4/2)		RSC3(5/1)		RSC4(5/2)		RSC6(6/2)				Celk	
		Oček. (m)	Skut. (m)	Oček. (m)	Skut. (m)	Oček. (m)	Skut. (m)	Oček. (m)	Skut. (m)	Oček. (m)	Skut. (m)			Oček. (m)	Skut. (m)
2	74.9	0.0	74.9	74.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			74.9	74.9
3	168.3	0.0	168.3	46.6	0.0	121.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			168.3	168.3
4	219.5	80.0	219.5	0.0	0.0	109.5	0.0	0.0	0.0	30.0	0.0			219.5	219.5
6	50.5	0.0	0.0	50.5	50.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			50.5	50.5
7	101.7	0.0	0.0	9.7	101.7	62.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0			101.7	101.7
8	80.3	0.0	0.0	45.8	80.3	34.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			80.3	80.3

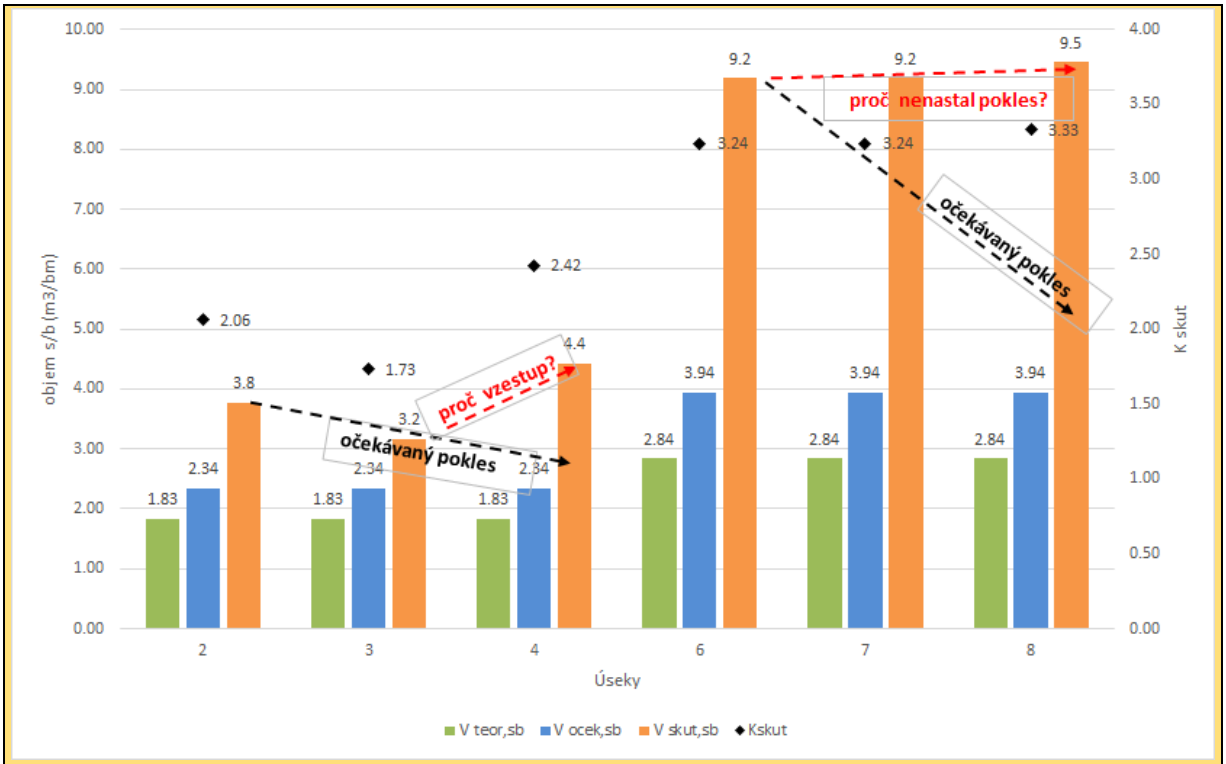
Z tabulky je patrné, že ve skutečnosti se úseky 2 až 4 razily ve třídě SC1 a úseky 6 až 8 ve třídě SC2. Původně očekávané třídy SC však zahrnovaly i některé těžší třídy SC jako např. SC3, SC4 a SC6. Z toho vyplývá, že teoretická spotřeba s/b v původně očekávaných třídách bude vyšší než teor. spotřeba ve skutečně aplikovaných třídách SC.

Porovnání teoretických spotřeb s/b na původně plánovaných třídách SC a skutečně aplikovaných třídách SC spolu s porovnáním skutečné spotřeby s/b je provedeno v Tab. 7.17. Z tabulky je patrné, že koeficient skutečné spotřeby s/b K1 se opravdu snížil v porovnání s koeficientem K2 (viz Př. 14) z důvodu toho, že aplikované SC byly nižší než původně plánované SC. Celkové průměrné navýšení množství spotřeby s/b oproti původnímu předpokladu činí 1,58. Celkové průměrné navýšení množství spotřeby s/b oproti teor. množství stanovenému na skutečných třídách činí 2,62. V úseku č. 3 došlo dokonce vlivem nižších SC ke snížení skutečné spotřeby oproti původně plánované. To je stav, který bychom očekávali na většině úseků.

Tab. 7.17 Porovnání spotřeby s/b – 1) teor. množství na původně plánovaných třídách SC, 2) teor. množství na skutečně aplikovaných třídách SC a skutečné množství

Úsek	Délka (m)	Teoretické množství s/b v jednotlivých třídách RSC					Objemy s/b v jednotlivých úsecích			K1= skut/Teor1	K2= skut/Teor2
		RSC1(4/1) (m3/bm)	RSC2(4/2) (m3/bm)	RSC3(5/1) (m3/bm)	RSC4(5/2) (m3/bm)	RSC6(6/2) (m3/bm)	Teor.1 na oček. RSC (m3)	Teor.2 na skut. RSC (m3)	Skutečnost (m3)		
2	74.9	1.83	2.84	4.25	4.25	6.09	212.6	136.8	282.0	1.33	2.06
3	168.3						649.7	307.4	532.0	0.82	1.73
4	219.5						794.4	401.0	971.0	1.22	2.42
6	50.5						143.3	143.3	464.0	3.24	3.24
7	101.7						418.7	288.6	934.5	2.23	3.24
8	80.3						276.7	227.9	759.0	2.74	3.33
						Celkem	2495.4	1505.0	3942.5	1.58	2.62

Pro lepší představu bude vhodnější spotřeby přepočítat na 1 bm tunelu. Toto si graficky znázorníme, viz Obr. 7.28. Na vodorovné ose grafu jsou vyneseny jednotlivé úseky a pro každý z těchto úseků jsou zobrazeny hodnoty teoretické spotřeby s/b (na skutečných třídách SC), očekávané spotřeby s/b (plánovaná spotřeba na skutečných třídách SC) a skutečné hodnoty spotřeby s/b (realita) v jednotkách m^3/bm. Zároveň s tím je v každém úseku uvedena hodnota skutečného koeficientu vlivu Kskut, tj. poměr mezi skutečným a teoretickým objemem.



Obr. 7.28 Spotřeba s/b – teoretická, očekávaná a skutečná – na 6 úsecích ražby.

Úseky 2, 3 a 4 jsou úseky jednoho tunelu, které na sebe navazují. Úseky 6, 7 a 8 jsou úseky jiného tunelu, které na sebe rovněž navazují. Vzhledem k tomu, že úseky 2 a 6 jsou portálové úseky, tj. spojené se začátkem ražeb, je zcela správné předpokládat, že spadají do tzv. zaučovacího období. Zhotovitel by tedy v dalších navazujících úsecích měl dosáhnout postupného zlepšení kvality práce. V tomto případě se jedná o snížení objemů spotřeby s/b, resp. snížení koeficientu spotřeby (skutečnost / předpoklad). Toto očekávané snížení, resp. trend je vyznačeno ve výše uvedeném grafu černou čárkovanou čárou. Oproti tomu realita, která je vyznačena červenou čárkovanou čárou, ukazuje, že očekávaný trend se nestal skutečností. Důvodem byly různé podmínky stavby a jednotlivé koeficienty vlivu, viz další příklad.

Př. 14. - Ot. 2. Provést zpětný odhad hodnot jednotlivých vlivů na prodloužení trvání činnosti aplikace s/b a navýšení spotřeby s/b. Proč bylo skutečně aplikované množství s/b výrazně vyšší než očekávané množství s/b?

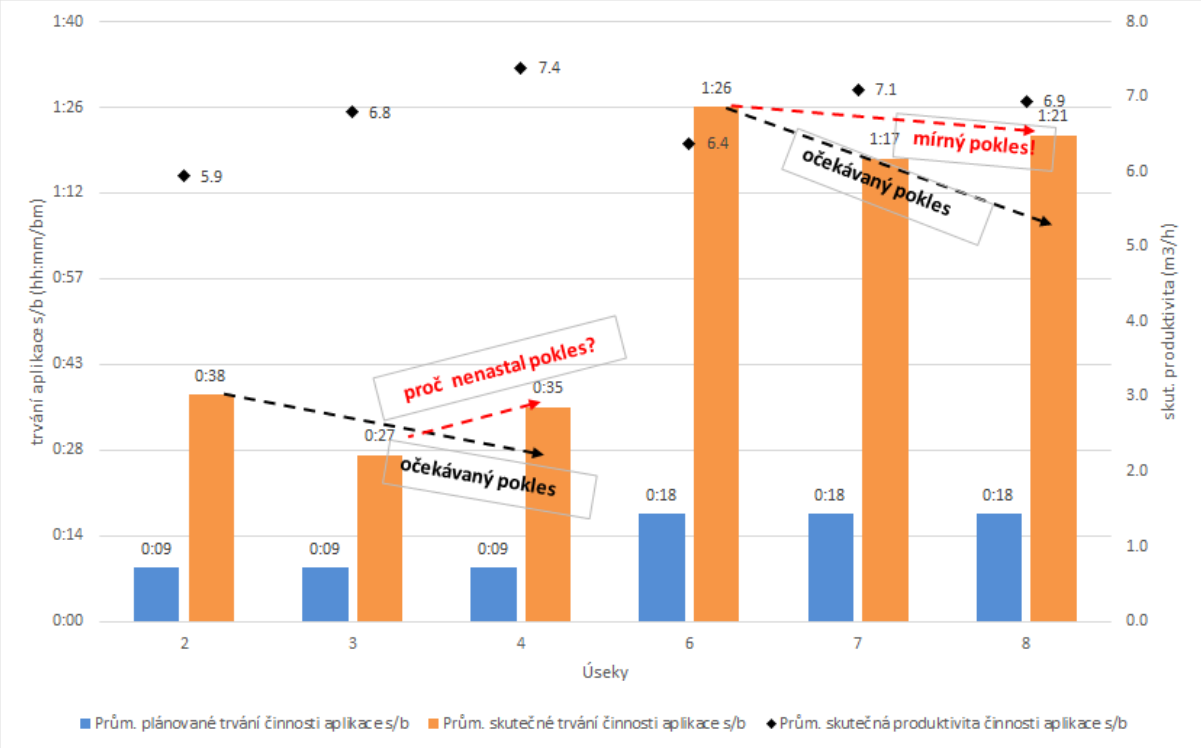
Odpověď:

Skutečná a plánovaná průměrná trvání činnosti aplikace s/b spolu se skutečnou produktivitou jsou uvedeny pro každý úsek tunelu níže v Tab. 7.18.

Tab. 7.18 Trvání a produktivity činnosti aplikace s/b na 6 úsecích.

Úsek	RSC	Prům. plánované trvání činnosti aplikace s/b	Prům. skutečné trvání činnosti aplikace s/b	Prům. skutečná produktivita činnosti aplikace s/b
		hh:mm / bm	hh:mm / bm	m3/h
2	RSC1	0:09	0:38	5.9
3	RSC1	0:09	0:27	6.8
4	RSC1	0:09	0:35	7.4
6	RSC2	0:18	1:26	6.4
7	RSC2	0:18	1:17	7.1
8	RSC2	0:18	1:21	6.9

Z tabulky je zřejmý **významný rozdíl** plánovaného a skutečného trvání aplikace s/b ve třídách SC1 a SC2. Pro názornost jsou trvání a skutečná produktivita aplikace s/b přehledně zobrazeny v grafu na Obr. 7.29.



Obr. 7.29 Trvání činnosti aplikace s/b a skutečná produktivita.

Z grafu vyplývá jedna zajímavost. Zatímco úseky č. 2 až 4 kopírují trend spotřeby s/b z předešlého příkladu, tak u úseku 8 tomu tak není. I přes mírné zvýšení spotřeby betonu (Obr. 7.28) nastal pokles v trvání aplikace s/b. Jaké vlivy mohly zapříčinit tento pokles trvání, resp. zlepšení produktivity?

V Př. 12 byl vypočten plánovaný koeficient vlivu $f_{PLAN,SB}$ pro jednotlivé třídy, kterému odpovídá i plánované trvání.

SC1: $f_{PLAN,SB,SC1} = 0,59$

SC2: $f_{PLAN,SB,SC2} = 0,48$

Ze znalosti skutečných trvání aplikace s/b můžeme zpětně určit celkový skutečný koeficient vlivu v jednotlivých třídách a úsecích.

2: $f_{PLAN,SB,SC1,2} = 0,24$ (=9/38)

3: $f_{PLAN,SB,SC1,3} = 0,32$ (=9/27)

4: $f_{PLAN,SB,SC1,4} = 0,25$ (=9/25)

6: $f_{PLAN,SB,SC2,6} = 0,21$ (=18/86)

7: $f_{PLAN,SB,SC2,7} = 0,23$ (=18/77)

8: $f_{PLAN,SB,SC2,8} = 0,22$ (=18/81)

Důvodem významného nárůstu trvání aplikace s/b oproti plánu byla kombinace různých vlivů. Autor disertace, který se osobně zúčastnil projektu ražby těchto tunelů, se pokusil jednotlivé vlivy vyjádřit číselně na úseku č. 3, viz Tab. 7.19. Jedná se o autorův odborný odhad. Tyto vlivy navazují na výše uvedenou teoretickou část, viz kapitola 7.5.2. V každém úseku a prakticky i v každém záběru bylo působení jednotlivých vlivů rozdílné. Správně by se proto jednotlivé vlivy měly vyčíslit odděleně pro každý záběr, ale to by bylo velmi pracné. Vhodnější, tj. jednodušší a zároveň dostatečně přesné, je zjednodušení, kdy se stanoví shodné podmínky stavby, resp. koeficienty vlivů v jednotlivých úsecích, viz kapitola 6.8.

Tab. 7.19 Odhad jednotlivých vlivů na prodloužení trvání činnosti aplikace s/b.

Faktor	Popis vlivu	Úsek 3		Úsek 4	
		možná plánovaná hodnota	skutečná hodnota	možná plánovaná hodnota	skutečná hodnota
fsb,s1	Koeficient vlivu kvality betonové směsi. Pouze časový faktor. - Betonová směs nebyla dostatečně kvalitní a přilnavá k povrchu. Docházelo k jejímu častému opadávání.	1.00	**0.85**	1.00	**0.90**
fsb,s2	Koeficient vlivu kvality, zkušenosti a motivace operátora stříkací soupravy	1.00	0.99	1.00	0.99
fsb,s3 (přesně)	Vliv nastavení proudu nástřiku betonové směsi	0.90	0.80	0.90	0.80
fsb,s4	Vliv nutnosti aplikovat s/b ve více tenkých subvrstvách	1.00	1.00	1.00	1.00
fsb,s5	Vliv nutnosti okamžité instalace s/b	1.00	1.00	1.00	1.00
fsb,s6	Vliv četnosti a velikosti přítoků podzemní vody	1.00	1.00	1.00	1.00
fsb,s7 (přesně)	Vliv stříkání vyšších objemů betonu než teoretických (netýká se vlivu vyplavování s/b, odrazu a spadu s/b, a opadávání s/b při jeho aplikaci z důvodu zhoršených geotechnických podmínek – je zahrnuto v koeficientech fsb,s6, fsb,s8 a fsb,s9) = (1/Kskut) / fsb,s8; platí Kskut = fsb,s7 x fsb,s8	0.85	**0.64**	0.85	**0.46**
fsb,s8 (přesně)	Vliv odrazu, spadu s/b - 11% spad. Pokud jsou zkoušky spadu, pak známe relativně přesně.	0.93	0.90	0.93	0.90
fsb,s9	Vliv opadávání s/b z důvodu zhoršených geotechnických podmínek	1.00	1.00	1.00	1.00
fsb,s10	Vliv vytíženosti stříkací soupravy v průběhu činnosti bez započtení obecných vlivů	0.98	0.97	0.98	0.97
fsb,s	specifické vlivy	0.69	0.38	0.69	0.29
fsb,o1	Koeficient vlivu zaučování „learning factor LF“	1.00	1.00	1.00	1.00
fsb,o2	Koeficient vlivu zaučování nově příchozích pracovníků	1.00	1.00	1.00	1.00
fsb,o3	Koeficient vlivu poruchovosti mechanizace resp. stříkací soupravy	1.00	0.98	1.00	0.98
fsb,o4	Koeficient vlivu plynulosti dodávek materiálu	1.00	0.90	1.00	0.95
fsb,o5	Koeficient vlivu nepřístupnosti čelby z důvodu zahajování a ukončování činnosti	0.85	**0.98**	0.85	**0.98**
fsb,o6	Koeficient vlivu nepřítomnosti pracovního personálu na čelbě	1.00	0.98	1.00	0.98
fsb,o7	Vliv nedostatečného odvětrávání čelby	1.00	0.99	1.00	0.99
fsb,o	obecné vlivy	0.85	0.84	0.85	0.89
fsb	celkový vliv = fsb,s x fsb,o	0.59	**0.32**	0.59	**0.25**

Z Tab. 7.19 je patrné, že rozdíl v trvání aplikace s/b byl způsoben zejména vlivem aplikace nadměrného množství betonové směsi – koeficient fsb,s7 x fsb,s8 = 0,58 v úseku 3, resp. 0,41 v úseku 4. Velmi významnou roli hrálo také opadávání betonu z klenby z důvodu nekvalitní betonové směsi – koeficient fsb,s1 = 0,85 v úseku 3, resp. fsb,s1 = 0,9 v úseku 4, a další vlivy jako zejména vliv nastavení proudu nástřiku, vliv plynulosti dodávek betonové směsi na čelbu atd.

Je zajímavé, že vliv aplikace zvýšeného množství betonové směsi (0,58) je shodný s velikostí zbývajících vlivů na úseku 3 (0,55 = 0,58 / 0,32), zatímco na úseku č. 4 má vliv aplikace zvýšeného množství betonové směsi (0,41) převažující vliv oproti zbývajícím ostatním vlivům (0,61 = 0,41 / 0,25).

Ačkoli mohl být očekáván pokles v trvání činnosti aplikace s/b z úseku 3 do úseku 4 z důvodu zlepšení kvality dodávané betonové směsi a částečně i z důvodu zaučení posádek provádějících trhací práce ve velmi kvalitním horninovém masivu, tak k tomu nedošlo. Naopak, kvalita betonové směsi se na úseku č. 4 významně zhoršila, což vedlo k jeho zvýšenému opadávání z klenby výrubu (Obr. 7.30) a větší spotřebě.

Obr. 7.30 Nekvalitní betonová směs s nízkou přilnavostí, která krátce po nástřiku opadávala z klenby. Na obrázku nahoře jsou patrné vyboulené části ocelové sítě, které byly zatíženy a prohnuty odpadlým betonem, a to i v případech nástřiku 2. vrstvy s/b.

Mezi úseky 7 a 8 se nechal očekávat pokles v trvání aplikace s/b, viz Obr. 7.29. Ve skutečnosti došlo k mírnému prodloužení trvání této činnosti. Příčinou byl mírný nárůst spotřeby betonové směsi zapříčiněný její zhoršenou kvalitou a výrazně zvýšeným opadáváním z klenby výrubu (Obr. 7.30) (úsek 8 časově odpovídal úseku 4).

Př. 14. - Ot. 3. Jaká je váha činnosti aplikace s/b? Jaký je časový dopad nutnosti aplikovat vyšší objem s/b založený pouze na skutečně měřených časech? Jaká je cena za opožděné uvedení díla do provozu z důvodu nutnosti instalace většího objemu s/b? A co uznatelnost?

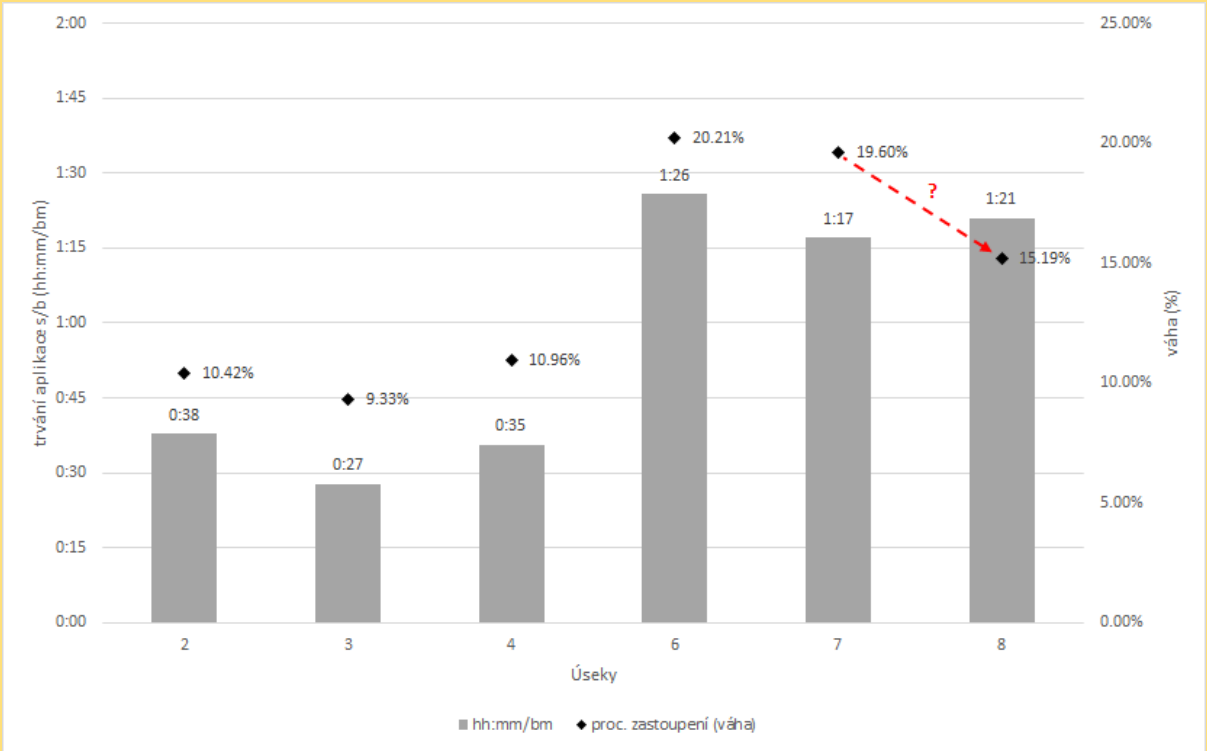
Odpověď:

Váha činnosti aplikace s/b je představena procentuálním časovým zastoupením v jednotlivých úsecích. V Tab. 7.20 byly pro jednotlivé úseky vypočteny trvání a procentuální zastoupení (váha) činnosti aplikace s/b [1]. Váha činnosti aplikace s/b se pohybovala v rozmezí **9,3 až 20,2 %** v jednotlivých úsecích.

Tab. 7.20 Trvání a procentuální zastoupení (váha) činnosti aplikace s/b v 6 úsecích.

Úsek	Trvání ražby (dny)	Délka (m)	Tída RSC	aplikace s/b (na krit. cestě)		
				celkové trvání	proc. zastoupení (váha)	na 1 bm
				hh:mm	%	hh:mm/bm
2	19	74.9	1	47:30	10.42%	0:38
3	35	168.3	1	78:20	9.33%	0:27
4	50	219.5	1	131:30	10.96%	0:35
6	15	50.5	2	72:45	20.21%	1:26
7	28	101.7	2	131:45	19.60%	1:17
8	30	80.3	2	109:20	15.19%	1:21

Váha činnosti poměrně přesně kopíruje trend jejího trvání vyjma úseku č.8, kde váha významně klesla, viz Obr. 7.31. Vzhledem k tomu, že procentuální zastoupení vyjadřuje poměr činností v nějakém časovém úseku, tak je zřejmé, že oproti ostatním úsekům muselo dojít k nárůstu jiné nebo jiných činností. Při kontrole v Tunnel Supervision [1] bylo zjištěno, že v úseku č.8 významně narostly „ostatní prostoje“ na cca 11 % v porovnání se zbývajícími úseky, kde činily cca 4 až 5 %. Na vině byly zejména výpadky dodávek elektřiny do tunelu v letním období z důvodu přehřívání naftových generátorů.



Obr. 7.31 Trvání a procentuální zastoupení (váha) činnosti aplikace s/b v 6 úsecích.

Jaký je časový dopad nutnosti aplikovat vyšší objem s/b (myšleno vyšší oproti očekávání) založený pouze na skutečně měřených časech? Vyjdeme z následujících průměrných hodnot:

- nadspotřeby betonové směsi vypočtenou jako rozdíl skutečné a očekávané spotřeby betonové směsi na 1 bm tunelu, viz Tab. 7.15
- produktivity aplikace s/b, viz Tab. 7.18

a dopočteme trvání aplikace betonové směsi v množství odpovídajícím nadspotřebě na 1 bm tunelu a ze známých délek pro celé jednotlivé úseky.

Úsek 2: 1,46 (= 3,8 – 2,34) m³/bm;	5,9 m³/h;	14 min/bm;	18:32 / 74,9 m
Úsek 3: 0,86 (= 3,2 – 2,34) m³/bm;	6,8 m³/h;	7 min/bm;	21:17 / 168,3 m
Úsek 4: 2,06 (= 4,4 – 2,34) m³/bm;	7,4 m³/h;	16 min/bm;	61:06 / 219,5 m
Úsek 6: 5,26 (= 9,2 – 3,94) m³/bm;	6,4 m³/h;	49 min/bm;	41:30 / 50,5 m
Úsek 7: 5,26 (= 9,2 – 3,94) m³/bm;	7,1 m³/h;	44 min/bm;	75:20 / 101,7 m
Úsek 8: 5,56 (= 9,5 – 3,94) m³/bm;	6,9 m³/h;	48 min/bm;	64:42 / 80,3 m

Na 6 úsecích souhrnné délky cca 0,7 km jsme strávili cca **12 dní** tím, že jsme aplikovali nadbytečné množství stříkaného betonu – rozdíl skutečného oproti očekávanému, nikoli teoretickému, to by bylo ještě více.

Je to tak správně? Zhruba ano, ale přesnější by bylo vzít do úvahy závislost trvání aplikace na množství stříkaného betonu, protože tato závislost se neřídí přímou úměrou. Více viz následující Př. 15.

Jaká je cena za opožděné uvedení díla do provozu z důvodu nutnosti instalace většího objemu s/b? Tato cena se skládá zejména z následujících položek, které jsou časově závislé:

1. Fixní náklady za den stavby: např. 10 000 EUR denně (model. data)
2. Ušlý zisk z provozu díla: např. 3 % z 1 milionu EUR denně = 30 000 EUR denně (model data, tunel k podzemní hydroelektrárně o instalovaném výkonu 1000 MW)
3. Celospolečenský dopad: X (významný, v této disertační nerozebíráno)

Časové zpoždění vzniklé z důvodu instalace nadměrného množství s/b celkem 12 dní. To odpovídá částce **půl milionu EUR + 11x X**. Připomínám, že se bavíme pouze o ražbě kaloty na úseku délky pouhých 0,7 km. Např. u podzemních hydroelektráren dosahují tunely délek několik desítek kilometrů.

A co uznatelnost tohoto prodloužení výstavby? Nejvhodnějším způsobem by bylo určení uznatelnosti jednotlivých vlivů přímo v Tab. 7.19. Některé vlivy, samozřejmě v závislosti od smluvních podmínek konkrétního projektu, by byly uznatelné jako např. vlivy týkající se geologických nadvýlomů, některých obecných vlivů atd. a jiné by byly neuznatelné jako např. technologické nadvýlomy, prostoje z důvodu motivace, nekvalitní betonové směsi atd. Pouze takovým přístupem lze získat správné pochopení o důvodech prodloužení a prodražení výstavby. Zároveň včasné adresování problémů vede často k jejich řešení a tím pádem i k optimalizaci ražeb.

Př. 15 Jaká je skutečná produktivita aplikace s/b v závislosti na aplikovaném množství betonové směsi?

Produktivita činnosti aplikace s/b by měla být závislá na množství aplikované betonové směsi. Trvání činnosti a tím i její výsledná produktivita je minimálně ovlivněna vlivem přistavení a odstavení strojní soupravy, tj. koeficient f_{sb,o_5}. Je zřejmé, že tento faktor negativně ovlivní výslednou produktivitu zejména u malých objemů aplikované betonové směsi, která se nastříká v relativně krátkém čase, zatímco zdržení vlivem nepřístupnosti přistavení a odstavení strojní soupravy by mělo zůstat shodné. Závislosti mezi nastříkávaným množstvím a výslednou produktivitou aplikace s/b by mohla odpovídat narůstající exponenciální funkce.

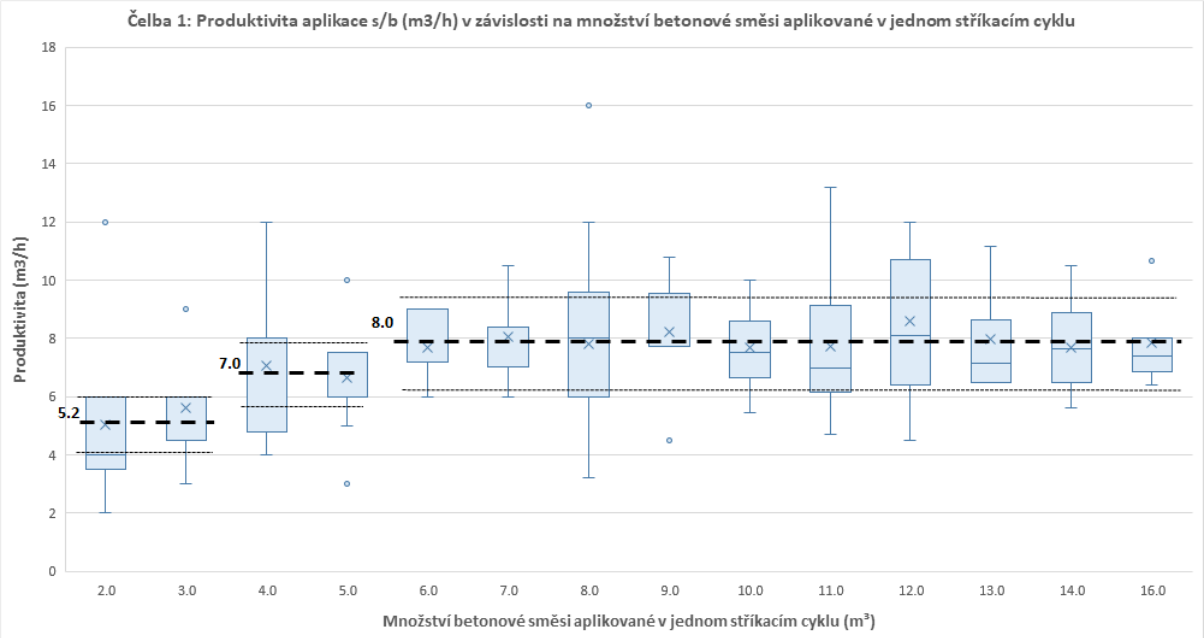
Při ražbě tunelu byla analyzována produktivita ve vztahu k objemu nastříkávané betonové směsi v jednom stříkacím cyklu [2]. Údaje pocházejí ze skutečné ražby 1,5 km dlouhého tunelového úseku probíhající na dvou čelbách.

Čelba 1:

Názorně je závislost produktivity činnosti aplikace s/c na objemu nastříkávané betonové směsi zobrazena v grafu na Obr. 7.32.

V grafu jsou zřetelná 3 pásma. Je zřejmé, že na čelbě 1 závisela produktivita na množství aplikovaného s/b. Optimální množství aplikované směsi v tomto případě bylo takové, které dávalo vyšší produktivity, tzn. od 6 m^3 výše v jednom stříkacím cyklu.

Množství aplik. bet. směsi (m3)	Průměrná produktivita $P_{SKUT,CELK}$ (m^3/h)	Nejčastější rozsah prod. $P_{SKUT,CELK}$ (m^3/h)
2 – 3 m^3	5,2 m^3/h	3,8 – 6 m^3/h
4 – 5 m^3	7 m^3/h	5 – 8 m^3/h
6 – 16 m^3	8 m^3/h	6 – 10 m^3/h



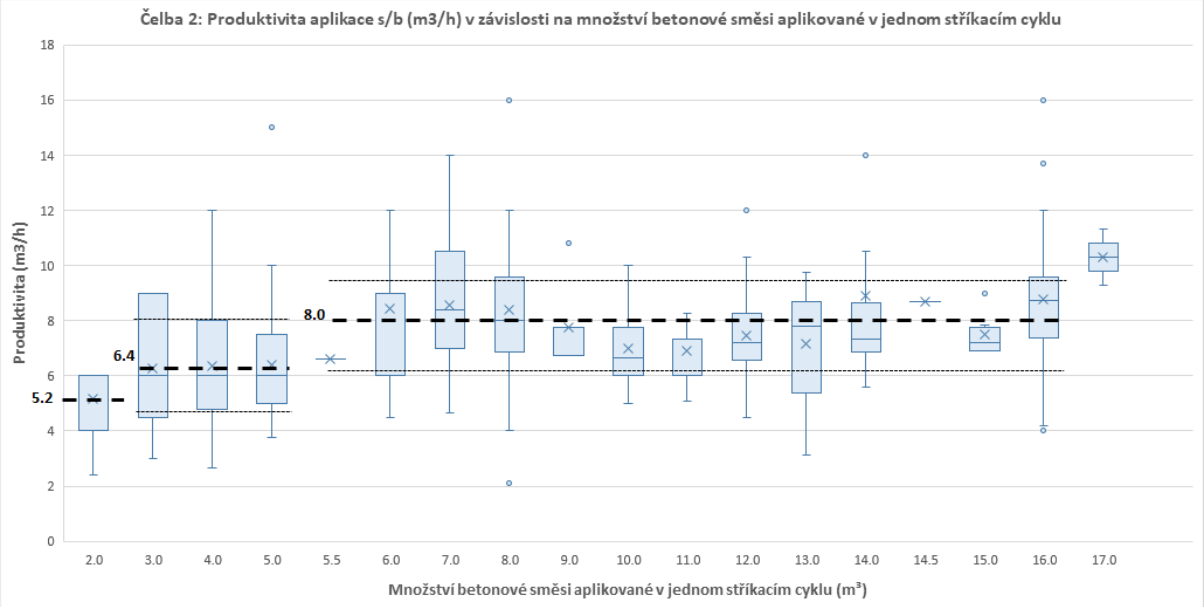
Obr. 7.32 Čelba 1 – Závislost produktivity činnosti aplikace s/b na objemu aplikované betonové směsi, celkový počet měření 217.

Čelba 2:

Názorně je závislost produktivity činnosti aplikace s/c na objemu nastříkávané betonové směsi zobrazena v grafu na Obr. 7.33.

V grafu jsou zřetelná 3 pásma. Je zřejmé, že na čelbě 2 závisela produktivita na množství aplikovaného s/b. Optimální množství aplikované směsi v tomto případě bylo takové, které dávalo vyšší produktivity, tzn. od 6 m^3 výše v jednom stříkacím cyklu.

Množství aplik. bet. směsi (m^3)	Průměrná produktivita $P_{SKUT,CELK}$ (m^3/h)	Nejčastější rozsah prod. $P_{SKUT,CELK}$ (m^3/h)
2 m^3	5,2 m^3/h	4,5 – 6 m^3/h
3 – 5 m^3	6,4 m^3/h	4,8 – 8,1 m^3/h
6 – 16 m^3	8 m^3/h	6,1 – 9,5 m^3/h



Obr. 7.33 Čelba 2 – Závislost produktivity činnosti aplikace s/b na objemu aplikované betonové směsi, celkový počet měření 437.

V obou dvou případech jsou uvedená rozmezí produktivity a průměrné hodnoty shodná nebo velmi podobná. Je patrné, že dochází ke zvyšování produktivity se zvyšujícím se objemem aplikované betonové směsi v jednom stříkacím cyklu. Obecně by tomuto nárůstu měla odpovídat exponenciální křivka, ale v daných konkrétních příkladech je výstižnější provedené rozdělení do pásem.

7.5.4 Shrnutí

Činnost aplikace s/b leží v případě konvenčních ražeb téměř vždy na kritické cestě, u ražeb pomocí TBM otevřeného typu také, pokud se v záběrech aplikují vyšší množství s/b. Na příkladech bylo dokumentováno zejména následující:

- Skutečná spotřeba s/b je na reálných projektech vyšší než očekávaná spotřeba – tj. plánovaná spotřeba přepočítaná na skutečně aplikované SC.

- Vyšší spotřeba s/b má vliv na trvání činnosti, harmonogram ražeb a cenu díla.[9]

- Trvání činnosti aplikace s/b je často prodlužováno celou řadou různých vlivů, které mohou být uznatelné nebo neuznatelné v závislosti na smluvních podmínkách konkrétního projektu. Tyto vlivy lze zpětně určovat – výpočtem a odhadem.

- Produktivita aplikace s/b je nízká při nástřiku nižších objemů betonové směsi.

[9] Pozn.: Samostatnou problematikou je nutnost vyplňování nadvýlomů stříkaným betonem až po hranici „určenou“ ve výkresové dokumentaci projektu. V závislosti na účelu díla a typu ostění je možno nadvýlomy:

a) nevyplňovat nebo vyplňovat s/b pouze minimálně tak, aby byl zaručen jistý definovaný tvar (stabilita, vlnitost). To se týká např. hydrotechnických tunelů, kde není požadavek na mezilehlou izolaci a často ani na sekundární ostění. Může se to také týkat podzemních děl s mezilehlou stříkanou izolací a s definitivním ostěním ze s/b.

b) vyplňovat téměř v celém objemu pomocí s/b. To s sebou nese nejvyšší finanční a časové náklady. Často k takovému řešení dochází v případech, kdy jsou instalovány ocelové rámy do přesné polohy určené projektem a k nim přichycená ocelová síť tak definuje minimální hranici, kam musí s/b dosáhnout.

c) vyplňovat v minimálním objemu pomocí s/b a zbylou část vyplnit pomocí monolitického definitivního ostění. Finanční náklady jsou kompromisní mezi variantou a) a b). Toto řešení je vhodné u tunelů, kde se požaduje instalace sekundárního ostění z monolitického betonu. Zaplnění nadvýlomů pomocí s/b musí zaručit, že bude dodržena maximální tloušťka sekundárního ostění a případně i tvar povrchu pro položení mezilehlé fóliové hydroizolace.

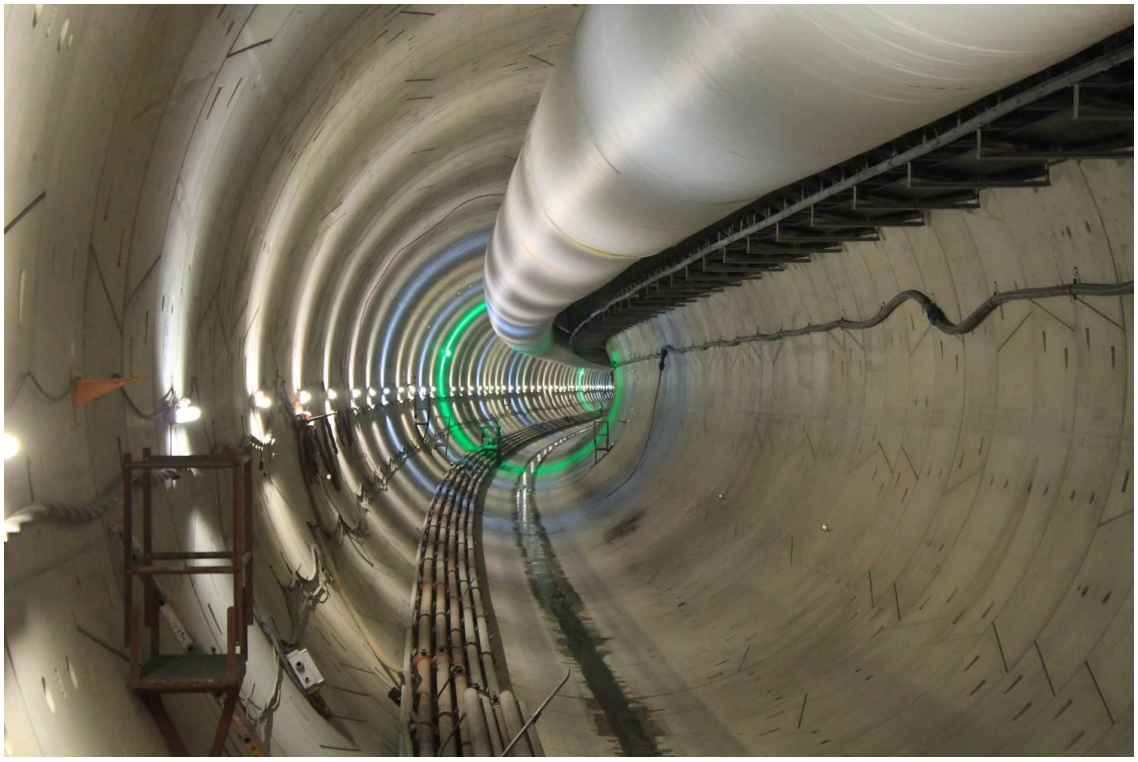
7.6 Zaučovací proces při činnosti budování prstenců, porovnání produktivity směn

7.6.1 Úvod

Tunely ražené pomocí tunelovacích strojů typu EPBM jsou vyztužovány prefabrikovanými železobetonovými segmenty (Obr. 7.34) instalovanými pod obálkou štítu, a to po doražení každého jednotlivého záběru, typicky délky 1 až 2 m. Prstenec je tvořen vždy několika segmenty sestavenými tak, že vyztužují tunel po celém obvodu výrubu, viz Obr. 7.35.

Obr. 7.34 Segmenty (7+1 ks) naložené na msv před portálem, projekt Ejpovice, příloha 5.

Efektivita činnosti budování prstenců je zajisté ovlivněna více faktory, podobnými těm, popsaným v kapitolách 7.4 o odtěžování a 7.5 o aplikaci stříkaného betonu. V této kapitole již nebudeme jednotlivé vlivy rozebírat, ale zaměříme se podrobněji na vliv zaučování.



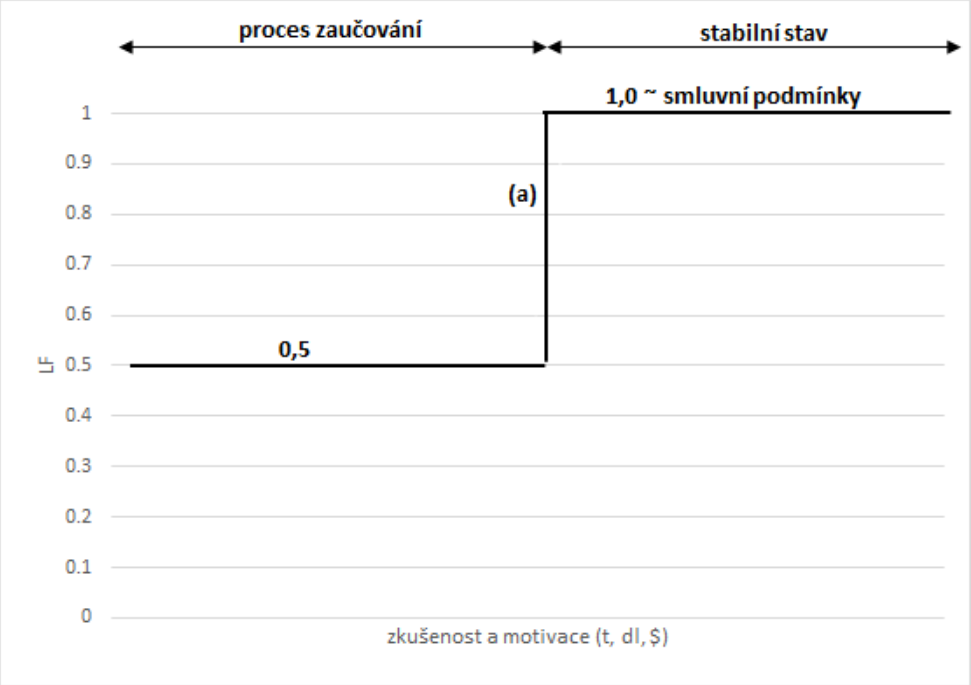
Obr. 7.35 Zpětný pohled z konce tunelovacího stroje do vyražené části tunelu opatřené segmentovým ostěním, projekt Ejpovice, příloha 5.

7.6.2 Teorie zaučovacího procesu

Zaučovací křivka

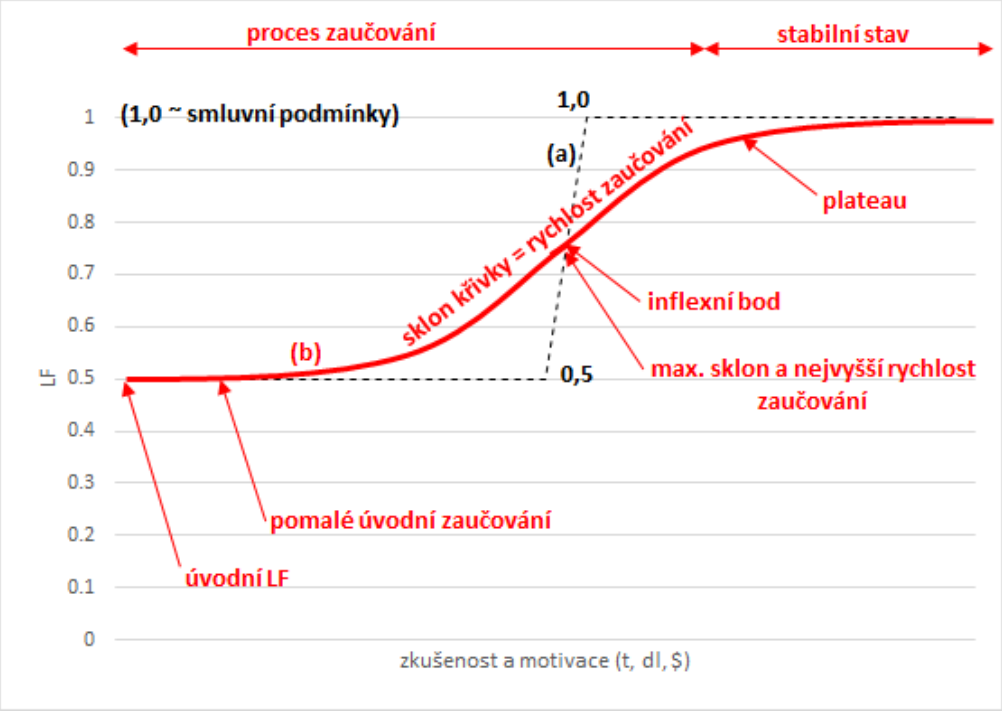
Účastníci výstavby prochází zaučovacím procesem při každém zahájení stavby tunelu, ale také při jakékoli změně, která má dopad na zaběhnuté postupy, jako např. při výrazné změně geologických podmínek mění operátor parametry nastavení tunelovacího stroje při ražbě a hledá jejich nejvhodnější kombinaci. Jedná se tedy opět o zaučovací proces.

Zaučovací proces lze vyjádřit graficky. V tunelářské praxi se ustálilo zavádění vlivu zaučení pro úvodní úsek ražby tunelu pomocí konstantního koeficientu zaučení, anglicky Learning Factor (LF). Mnohdy se tento koeficient zavádí konstantní hodnotou 0,5 na počátečním úseku ražby, např. v délce 0,5 km, viz [40] a příloha 1. Tento vliv zaučení je vyjádřen čárou (a) v grafu na Obr. 7.36.



Obr. 7.36 Zjednodušený průběh koeficientu zaučení LF (a), [40] a Příloha 1.

Ve skutečnosti je vliv zaučování nepřímo úměrný a vhodněji ho popisuje obecná křivka zaučovacího procesu (b), viz Obr. 7.37. Křivka (b) začíná opět na nějaké menší úvodní hodnotě a postupně s narůstající zkušeností a s ohledem na motivaci se přibližuje hodnotě 1,0. Na křivce rozlišujeme úvodní část relativně pomalého zaučování přecházející v část, kde zaučování probíhá nejrychleji (inflexní bod), až se dosáhne relativně stabilního stavu a dochází k ustálení LF. Sklon křivky nám určuje rychlost zaučování. Křivka může v praxi nabývat různých podob. Max. hodnota koeficientu zaučení LF je 1,0.



Obr. 7.37 Obecná křivka zaučovacího procesu (b).

V případě ražeb tunelů je zkušenost závislá zejména na počtu opakování dané činnosti, které rostou v čase (t) a s délkou vyraženého tunelu (dl). Motivace posádek je závislá zejména na způsobu jejich finančního ohodnocení ($) a může být v průběhu ražeb konstantní nebo může být skokově měněna[10]. Pro jednoduchost budeme analyzovat vliv zaučování pro činnost stavění prstenců, která není závislá na geologických podmínkách. Tato činnost je závislá zejména na zkušenosti a motivaci jednotlivých posádek.

7.6.3 Instalace prstenců

Každá z činností a posádek má ve skutečnosti svoji specifickou zaučovací křivku. Ukažme si vliv zaučování na konkrétním reálném příkladu instalace prstenců tunelové ostění. Jednalo se o tunel průměru cca 10 m, kde prstenec délky 2 m (rozměr v podélné ose tunelu) sestával z osmi segmentů. Segmenty byly instalovány pomocí vakuového erektoru. Instalace prstenců vyžaduje vysokou přesnost při osazování jednotlivých segmentů, viz Obr. 7.38.

Obr. 7.38 Osazování segmentů vyžaduje značnou přesnost, tolerance na spárách v řádu jednotek mm.

[10] Pozn.: Připomeňme, že 1 minuta výstavby může představovat např. částku 20 až 40 EUR jen na fixních nákladech zhotovitele. Pro tunel délky 5 km, kde jsou instalovány prstence délky 1,5 m, by se jednalo celkem o 3333 instalací. Pokud by se výkon jednotlivých posádek lišil v průměru o 5 minut při instalaci jednoho prstence, tak by výsledný rozdíl, resp. zpoždění za předpokladu, že každá ze dvou směn nainstalovala přesně poloviční počet všech prstenců, činilo 6 dní. To odpovídá částce ve výši 167 až 334 tisíc EUR jen na fixních nákladech za to, že jedna ze směn instalovala segmenty pomaleji, než bylo možné.

Zároveň při osazování a spojování segmentů na pozicích 9 a 3 hod se práce vykonávaly ve výšce a vyžadovaly značnou obratnost, viz Obr. 7.39. Posádky pro instalaci segmentů, obvykle sestávající ze 4 až 5 pracovníků, procházely zaučovacím procesem. Některé postupy a vybavení se optimalizovaly tak, aby byla zvýšena efektivita provádění při dodržení bezpečnosti práce.

Obr. 7.39 Práce ve výšce při instalaci segmentů na pozicích 9 a 3 hod.

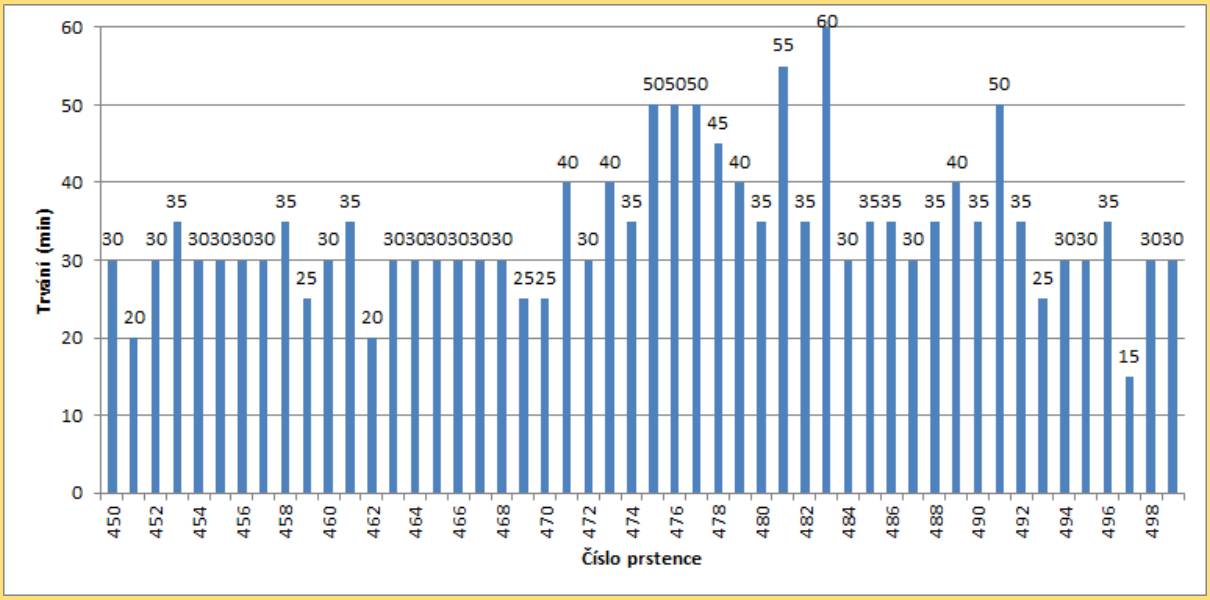
V příkladech porovnáme vliv zaučování na úvodních úsecích ražby dvou tunelů. Navíc se budeme snažit rozlišit zaučovací křivku pro dvě různé směny – denní a noční – a tím porovnávat jejich výkon. Při instalaci prstenců měříme trvání této činnosti. Tím, jak se posádky zaučují, se trvání instalace prstenců snižuje. Zaučovací křivka je inverzní ke křivce trvání. Proto k sestrojení zaučovací křivky použijeme převrácené hodnoty trvání, přičemž za základní dobu instalace prstence budeme brát naměřené minimum, pro které platí LF = 1,0.

7.6.4 Zaučovací křivka činnosti instalace prstenců v příkladech

Stanovení zaučovací křivky si ukážeme na konkrétních příkladech níže. Nejprve analyzujeme trvání činnosti instalace prstenců na dvou tunelech (Př. 16) a poté budeme stanovovat zaučovací křivky (0).

Př. 16 Trvání činnosti instalace prstenců

Vycházíme z reálných dat při ražbě tunelu, kde bylo ostění tvořeno segmenty seskládaných do prstenců. Trvání instalace jednotlivých prstenců bylo zaznamenáváno do časových snímků a následně ukládáno do systému Tunnel Supervision [1]. Trvání instalace jednotlivých prstenců na tunelech č. 1 a 2 je zobrazeno ve sloupcových grafech v příloze 6. Pro každý tunel je zobrazen graf ukazující trvání instalace prstenců pro počátečních 100 kusů a poté graf pro dalších 50 kusů, kdy již trvání činnosti instalace prstenců bylo ustálené. Jeden z těchto grafů, který ukazuje ustálené trvání činnosti instalace prstenců v tunelu č. 2 je níže na Obr. 7.40.



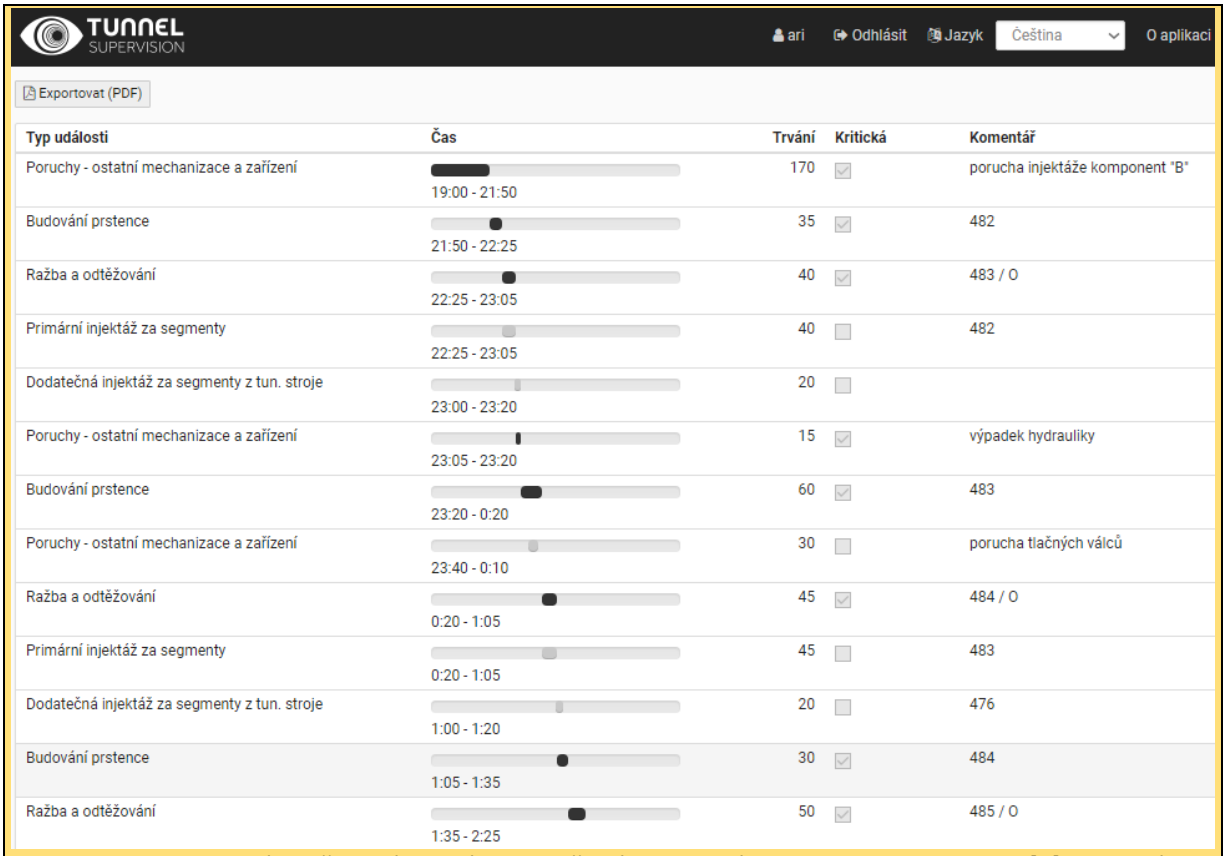
Obr. 7.40 Trvání činnosti instalace prstenců, tunel č. 2, ustálená doba instalace.

Pokud bychom byli pečliví, mohlo by nás zajímat, proč např. trvání stavění prstence č. 483 v délce 60 minut vybočuje oproti ostatním prstencům. Pomocí aplikace Tunnel Supervision [1] můžeme téměř okamžitě z časové snímku zjistit, že v daném čase byla porucha na hydraulice tlačných válců, viz Obr. 7.41.

Stavění prstence tak mohlo probíhat s menší intenzitou, protože kritické bylo přerušení ražby z důvodu oprav hydraulického systému tlačných válců. V tomto případě je tak chybou dávat na kritickou cestu celkové trvání činnosti instalace prstenců. Na kritické cestě by měla být umístěna tato činnost pouze v obvyklém trvání, např. 30 minut, a zbylá doba instalace prstence by již měla ležet mimo kritickou cestu. K opravě hydraulického systému by tak přibylo dalších 30 minut na kritické cestě.

V závislosti na podmínkách smlouvy o dílo a nabídkovém trvání činností je obvyklý čas instalace prstenců součástí placené položky např. fixních denních nákladů stavby, zatímco na opravy poruch tunelovacího stroje již zhotovitel nemusí mít nárok a tento čas by tak neměl být součástí proplácených fixních denních nákladů.

Obvyklé je, že za správnost časových snímků je zodpovědný zhotovitel, přičemž supervize provádí jejich kontrolu. Za tím účelem je vhodné, aby supervize měla tunelové inspektory téměř nepřetržitě na místě ražby.



Typ události	Čas	Trvání	Kritická	Komentář
Poruchy - ostatní mechanizace a zařízení	19:00 - 21:50	170	☑	porucha injektáže komponent "B"
Budování prstence	21:50 - 22:25	35	☑	482
Ražba a odtěžování	22:25 - 23:05	40	☑	483 / O
Primární injektáž za segmenty	22:25 - 23:05	40	☐	482
Dodatečná injektáž za segmenty z tun. stroje	23:00 - 23:20	20	☐	
Poruchy - ostatní mechanizace a zařízení	23:05 - 23:20	15	☑	výpadek hydrauliky
Budování prstence	23:20 - 0:20	60	☑	483
Poruchy - ostatní mechanizace a zařízení	23:40 - 0:10	30	☐	porucha tlačných válců
Ražba a odtěžování	0:20 - 1:05	45	☑	484 / O
Primární injektáž za segmenty	0:20 - 1:05	45	☐	483
Dodatečná injektáž za segmenty z tun. stroje	1:00 - 1:20	20	☐	476
Budování prstence	1:05 - 1:35	30	☑	484
Ražba a odtěžování	1:35 - 2:25	50	☑	485 / O

Obr. 7.41 Ukázka časového snímku uloženého v systému Tunnel Supervision [1]; vhodné pro identifikaci jednotlivých problémů.

Trvání činnosti instalace prstenců bylo na daném projektu zaznamenáváno v násobcích 5 minut. Z praktického hlediska je záznam v 5minutových intervalech vhodný. Pro analýzu zaučovacího procesu této činnosti je přesnost 5 minut dostačující.

Z dat je patrné, že trvání instalace prstenců se pohybovalo obvykle v rozmezí 20 až cca 40 minut, viz příloha 6. Trvání instalace prstenců bylo v některých případech ovlivněno podmínkami stavby a to zejména a) zaučovacím procesem v začátku ražby prvního tunelu, u druhého tunelu by to mělo být teoreticky méně; b) v některých úsecích zvýšenými přítoky podzemní vody, která protékala přes šnek na dopravníkový pás a odtud do počvy, kde musela být čerpána a počva následně čištěna při/před instalací prstenců; c) prostoji, které se nezaznamenávaly odděleně, ale zůstaly skryté v činnosti instalace prstence, viz Obr. 7.41 a výše popsaný případ.

Př. 17 Zaučovací křivky činnosti instalace prstenců

Minimální dosažené trvání instalace jednoho prstence bylo dle informací posádek 17 minut, což je zaokrouhleně 15 minut. Běžně se prstence stavěly do cca 30 minut. Jako referenční hodnotu trvání činnosti instalace prstenců, pro kterou platí, že LF=1, budeme proto uvažovat dobu 30 minut. Je nutno poznamenat, že i pro instalaci prstenců platí podmínky stavby a koeficienty vlivů, kterých však není tolik a nejsou obvykle tak proměnné jako u vykonávání jiných činností. Pro jednoduchost a účely této práce koeficienty vlivu při posuzování zaučovací křivky činnosti instalace prstenců zanedbáme.

Pro sestrojení zaučovací křivky je třeba, abychom hodnoty trvání instalace jednotlivých prstenců $T_{IP,i}$ uvažovali inverzním způsobem. Pokud referenční trvání instalace prstenců činí 30 minut, tak platí

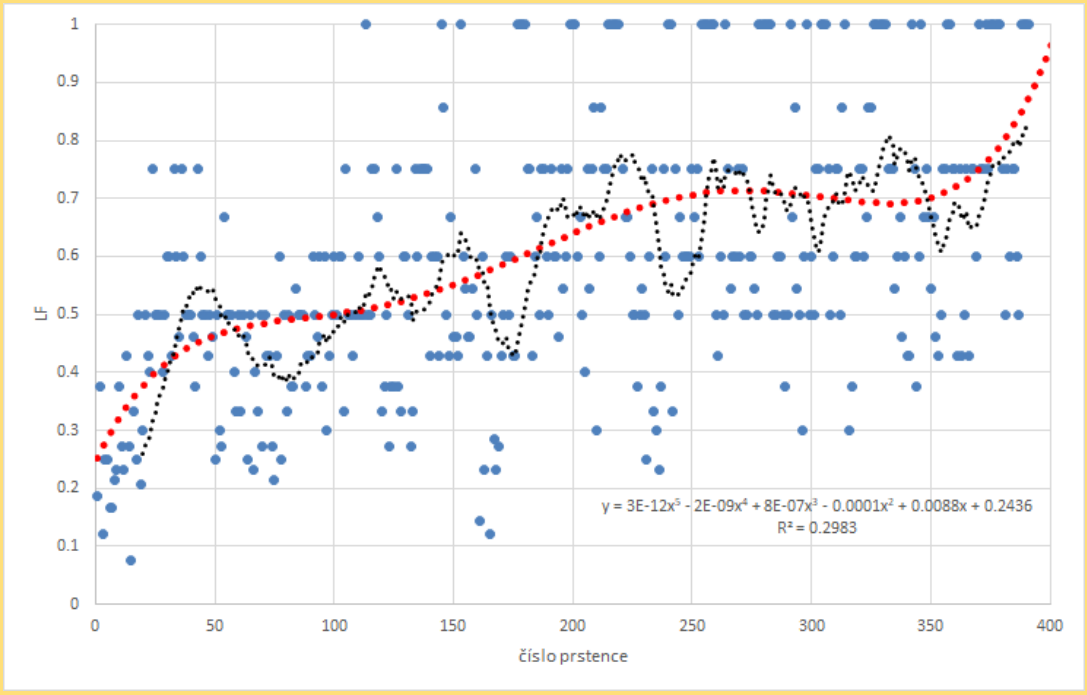
$$\frac{1}{T_{IP,ref}}k = \frac{1}{30}k = 1{,}0$$

a odtud převodní koeficient k = 30 nutný pro sestrojení referenční křivky.

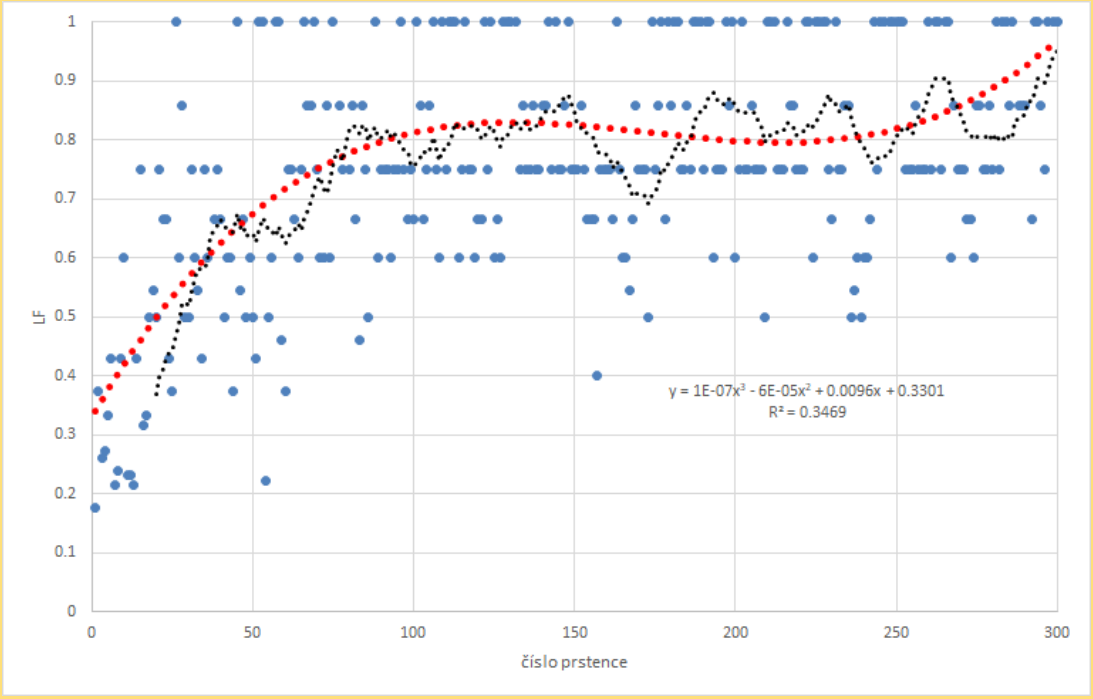
Nyní bychom mohli vynést inverzní hodnoty trvání činnosti instalace prstenců upravené koeficientem k, tj.

$$\frac{1}{T_{IP,i}}k$$

do grafů pro oba tunely č. 1 a 2. vzhledem k variabilitě dat znázorníme rovněž klouzavý průměr po 20 prstencích. Klouzavý průměr přes 20 prstenců odstraňuje extrémní upravené převrácené hodnoty trvání činnosti a lépe vystihuje trend. Výsledek je zobrazen na Obr. 7.42 pro tunel č.1 a na tunel č. 2.



Obr. 7.42 Zaučovací křivka (červeně) platná pro prvních 388 prstenců, převrácené hodnoty trvání instalace vynásobené koeficientem k (modře) a jejich klouzavý průměr na 20 prstenců (černě), tunel č. 1.



Obr. 7.43 Zaučovací křivka (červeně) platná pro prvních 283 prstenců, převrácené hodnoty trvání instalace vynásobené koeficientem k (modře) a jejich klouzavý průměr na 20 prstenců (černě), tunel č. 2.

Do těchto grafů vytvoříme odpovídající zaučovací křivky (Excel). Pro tunel č. 1 je odpovídající křivkou polynomická funkce 5. stupně (vypočtena pomocí metody nejmenších čtverců v Excelu), která je znázorněna červeně na Obr. 7.42. Zaučovací proces je ukončen v prstenci číslo 388.

Pro tunel č. 2 je odpovídající a dostačující křivkou polynomická funkce 3. stupně (vypočtena pomocí metody nejmenších čtverců v Excelu), která je znázorněna červeně na Obr. 7.43. Zaučovací proces je ukončen v prstenci číslo 283.

Závěr

Zaučovací křivka pro tunel č. 2 lépe odpovídá teoretické zaučovací křivce popsané v kapitole 7.6.2, Obr. 7.37. Na zaučovací křivce (Obr. 7.43) je patrné, že proces zaučování začal na hodnotě LF = 0,35, přičemž se z počátku, na prvních cca 40 prstencích, velmi strmě zvyšovala efektivita posádek. Mezi prstenci číslo 100 až 240 došlo k ustálení LF = 0,82, aby se poté efektivita posádek zvýšila na hodnotu LF = 1,0 v průběhu instalace dalších 40 prstenců. Proces zaučování byl zakončen v prstenci číslo 283.

U tunelu č. 1, jehož výstavba předcházela stavbě tunelu č. 1, byl zaučovací proces komplikovanější. Na zaučovací křivce (Obr. 7.42) je patrné, že proces zaučování začal na hodnotě LF = 0,25, přičemž se z počátku, na prvních cca 40 prstencích, velmi strmě zvyšovala efektivita posádek k LF = 0,5. Při instalaci dalších cca 310 prstenců se efektivita zvyšovala pozvolna k LF = 0,7. Závěrečný nárůst LF k hodnotě 1,0 je strmý, na cca 70 prstencích. Proces zaučování byl zakončen v prstenci číslo 388.

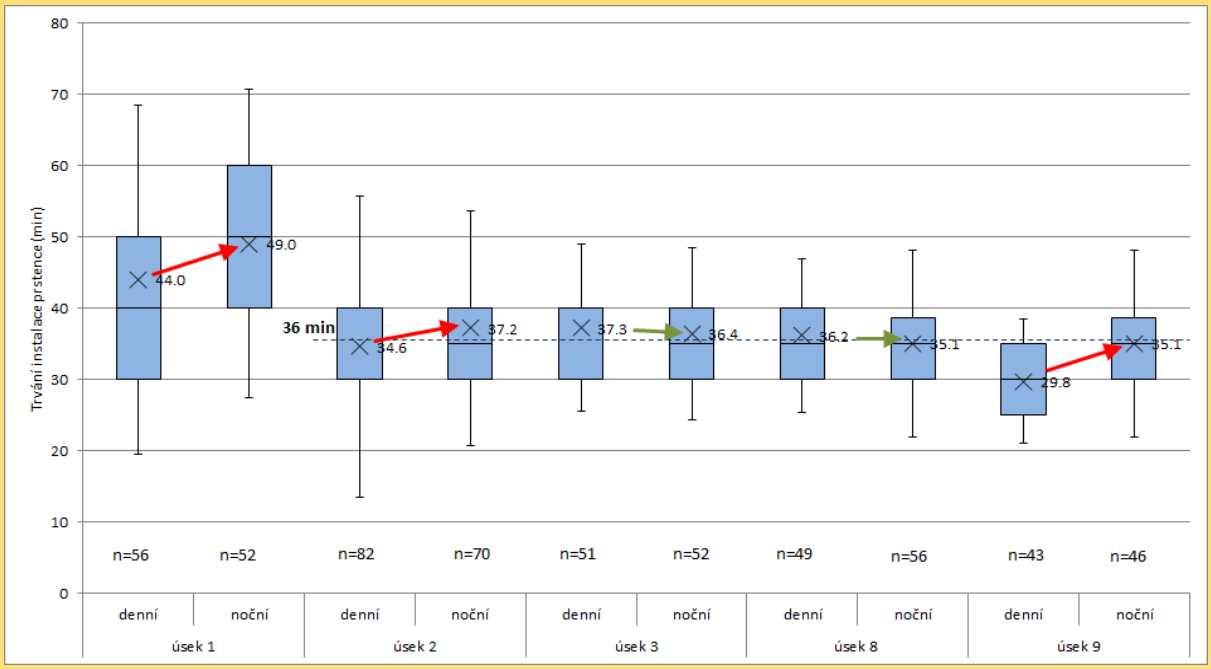
Obecně přijímané zjednodušení, že cca na úvodních 0,5 km ražby (prstence 0 až 250) je efektivita provádění činností poloviční, by nebylo daleko od pravdy pro tunel č. 1. U tunelu č. 2 již rostla efektivita rychleji a toto obecné zjednodušení pro něj neplatí. Zaučovací křivky mohou na konkrétních projektech nabývat různých podob a lze je charakterizovat např. pomocí polynomických funkcí. Provádění porovnání skutečného a nabídkového zaučovacího procesu, vyhodnocení zpoždění nebo případně zrychlení postupu ražeb z důvodu trvání zaučovacího procesu a posouzení uznatelnosti má vliv na skutečný harmonogram, cenu díla a optimalizaci ražeb.

7.6.5 Porovnání výkonů směn při činnosti instalace prstenců

Obecně platí, že porovnání výkonů jednotlivých směn nebo posádek patří mezi základní analýzy, které by účastníci výstavby měli provádět. Na základě porovnání výkonů jednotlivých směn lze rovněž přijímat řešení pro optimalizaci ražeb.

Př. 18 Činnost instalace prstenců – porovnání výkonů denních a nočních směn

Vycházíme z reálných dat při ražbě pěti cca 200 až 300 m dlouhých úseků tunelu. Ostění bylo tvořeno železobetonovými segmenty skládanými do prstenců. Zaznamenané trvání instalace prstenců v jednotlivých směnách – denní a noční – a úsecích je zobrazeno v krabicovém grafu na Obr. 7.44.



Obr. 7.44 Krabicový graf trvání instalace prstenců v jednotlivých směnách a úsecích ražby, kde n je počet měření pro každý úsek a typ směny.

Na třech úsecích (1, 2 a 9) je vidět rozdíl 3 až 5 minut v průměrné době instalace jednoho prstence. Na dvou úsecích (3 a 8) panuje relativní shoda v průměrném trvání instalace jednoho prstence. Úsek č. 1 se odlišuje zejména tím, že se jednalo o počáteční úsek tunelu, kde trvání činností bylo ovlivněno zaučovacím procesem. Proto je průměrná doba a rozptyl trvání instalace prstenců větší než na dalších úsecích.

Úseky na sebe časově přímo nenavazují, nicméně jsou seřazeny v časově rostoucím pořadí. Proto se rozptyl trvání instalace prstenců od 3. úseku včetně ustaluje.

Z porovnání 5 úseků ražby a denních a nočních směn lze konstatovat, že průměrné trvání instalace prstenců je nižší u denních směn o cca 3 až 5 minut v délce tunelu cca 0,74 km (úseky 1, 2 a 9). Na zbývající délce hodnocených úseku, tj. cca 0,4 km (úseky 3 a 8), je trvání instalace prstenců shodné jak v denních, tak i nočních směnách.

Tento příklad představuje reálná data z určitého vybraného výseku ražby. Tato data nereprezentují celý projekt. Účelem příkladu bylo obecně demonstrovat rozdíl výkonu jednotlivých posádek, který se týká většiny činností u všech typů ražeb. Zlepšení/sladění výkonů jednotlivých posádek je součástí optimalizace.

7.6.6 Shrnutí

Ve výše uvedeném příkladu Př. 17 instalace prstenců tunelového ostění jsme určili charakteristické křivky, vystihující faktor zaučení (LF). Zaučovací proces jsme v obou případech charakterizovaly pomocí polynomických funkcí.

Zaučovací křivky mohou na konkrétních projektech nabývat různých podob. Na příkladu bylo ukázáno, že pro tunel, který se razil jako první, platil velmi přibližně zjednodušující předpoklad poloviční efektivity činnosti stavění prstenců na úvodní délce 0,5 km. Ražba druhého tunelu navazovala na dokončení ražby prvního tunelu. Předpoklad zaučovacího procesu s poloviční efektivitou na úvodním 0,5 km se zde neuplatnil. Nicméně i zde byla efektivita činnosti nižší (LF) než 1,0 na nezanedbatelné délce.

Zaučovací proces by měl být zohledněn v nabídkových dokumentacích a přesně charakterizován. Jen tak lze provádět spolehlivé porovnání nabídkových a skutečných výkonů. V opačných případech je možno použít zpětné analýzy a k výsledku se dopočítat. To však představuje náročnější postup, který v případě absence vhodné softwarové aplikace zaznamenávající a vyhodnocující data z ražeb, není téměř možné spolehlivě realizovat.

Na příklad Př. 16 je ukázáno, že je nutné vstupní data pečlivě kontrolovat. Za tím úkolem by supervize resp. účastníci výstavby měli disponovat prostředky (speciální software pro sdílení dat) a dostatečným personálem (inspektoři, tuneloví inženýři).

Efektivitu prováděných činností lze také porovnávat mezi jednotlivými směnami, viz Př. 18. Zde bylo ukázáno, že efektivita provádění byla u nočních směn nižší než u denních na konkrétních tunelových úsecích. Zvyšování efektivity činností patří mezi jeden z optimalizačních prvků ražeb.

7.7 Ražba pomocí tunelovacích strojů

7.7.1 Úvod

V kapitole 4.3.1 byla popsána závislost rychlosti postupu ražby na geotechnických podmínkách a provozních parametrech tunelovacího stroje. Byl popsán současný stav problematiky a závislost postupu ražby na koeficientu využitelnosti tunelovacího stroje.

V dalších kapitolách bude provedeno statistické vyhodnocení některých vybraných parametrů ražby tunelovacími stroji na praktických příkladech. Bude se jednat zejména o následující parametry:

- Součinitel využitelnosti tunelovacího stroje UF,
- Čistá penetrační rychlost NPR,
- a některé další (penetrace PEN, rychlost otáček řezné hlavy CHS atd.).

7.7.2 Součinitel využitelnosti tunelovacího stroje

Jedním z klíčových faktorů při ražbě pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů je součinitel využitelnosti tunelovacího stroje (anglicky Utilization Factor, UF). Součinitel využitelnosti tunelovacího stroje UF vyjadřuje procentuálně čas, po který bude probíhat nebo probíhal proces rozpojování a odtěžování horninového masivu pomocí plnoprofilového tunelovacího stroje.

Součinitel využitelnosti tunelovacího stroje UF je třeba po dobu výstavby sledovat, vyhodnocovat a optimalizovat. Je zřejmé, že doba ražby může být výrazně ovlivněna, pokud faktor vytížení UF bude jiný než hodnota předpokládaná v nabídce. Mezi celkovou rychlostí ražby (Advance Speed, AS), součinitelem využitelnosti tunelovacího stroje UF a čistou rychlostí penetrace (Net Penetration Rate, NPR, viz kapitola 7.7.3) platí následující vztah.

$$AS\ [m/d] = \frac{UF[\%]}{100} \times NPR[mm/min] \times \frac{60 \times 24}{1000}$$

Rovnice 59

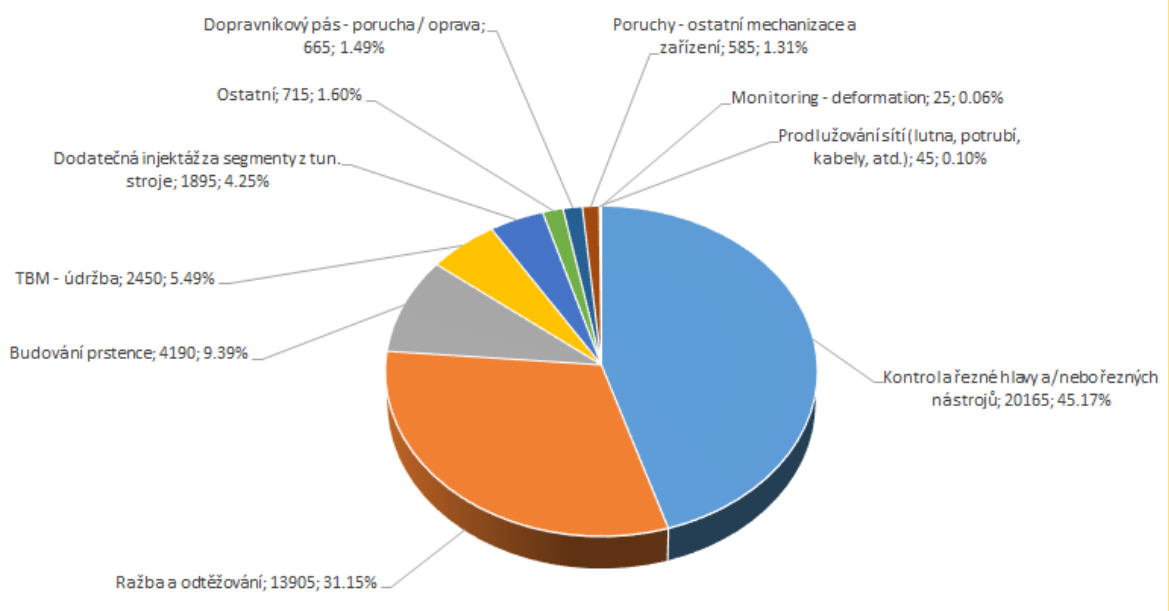
Součinitel využitelnosti tunelovacího stroje UF a celkový rychlost postupu ražby jsou přímo úměrné veličiny.

Je důležité součinitel využitelnosti UF specifikovat již v nabídkové dokumentaci a to v závislosti na třídách ražby pro ražby prováděné pomocí TBM otevřeného typu do skalních hornin. U EPBM je možné navázat UF na relativně homogenní delší úseky ražby, kde jsou obdobné parametry jako např. výška nadloží, litologie, tlak na čelbu. Je nutné zajistit, aby tyto parametry bylo možné jednoznačně vyhodnocovat ve vztahu ke smluvní dokumentaci, tj. aby byly patřičně prozkoumány nebo naprojektovány, specifikovány a stanoveny metody jejich posuzování.

Vyhodnocení využitelnosti tunelovacího stroje a porovnání s nabídkovými hodnotami byly ukázány na praktických příkladech z projektu Kárahnjúkar (příloha 1 a [8]) v kapitole 5 na Obr. 5.3, v kapitole 7.1 na Obr. 7.1 a v kapitole 7.3 v Př. 9.

Př. 19 Využitelnost tunelovacího stroje, projekt Ejpovice

Na projektu výstavby tunelu Ejpovice (příloha 5) zastihla ražba pomocí tunel. stroje v březnu 2015 velmi tvrdé spility s vyšší abrazivitou. Důsledkem bylo časté přerušování ražby, kontrola řezné hlavy a řezných nástrojů a jejich pracná a časově náročná výměna, případně vyvařování v řezné hlavě. Tyto práce, dle údajů vložených a vyhodnocených v aplikaci Tunnel Supervision [1], si vyžádaly 4 5% času, tj. 14 dní z celkového kalendářního času 31 dnů. Tato skutečnost se promítla do využitelnosti stroje, kdy součinitel UF klesl na 3 1% v daném měsíci (13905 minut = 9,66 dnů), viz Obr. 7.45.

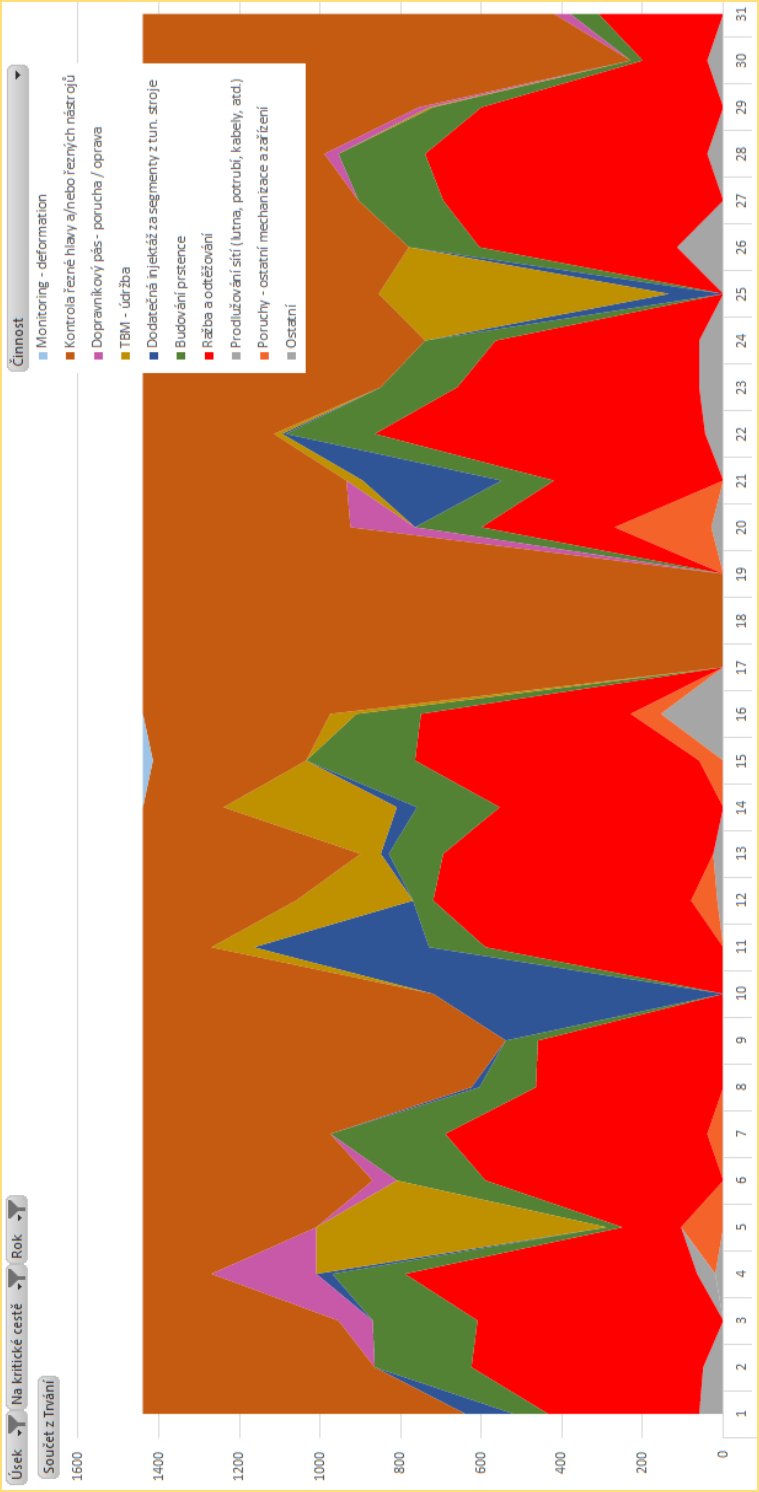


Obr. 7.45 Procentuální rozdělení činností a prostojů při ražbě tunelovacím strojem, UF=31,15%, , projekt Ejpovice, březen 2016 [1]. Číslo uvedené u každé činnosti udává celkový čas v minutách za daný měsíc.

Je zjevné, že v takovém případě je třeba se soustředit zejména na optimalizaci kontrol a výměn řezných nástrojů, protože ty největší míře rozhodují o celkové rychlosti ražby.

Obr. 7.46 Náročná výměna poškozeného centrálního dvojitého disku, v tomto případě 1 hod, projekt Ejpovice.

Podrobnější náhled na využitelnost tunelovacího stroje v daném měsíci nám poskytuje Obr. 7.47, kde je vidět rozdělení jednotlivých činností a prostojů v jednotlivých dnech daného měsíce. Trvání jednotlivých činností a prostojů je vyjádřeno v minutách na svislé ose po jednotlivých dnech (vodorovná osa). Součet za jeden celý den je vždy 1440 minut, protože jsou uvedeny pouze činnosti nacházející se na kritické cestě. Je možno vysledovat, v kterých dnech probíhala ražba (červeně) a kolik času se razilo. Tento graf je vhodný pro vytvoření okamžité podrobné představy o činnostech a prostojích. Např. ihned vidíme, že ve dnech 17. až 19.3. se nerazilo, protože probíhaly nepřetržitě kontrola a výměna řezných nástrojů a práce v řezné hlavě (hnědá barva).



Obr. 7.47 Činnosti a prostoje při ražbě tunelovacím strojem po jednotlivých dnech v březnu 2016, projekt Ejpovice [1]; vodorovná osa – den, svislá osa – čas v minutách.

7.7.3 Čistá penetrační rychlost a některé další parametry ražby tunelovacím strojem

Čistá penetrační rychlost NPR

Jedná se o rychlost postupu tunelovacího stroje vztažená pouze k času, kdy tunelovací stroj razí (anglicky Net Penetration Rate, NPR). Nejčastěji se vyjadřuje v jednotkách mm/min. Platí následující vztah

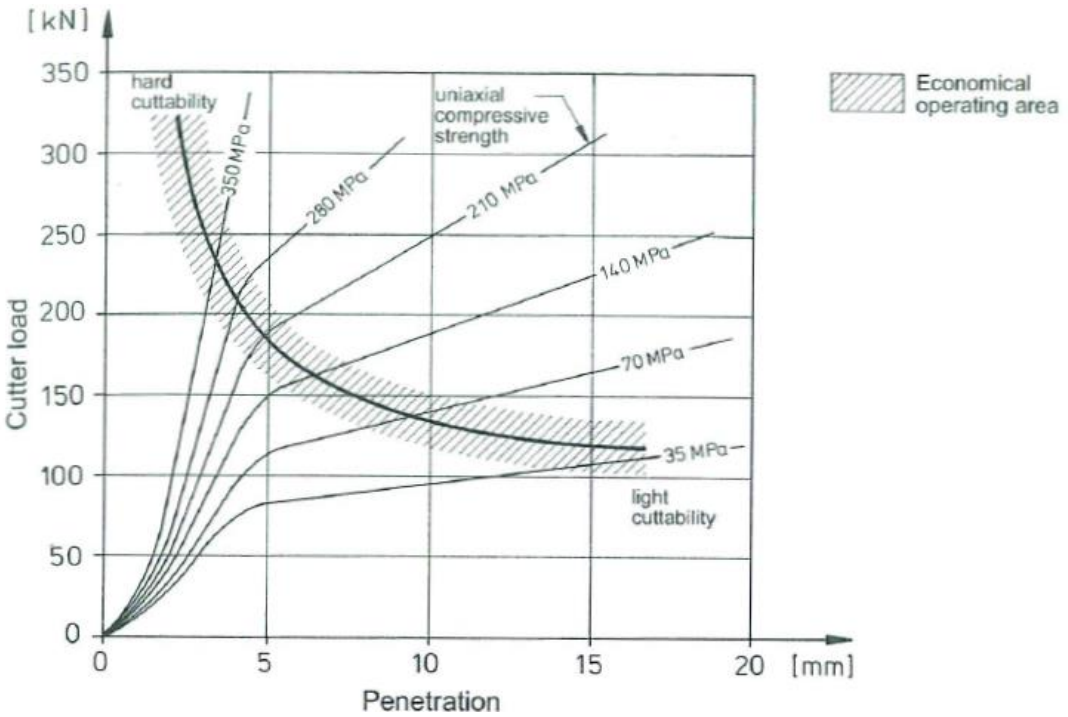
$$NPR = PEN_{(CHS)} \times CHS$$

Rovnice 60

kde PEN je penetrace v jednotkách mm/ot (závisí na CHS [77]),
CHS je rychlost otáček řezné hlavy v jednotkách ot/min = rpm.

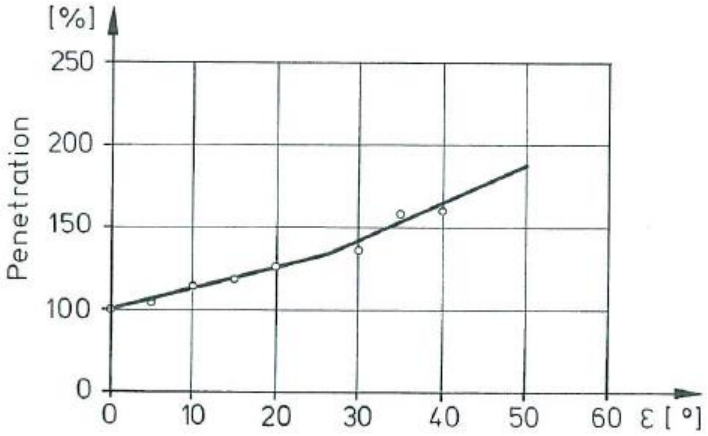
Penetrace

Mezi geologickými podmínkami, zatížením valivých dlát a penetrací platí obecně vztah dle Obr. 7.48 [23]. Z něho vyplývá, že ekonomická ražba probíhá okolo vyšrafované plochy. Místa zlomů jednotlivých křivek pevností horniny UCS představují kritické zatížení, pod kterým ražba TBM probíhá neekonomicky pouze na principu kamenného mlatu. Pokud je pevnost horniny velmi vysoká, je penetrace dosahovaná s normálními valivými dláty minimální a ražba je neekonomická.



Obr. 7.48 Zjednodušený vztah mezi pev. hor. UCS, zatížením valivých dlát a penetrací [23].

Tato závislost je relativně jednoduchá, má však podstatné omezení. Penetrace nezávisí pouze na pevnosti horniny, ale na dalších faktorech, viz kapitola 4.3.1. Například Büchi popsal závislost penetrace na orientaci diskontinuit, viz Obr. 7.49.



Obr. 7.49 Penetrace TBM v závislosti na orientaci diskontinuit, kde ε je úhel sevřený osou tunelu a hlavní orientací diskontinuit, Büchi [23].

Snahou některých výrobců tunelovacích strojů je udržovat penetraci v optimálním rozsahu tak, aby nedocházelo k výraznému opotřebování řezných nástrojů. Například na projektu Neelum-Jhelum (příloha 3), kde razily dvě TBM otevřeného typu společnosti Herrenknecht, byla snaha udržovat penetraci v rozmezí 12 až 14 mm/ot. V případě penetrace menší než 5 mm/ot bylo zvýšené riziko poškozování řezných nástrojů. Minimální doporučená penetrace na projektu Ejpovice (příloha 5) činila 7 mm/ot při ražbě v tvrdých skalních horninách. V případě nedodržení minimální penetrace probíhá rozpojování horninového masivu neekonomicky na principu kamenného mlatu, viz Obr. 7.48.

Přítlačná síla

Jedná se o sílu, kterou vyvozují tlačné hydraulické válce na řeznou hlavu a která se přes řezné nástroje přenáší do horninového masivu. Velikost přítlačné síly se nastavuje zejména v závislosti na pevnosti horninového masivu.

Př. 20 Přítlačná síla TBM otevřeného typu do skalních hornin, projekt Neelum-Jhelum

Tab. 7.21 ukazuje nastavení přítlačné síly při ražbě dvou TBM otevřeného typu na projektu Neelum-Jhelum (příloha 3) v závislosti na zastiženém geotypu [78].

Tab. 7.21 Přítlačná síla TBM použitá v jednotlivých geotypech, projekt Neelum-Jhelum [78].

Geotyp	Přítlačná síla F (kN)
Jílovce	F < 3 000
Prachovce	2 750 < F < 3 750
Pískovce (UCS do 100 MPa)	F > 3 500

Krouticí moment

Jedná se o moment, který je potřeba k tomu, aby byla zajištěna rotace řezné hlavy a řezných nástrojů za účelem rozpojování horninového masivu. Krouticí moment je v závislosti na geotechnických podmínkách nižší, pokud je horninový masiv rozpukaný, menší pevnosti a čelba je hladká. V případě, že horninový masiv je vyšší pevnosti, není rozpukaný a/nebo je jeho povrch drsný, je potřeba vyvinout větší krouticí moment. Pokud horninový masiv před řeznou hlavou není stabilní, tvoří se nadvýlomy, tak potřebný krouticí moment je rovněž větší.

Př. 21 Kroutící moment TBM otevřeného typu do skalních hornin, projekt Neelum-Jhelum

Tab. 7.22 ukazuje hodnoty krouticího momentu při ražbě dvou TBM otevřeného typu na projektu Neelum-Jhelum (příloha 3) v závislosti na rozpukanosti horninového masivu [78].

Tab. 7.22 Krouticí moment TBM v závislosti na rozpukanosti hor. masivu, projekt Neelum-Jhelum [78].

Rozpukanost horninového masivu	Krouticí moment T (kNm)
Silně rozpukaný	T < 1 000
Středně rozpukaný	1 000 < T < 1 500
Masivní, drsný povrch	T > 1 500

Rychlost otáček řezné hlavy

Rychlost otáček řezné hlavy (anglicky Cutter Head Speed, CHS) je nejčastěji udávána v jednotkách počet ot/min. Obecně platí, že rychlost otáček by měla být vyšší v případě tvrdé masivní skalní horniny a nižší v případě rozpukaných poloskalních hornin a zemin.

Např. v případě tvrdých skalních hornin je potřeba vyšší přítlačná síla, aby byla dosažena odpovídající penetrace. To ovšem vede k vyššímu krouticímu momentu. Je třeba balancovat přítlačnou sílu, krouticí moment a rychlost otáček řezné hlavy. Rychlost otáček řezné hlavy musí být v takovém případě zvýšena, aby nedošlo zablokování valivých dlát, která by se nemohla otáčet a došlo by k jejich rychlému opotřebení jednostranným obroušením (flat).

Př. 22 Rychlost otáček řezné hlavy TBM otevřeného typu do skalních hornin, projekt Neelum-Jhelum

Tab. 7.24 a ukazují závislost počtu otáček řezné hlavy, přítlačné síly a krouticího momentu při ražbě dvou TBM otevřeného typu na projektu Neelum-Jhelum (příloha 3) [78].

Tab. 7.23 Závislost otáček řezné hlavy a přítlačné síly TBM, projekt Neelum-Jhelum [78].

Přítlačná síla F (kN)	Rychlost otáček řezné hlavy CHS (ot/min)
F < 3 000	CHS < 3,0
2 750 < F < 4 000	3,0 < CHS < 3,5
4 000 < F < 5 000	3,5 < CHS < 4,5
F > 5 000	CHS > 4,5

Tab. 7.24 Závislost otáček řezné hlavy a krouticího momentu TBM, projekt Neelum-Jhelum [78].

Kroutící moment T (kNm)	Rychlost otáček řezné hlavy CHS (ot/min)
T < 1 000	CHS < 3,0
1 000 < T < 1 500	3,0 < CHS < 3,5
T > 1 500	CHS > 3,5

Vyhodnocení parametrů ražby tunelovacími stroji je důležité pro porozumění souvislostí a hledání nastavení některých parametrů tak, aby ražba probíhala optimálně. V příloze 8 jsou k dispozici graficky zobrazené průběhy některých parametrů ražby tunelovacím strojem v čase a staničení. V Př. 23 budou podrobně vyhodnoceny některé parametry ražby tunelovacím strojem na jednom z tunelových úseků v závislosti na měnící se poloze čelby v průběhu ražby každého jednotlivého záběru.

Př. 23 Parametry ražby tunelovacím strojem v průběhu ražby jednoho záběru, projekt Ejpovice

V tomto příkladu jsou vyhodnoceny parametry ražby tunelovacího stroje pro jeden relativně krátký úsek č. 1 délky cca 217 m. Navíc jisté podmínky stavby byly v tomto úseku neobvyklé. Tento úsek tak nepředstavuje reprezentativní vzorek dat pro celou ražbu tunelu. Nicméně pro daný příklad je plně postačující. Data byla získána ze softwaru IRIS a následně importována do softwaru Tunnel Supervision [1] za účelem jejich dalšího zpracování a vyhodnocení.

Ražba probíhala po jednotlivých záběrech délky cca 2,0 m. Bude nás zajímat, zda parametry ražby jsou závislé na tom, v které části záběru se nacházíme. Důvod je ten, že budeme předpokládat, že při rozjezdu a dojezdu tunelovacího stroje mění některé parametry ražby systematicky svoje hodnoty. Budeme sledovat velikost a rozsah těchto změn. Pokusíme se obecně popsat tyto změny.

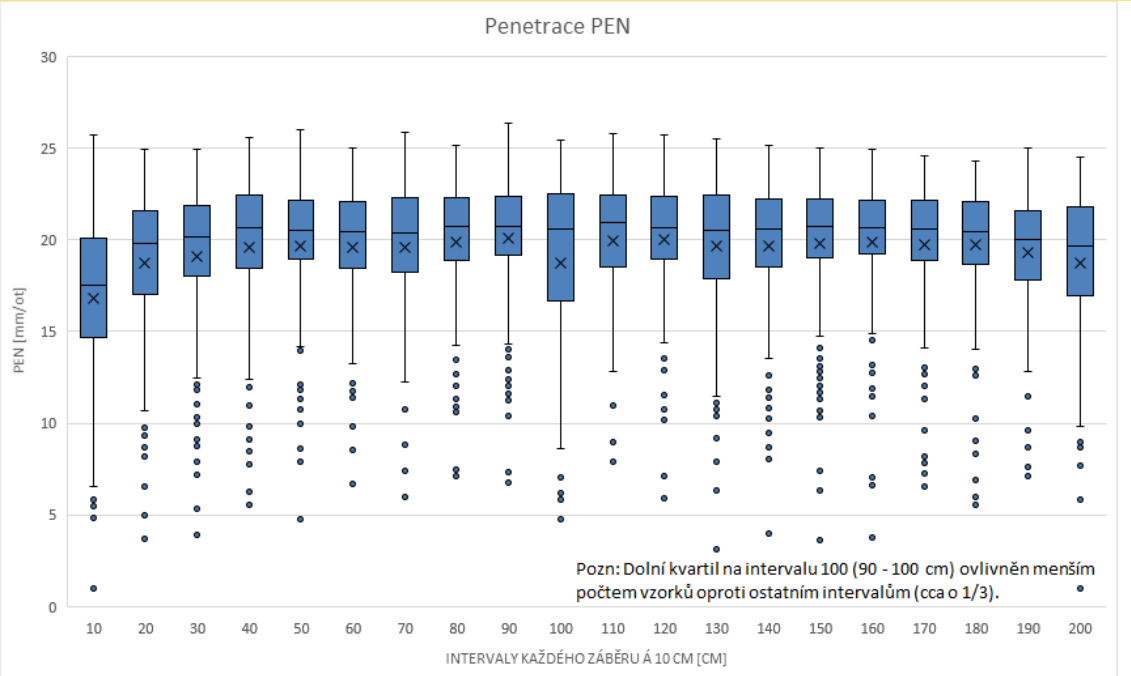
Tento příklad je zajímavý i tím, že podobné podrobné analýzy se obvykle nedělají. Většinou jsou k dispozici pouze analýzy průměrů jednotlivých parametrů za záběr.

Pro vybrané parametry ražby vytvoříme krabicové grafy a grafy ukazující průběh mediánu a horního (75%) a dolního kvartilu (25%).

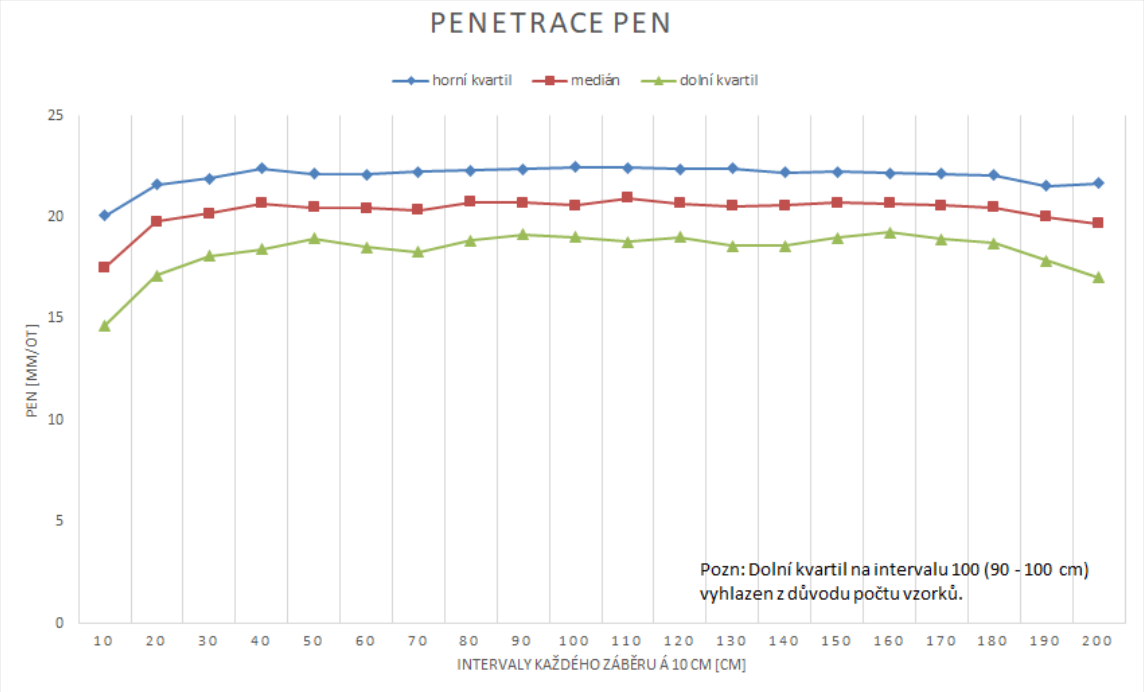
Vybrané vyhodnocované parametry ražby:

- penetrace PEN, viz Obr. 7.50 a Obr. 7.51
- otáčky řezné hlavy CHS, viz Obr. 7.52 a Obr. 7.53
- čistá razící rychlost NPR, viz Obr. 7.54 a Obr. 7.55
- krouticí moment T, viz Obr. 7.56 a Obr. 7.57
- přítlačná síla CF, viz Obr. 7.58 a Obr. 7.59

Pozn.: Parametry ražby jsou automaticky snímané v intervalech 6 sekund a ukládané do softwaru IRIS. Z důvodu dalšího zpracování a značného množství dat byly parametry zprůměrovány po 1 minutě. Pro prvotní přiblížení problematiky variování hodnot po délce jednotlivých záběrů můžeme toto zjednodušení akceptovat (analýza všech dat potvrdila tendence zobrazené v níže uvedených grafech).

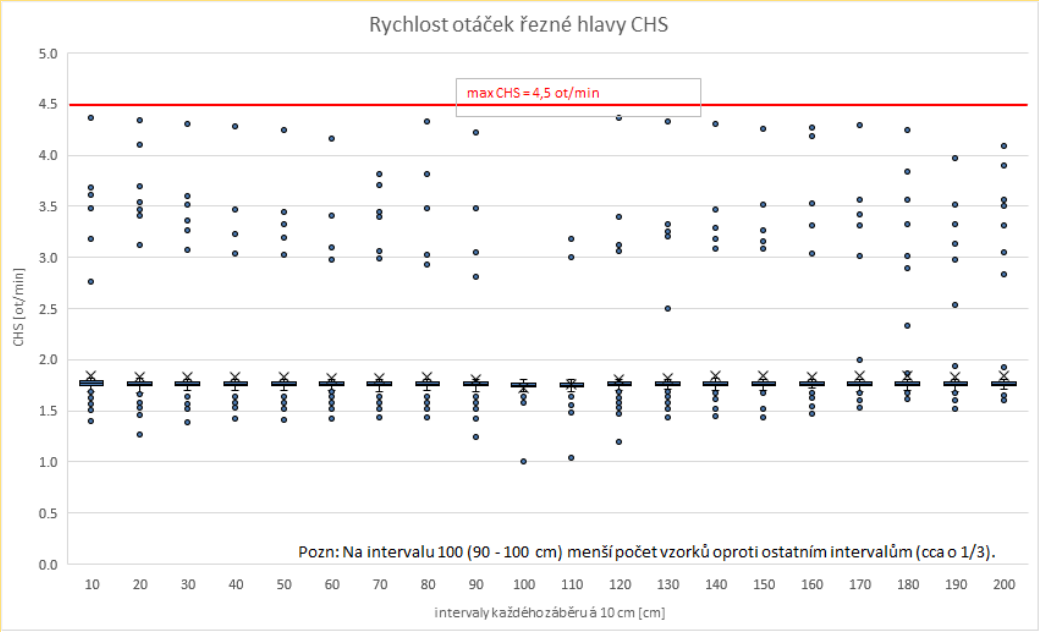


Obr. 7.50 Krabicový graf penetrace EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.

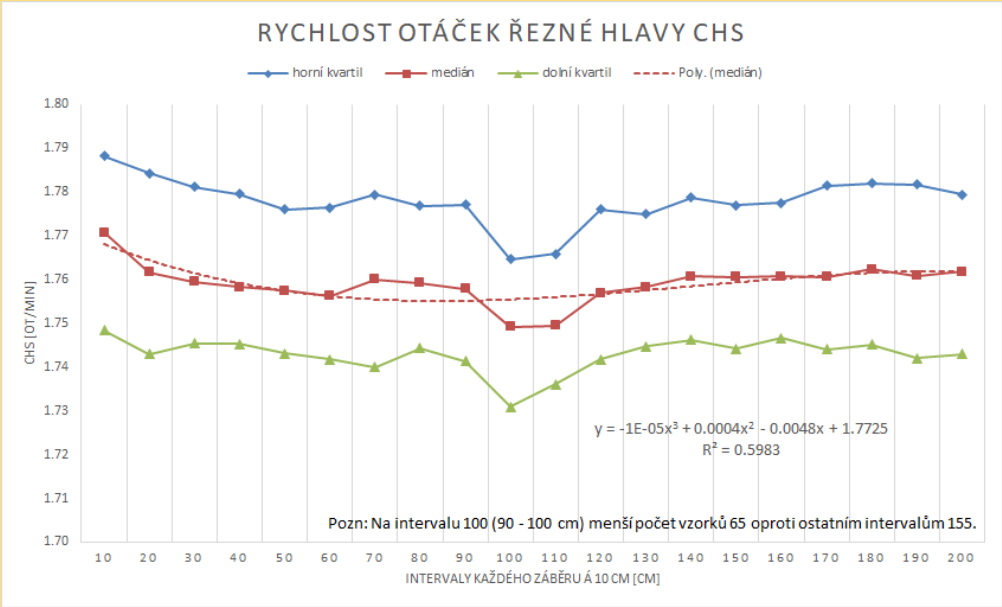


Obr. 7.51 Medián, horní (75%) a dolní (25%) kvartil průběhu penetrace EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.

Hodnoty penetrace **PEN** jsou relativně vysoké, což potvrzuje, že ražba úseku č. 1 probíhala v prostředí poloskalních až rozložených hornin. Medián penetrace se nejčastěji pohybuje okolo 20,5 mm/ot (mezilehlé hodnoty 40–180 cm). Z grafů na Obr. 7.50 a Obr. 7.51 je patrné, že hodnoty penetrace jsou na úvodních cca 30 cm a na závěrečných cca 20 cm každého záběru nižší, např. v úvodním intervalu 0–10 cm je medián (17,5 mm/min) nižší o 15 % oproti mezilehlým hodnotám (20,5 mm/min).



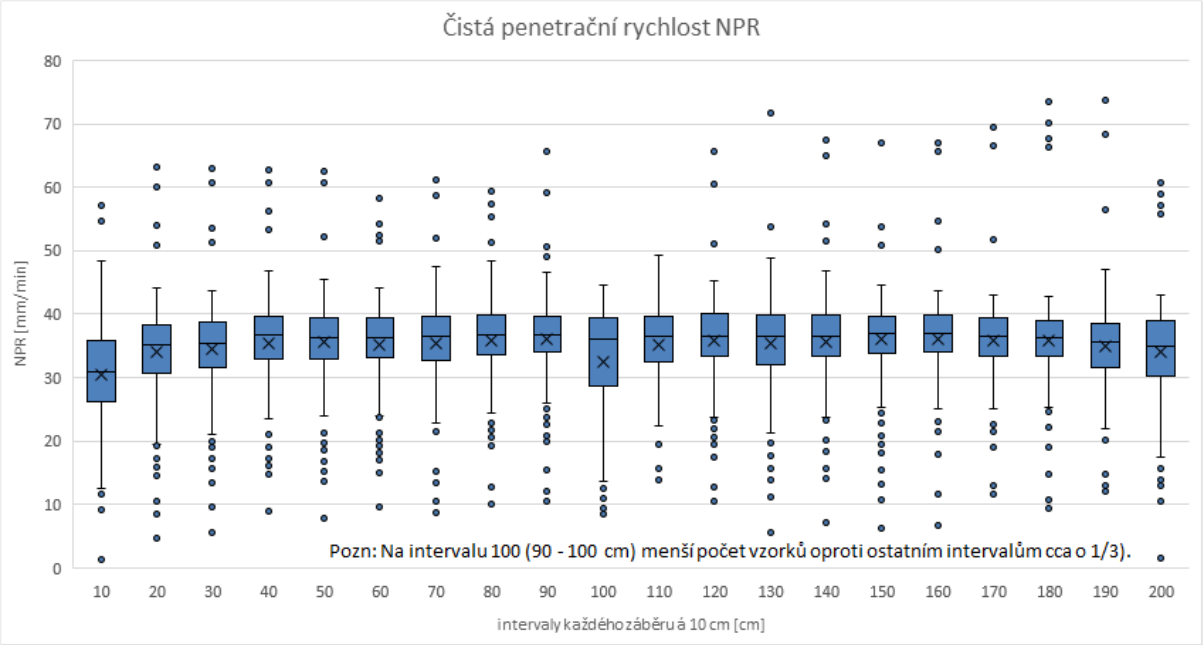
Obr. 7.52 Krabicový graf rychlosti otáček řezné hlavy EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.



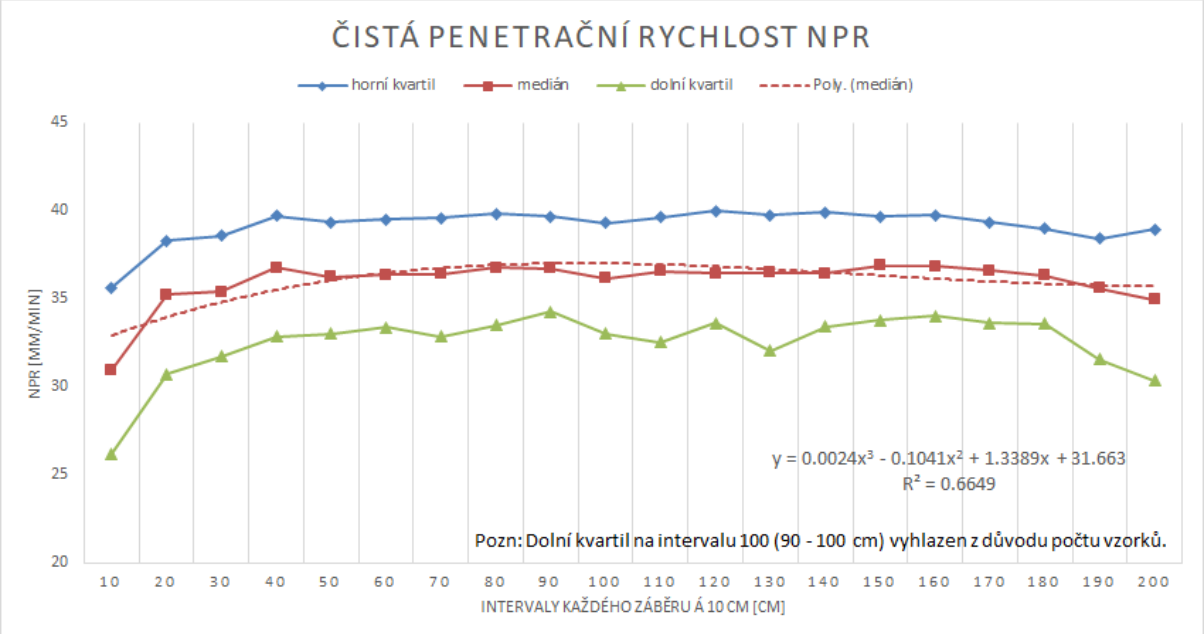
Obr. 7.53 Medián, horní (75 %) a dolní (25 %) kvartil průběhu penetrace EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.

Hodnoty otáček řezné hlavy **CHS** jsou relativně nízké, což potvrzuje, že ražba úseku č. 1 probíhala v prostředí poloskalních až rozložených hornin. Průměr i medián CHS se shodují. Z krabicového grafu na Obr. 7.52 a grafu průběhu kvartilů na Obr. 7.53 je vidět, že 50 % hodnot se nachází ve velice úzkém intervalu. Průběh mediánu CHS po délce záběru je možný charakterizovat polynomickou funkcí 3. stupně (Excel), viz Obr. 7.53. Konstatování, že počet otáček byl v 50 % případů konstantní 1,76 ot/min (1,74 až 1,78 ot/min) v každém intervalu každého záběru je z hlediska praxe dostatečné.

Odlehlé zvýšené hodnoty otáček řezné hlavy vzhledem k jejich pravidelnému rozložení a počtu po délce záběru signalizují, že cca 6 záběrů bylo pravděpodobně realizováno v prostředí pevnějšího horninového masivu. Tomu odpovídají i odlehlé snížené hodnoty penetrací v počtu do cca 10 ks v krabicovém grafu na Obr. 7.51.

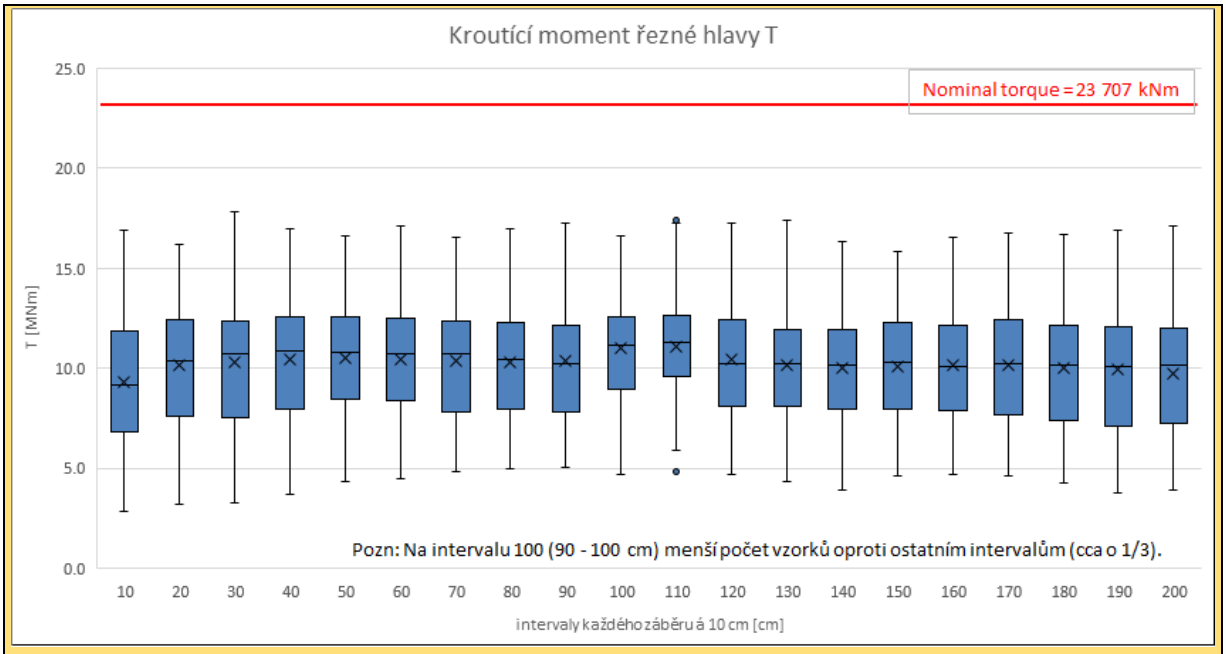


Obr. 7.54 Krabicový graf čisté penetrační rychlosti EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.

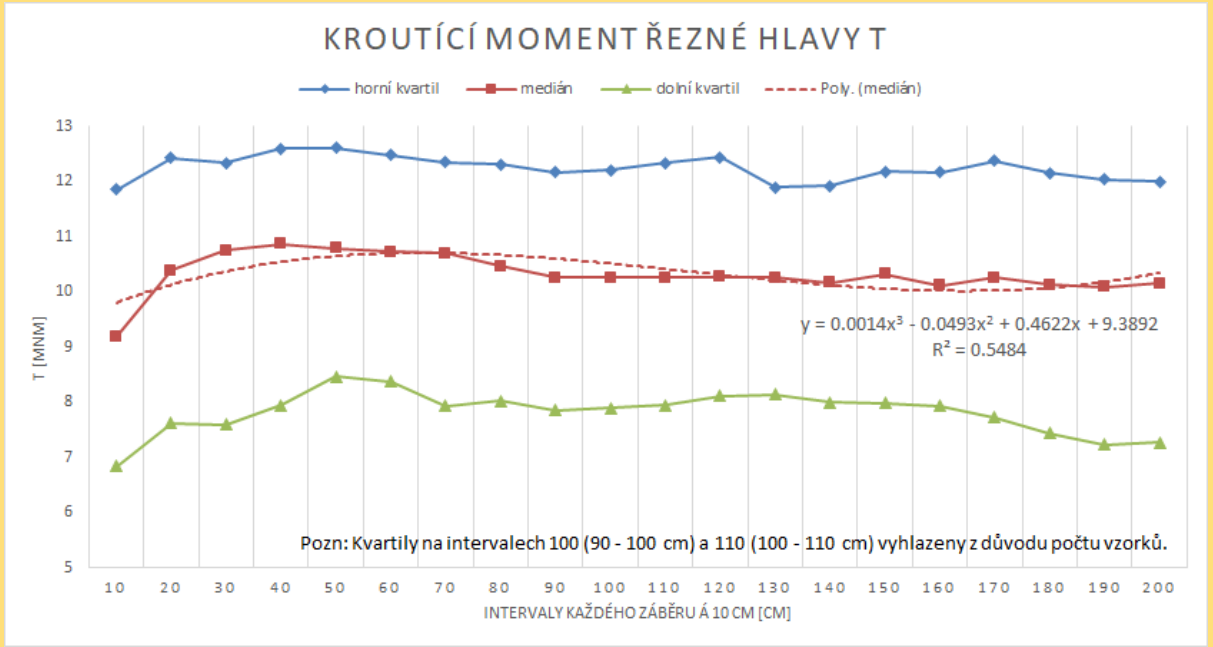


Obr. 7.55 Medián, horní (75 %) a dolní (25 %) kvartil průběhu čisté penetrační rychlosti EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.

Hodnoty čisté penetrační rychlosti **NPR** se nejčastěji pohybují v rozmezí 33 až 40 mm/min (50% hodnot), medián 36,5 mm/min (mezilehlé hodnoty 40 – 180 cm) na úseku č. 1. Průběh mediánu NPR po délce záběru je možný charakterizovat polynomickou funkcí 3. stupně (Excel), viz Obr. 7.55. Z grafů na Obr. 7.54 a Obr. 7.55 je patrné, že hodnoty NPR jsou na úvodních cca 30 cm a na závěrečných cca 20 cm každého záběru nižší, např. v úvodním intervalu 0–10 cm je medián (31 mm/min) nižší o 15 % oproti mezilehlým hodnotám (36,5 mm/min). To odpovídá tomu, že PEN je na tomto intervalu také o 15 % nižší, zatímco CHS je relativně konstantní. Platí NPR = PEN x CHS.

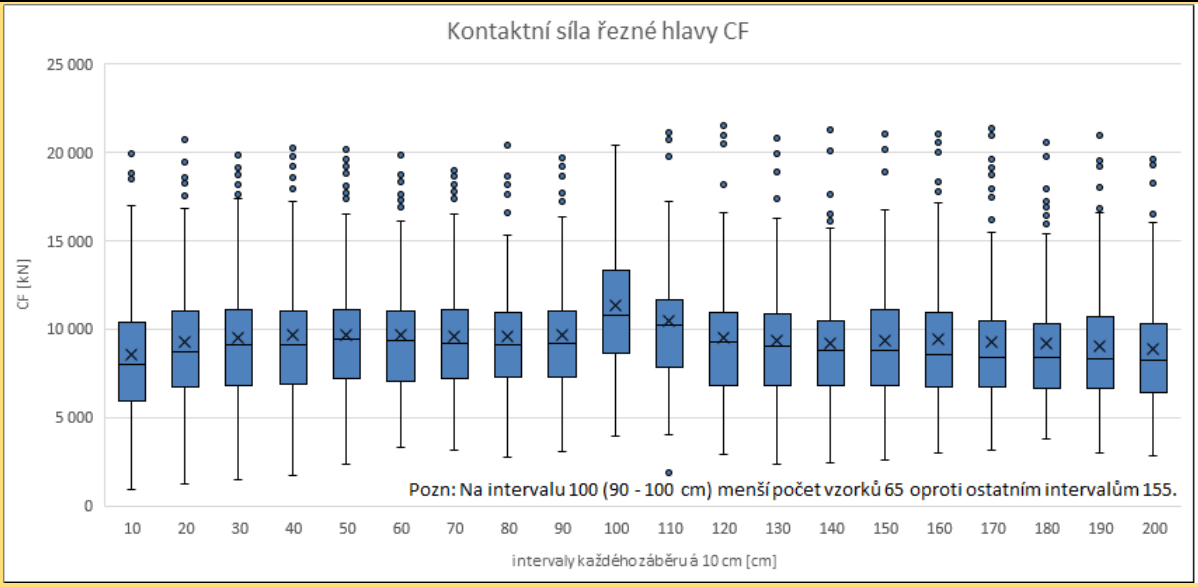


Obr. 7.56 Krabicový graf krouticího momentu řezné hlavy EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.

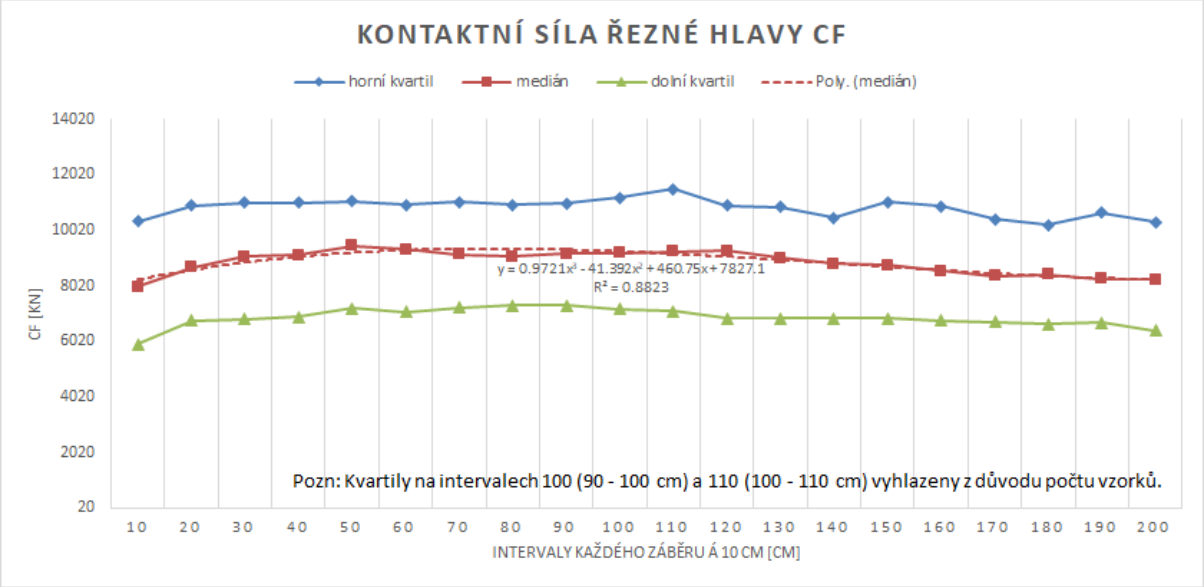


Obr. 7.57 Medián, horní (75 %) a dolní (25 %) kvartil průběhu krouticího momentu řezné hlavy EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.

Hodnoty krouticího momentu řezné hlavy **T** se nejčastěji pohybují v rozmezí 7,9 až 12,3 MNm (50 % hodnot), medián 10,4 MNm (intervaly 10 – 200 cm) na úseku č. 1. Průběh mediánu T po délce záběru je možný charakterizovat polynomickou funkcí 3. stupně (Excel), viz Obr. 7.57. Z grafů na Obr. 7.56 a Obr. 7.57 je patrné, že hodnoty T jsou na úvodních cca 10 cm každého záběru nižší, medián 9,2 MNm je o 12 % nižší oproti ustáleným hodnotám (10,4 MNm). Důvodem je, že při rozjezdu tunelovacího stroje byla používána nižší přítlačná síla.



Obr. 7.58 Krabicový graf přítlačné síly EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.



Obr. 7.59 Medián, horní (75 %) a dolní (25 %) kvartil průběhu přítlačné síly EPBM po 10 cm v každém záběru na úseku č. 1, projekt Ejpovice.

Hodnoty přítlačné síly **CF** se nejčastěji pohybují v rozmezí 6,9 až 10,8 MN (50 % hodnot), medián 8,9 MN (intervaly 10–200 cm) na úseku č. 1. Průběh mediánu CF po délce záběru je možný charakterizovat polynomickou funkcí 3. stupně (Excel), viz Obr. 7.59. Z grafů na Obr. 7.58 a Obr. 7.59 je patrné, že hodnoty CF jsou na úvodních cca 20 cm každého záběru nižší, medián 8,0 MN je o 10 % nižší oproti ustáleným hodnotám (8,9 MNm). Důvodem je, že při rozjezdu tunelovacího stroje byla používána nižší přítlačná síla.

Závěr:

Předpoklad, že na začátku a na konci každého záběru jsou nižší hodnoty PEN, NPR, T a CF byl potvrzen zejména pro začátky záběrů. Pro CHS tento předpoklad potvrzen nebyl (hodnoty víceméně konstantní). I v dalších úsecích ražby tunelu byl tento předpoklad potvrzen. V dalších již variovaly i hodnoty CHS v závislosti na poloze v záběru (úvodní část / mezilehlá / koncová).

Uvedené parametry představují výsek z problematiky ražby tunelovacími stroji. Nastavení tunelovacího stroje při ražbě je komplexní záležitostí a daná problematika překračuje meze této disertační práce.

Při stanovení nabídkových průměrných hodnot některých parametrů ražby tunelovacích strojů je tento poznatek důležitý. Průměrné nabídkové hodnoty by měly snížení hodnot parametrů po délce záběru již v sobě vždy obsahovat.

Shodně s konvenčním způsobem ražby je délka záběrů důležitá z hlediska celkové rychlosti postupu i u ražeb prováděných pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů. Optimálních hodnot parametrů ražby nebylo dosahováno v úvodních a koncových úsecích každého záběru, ale pouze v mezilehlém úseku každého záběru. Čím delší je záběr, tím více z celkové délky tunelu je raženo s použitím optimálních hodnot parametrů ražby. Při kratších délkách záběrů bude vliv nižších počátečních a koncových hodnot parametrů ražby více znatelný.

7.7.4 Shrnutí

Byla vysvětlena problematika využitelnosti tunelovacího stroje a její důležitost pro sledování postupu ražeb. Na příkladu z praxe Př. 19 bylo ukázáno její vyhodnocení, jakož i vyhodnocení dalších činností ražby a prostojů, které ji doprovázejí. Je vhodné, aby již v nabídkové dokumentaci byly uvedeny činnosti alespoň v procentuálním časovém zastoupení k jednotlivým třídám ražby, viz kapitola 4.2.

V Př. 20 byl proveden podrobný rozbor některých parametrů (PEN, CHS, NPR, T, CF) tunelovacího stroje při ražbě. V tomto příkladu se vyhodnotil průběh parametrů ražby po délce jednotlivých záběrů. Výsledný průběh není dle očekávání konstantní, ale v začátcích a koncích záběru se některé parametry mění. Při stanovení nabídkových rychlostí postupů tunelovacích strojů by toto mělo být zohledňováno. Tak jako u konvenčních ražeb má délka záběrů vliv na celkovou rychlost postupu i v případě ražeb za pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů. V případě kratších záběrů se nechá očekávat vyšší vliv poklesů rychlosti ražby v počátečních a koncových částech jednotlivých záběrů na celkový postup ražby.

Uvedené příklady tvoří podklad pro další kapitolu, kde je v Př. 25 provedena simulace trvání ražby v závislosti na součiniteli využitelnosti tunelovacího stroje UF a čisté penetrační rychlosti NPR.

8 Analýza rychlosti ražeb a harmonogramu ražeb

8.1 Úvod

Navážeme na předchozí kapitoly, a to zejména na kapitolu 4.3, popisující současný stav týkající se problematiky harmonogramů ražby, kapitolu 4.7, pojednávající o podmínkách stavby, a dále na teorii popsanou v kapitolách 6.8 o predikci harmonogramu ražby a 6.9 o součtu náhodných veličin. Jak jsem slíbil v kapitole 6.9, provedeme nyní analýzu harmonogramu ražby v příkladech.

8.2 Příklady

Budou prezentovány dva příklady výpočtu predikce harmonogramu ražby. Simulace budeme provádět pomocí programového kódu jazyka R, který autor disertační práce pro daný účel naprogramoval. Programovací jazyk R je volně dostupný softwarový nástroj vhodný pro statistické výpočty.

Př. 24 Simulace trvání ražby tunelového úseku pro různé koeficienty vlivu – variování.

Bude nás zajímat, jak dlouho by trvala ražba nějakého tunelového úseku s určitou námi zvolenou pravděpodobností. Pro zajímavost předpokládejme úsek č. 4 délky 219,5 m z Př. 11, způsob ražby NRTM, kdybychom razili v záběrech délky 2,78 m a měli k dispozici pro odtěžování jen 4 dampry – varianta A. Provedeme porovnání s variantou B se 7 dampry, při které by bylo zajištěné nepřetržité odtěžování. Trvání jednotlivých činností budeme uvažovat jako náhodné veličiny a budeme simulovat trvání ražby predikovaného úseku pro obě varianty A a B. Výsledné trvání ražby úseku stanovíme s různou pravděpodobností – např. 50%, 75%, 80%, 90%, 95% a 99,7%. Jako referenční úsek zvolíme úsek č. 3, viz Tab. 8.1. V tabulce jsou pro zajímavost uvedena data ze skutečné ražby úseků 3 a 4.

Tab. 8.1 Referenční úsek 3 a predikovaný úsek 4 – skutečná data z ražby, viz Př. 11 a Př. 11. - Ot. 4.

Úsek	Třída	Délka	Skutečné trvání ražby	Průměrná rychlost ražby	Průměrná skutečná délka záběru	Teoretické trvání odtěžování	Průměrné plánované trvání operace odtěžování		Průměrné skutečné trvání operace odtěžování		Počet damprů	Průměrná vzdálenost od portálu k čelbě
		m	dny	m/d	m	min / bm	min / bm	f plan,od	min / bm	f skut,od	ks	m
3	RSC1	168.3	35	4.8	2.90	13.2	24	0.551	62	0.213	4	262
4	RSC1	219.5	50	4.4	2.78	13.2	25	0.529	51	0.259	4	460

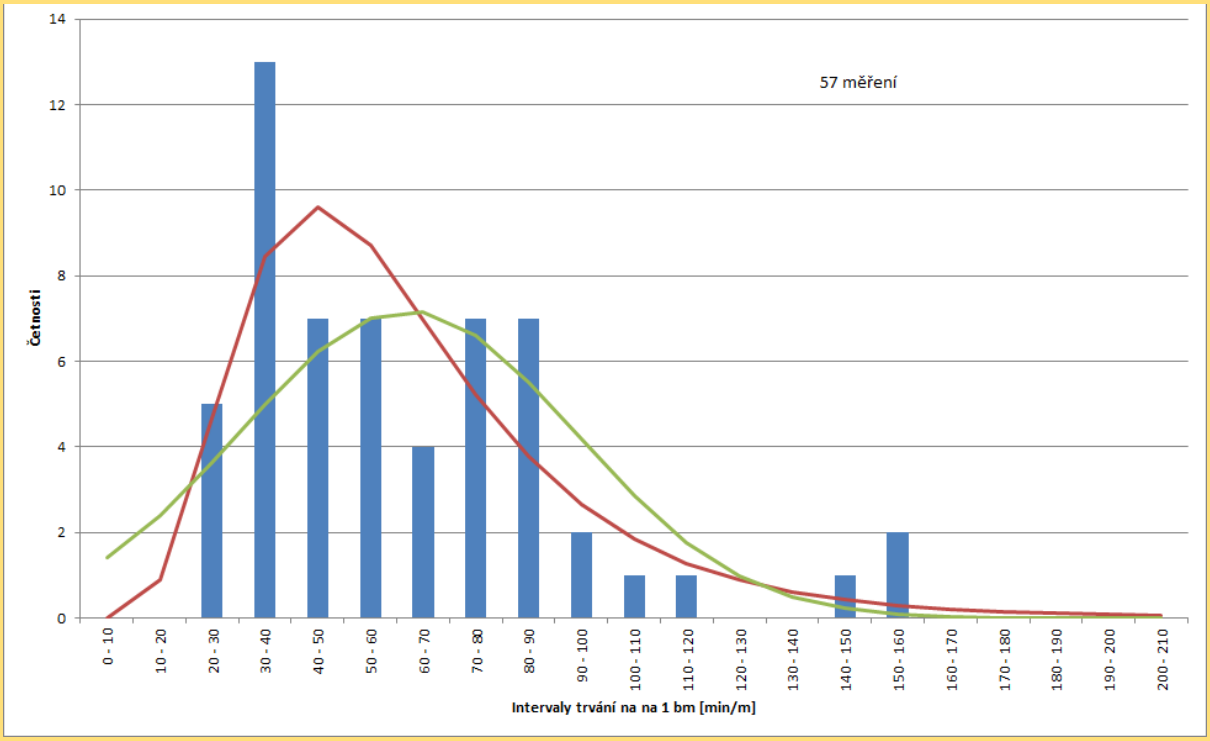
Provedeme zjednodušení a budeme předpokládat, že cyklus ražby sestává z 5 činností – 1) vrtání čelby, 2) nabíjení a odstřel, 3) odtěžování, 4) aplikace s/b a 5) instalace sítí a rámů - opakujících se v každém záběru, k nimž přibývají v průměru v každém čtvrtém záběru 6) prostoje.

Simulaci a její vyhodnocení provedeme v 5 krocích:

1. krok – skutečná trvání činností a prostojů (událostí) na referenčním úseku 3:

Mějme soubor dat pro každé trvání událostí 1) až 6) získaných z referenčního úseku 3. Každá událost je náhodná veličina a předpokládejme, že jsme pro každou sestrojili histogram, zvolili vhodné pravděpodobnostní rozdělení a popsali jeho charakteristiky, viz např. činnost odtěžování v Př. 11. -

Ot. 4 a Obr. 8.1. Střední hodnota logaritmicko-normálního rozdělení činnosti odtěžování v úseku 3 je 4,014 a směrodatná odchylka je 0,473. Průměrné skutečné trvání činnosti odtěžování v úseku 3 je 62 minut.



Obr. 8.1 Histogram a křivka hustoty pravděpodobnosti logaritmicko-normálního rozdělení (červenohnědá barva) činnosti odtěžování na úseku 3, viz Př. 11. - Ot. 4.

Skutečné trvání jednotlivých událostí jsou náhodné veličiny a mají odpovídající rozdělení specifikované v Tab. 8.2. Pro činnost odtěžování byla použita skutečná data z ražby úseku č. 3, ostatní data trvání událostí jsou modelová (*).

Tab. 8.2 Pravděpodobnostní rozdělení skutečných trvání jednotlivých událostí z referenčního úseku 3. Činnost odtěžování z reálných dat, ostatní události jsou modelová data (*).

událost	frekvence opakování / záb	typ p-rozdělení	střední hodnota	sm. odchylka
vrtání čelby	1	log-normální	4.136 (63)	0.117 (7.4)
nabíjení a odstřel	1	log-normální	3.022 (21)	0.212 (4.5)
odtěžování	1	log-normální	4.014 (62)	0.473 (31.5)
aplikace s/b	1	log-normální	3.439 (33)	0.339 (11.5)
instalace sítí a rámů	1	log-normální	3.242 (27)	0.328 (9.1)
prostoje	0.25	normální	39	16.3

(*) Pozn.: Vzorce pro přepočet středních hodnot a směrodatných odchylek log-normálního rozdělení jsou uvedeny v programovacím kódu v příloze 10.

2. krok – stanovení celkového koeficientu vlivu na referenčním úseku 3 a jeho předpověď ve variantách A a B pro predikovaný úsek 4:

Skutečné celkové koeficienty vlivu byly vypočteny v Př. 11. - Ot. 3 v Tab. 7.9 pro všechny úseky. Nyní stanovíme koeficienty vlivu pro predikovaný úsek ve dvou variantách lišících se počtem damprů – A) 4 ks, B) 7 ks (nepřetržité odtěžování, (7 x 2,5)/(15 + 2,5) = 1,0). Protože obě varianty se liší od

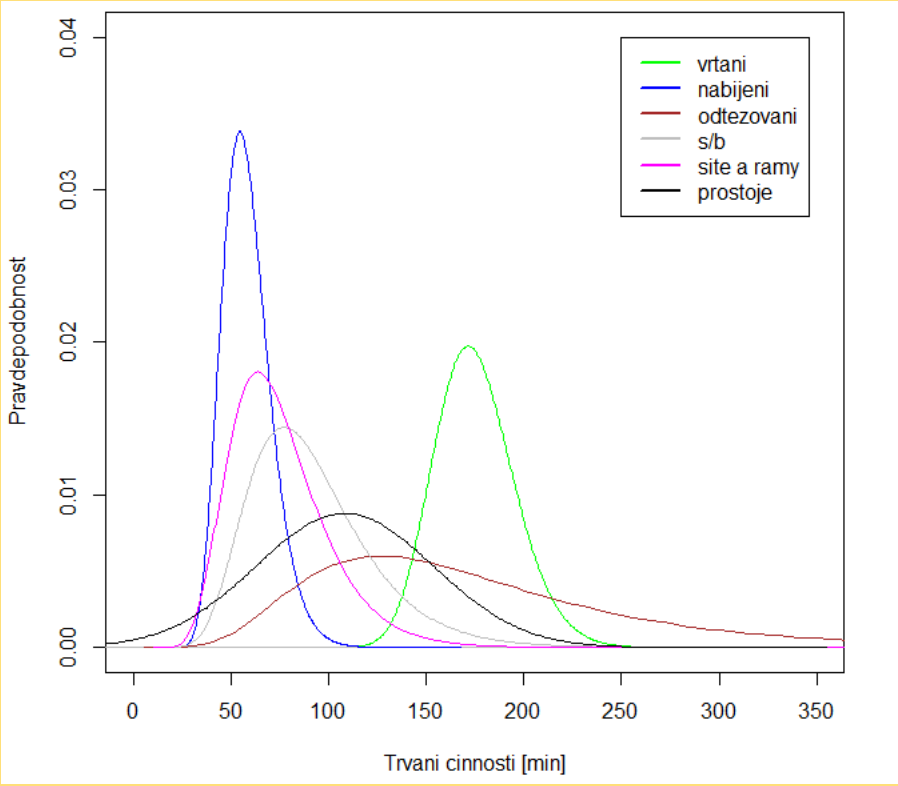
referenčního úseku pouze koeficientem vlivu odtěžování, tak nám bude stačit vypočítat pouze porovnávací koeficient, viz Tab. 8.3. Tímto porovnávacím koeficientem budeme násobit soubor dat náhodné veličiny trvání odtěžování získanou z referenčního úseku 3. Tím získáme predikované trvání náhodné veličiny odtěžování pro úsek 4 s průměrnými hodnotami – A) 64 min/bm a B) 36 min/bm.

Tab. 8.3 Referenční a predikované úseky s koeficienty vlivu.

Úsek	Teoretické trvání odtěžování	Průměrné původně plánované trvání operace odtěžování		Průměrné skutečné trvání operace odtěžování		Počet damprů	Průměrná vzdálenost od portálu k čelbě	Průměrná trvání jedné nakládky	Průměrná trvání jízdy čelba - deponie - čelba	Vlivu nedostupnosti damprů	Porovnávací koef vlivu	Průměrné predikované trvání operace odtěžování
	min / bm	min / bm	f plan,od	min / bm	f skut,od	ks	m	min	min	fod	f por	min / bm
3	13.2	24	0.551	62	0.213	4	262	2.5	14.5	0.588	**1.000**	---
4	13.2	25	0.529	51	0.259	4	460		15.0	---	---	---
4A	---	---	---	---	---	4				0.571	**1.029**	**64**
4B	---	---	---	---	---	7				1.000	**0.588**	**36**

3. krok – Generování vzorků pro jednotlivé predikované události (náhodné veličiny) platné pro úsek č. 4:

Trvání jednotlivých událostí v jednom záběru úseku č. 4 jsou náhodné veličiny, pro které můžeme vykreslit odhadnutou hustotu pravděpodobnosti (jádrovým způsobem z histogramu), viz např. Obr. 8.2 pro variantu A (k = 1,029, L = 2,78 m (*)). Jedná se o predikovaná trvání, tj. tato trvání byla získána ze skutečných trvání činností v referenčním úseku č. 3 se zohledněním koeficientu vlivu a délky záběru v predikovaném úseku. V našem konkrétním příkladu nám stačilo použít porovnávací koeficient vlivu a délku záběru (*) a jimi vynásobit jednotlivá skutečná trvání.

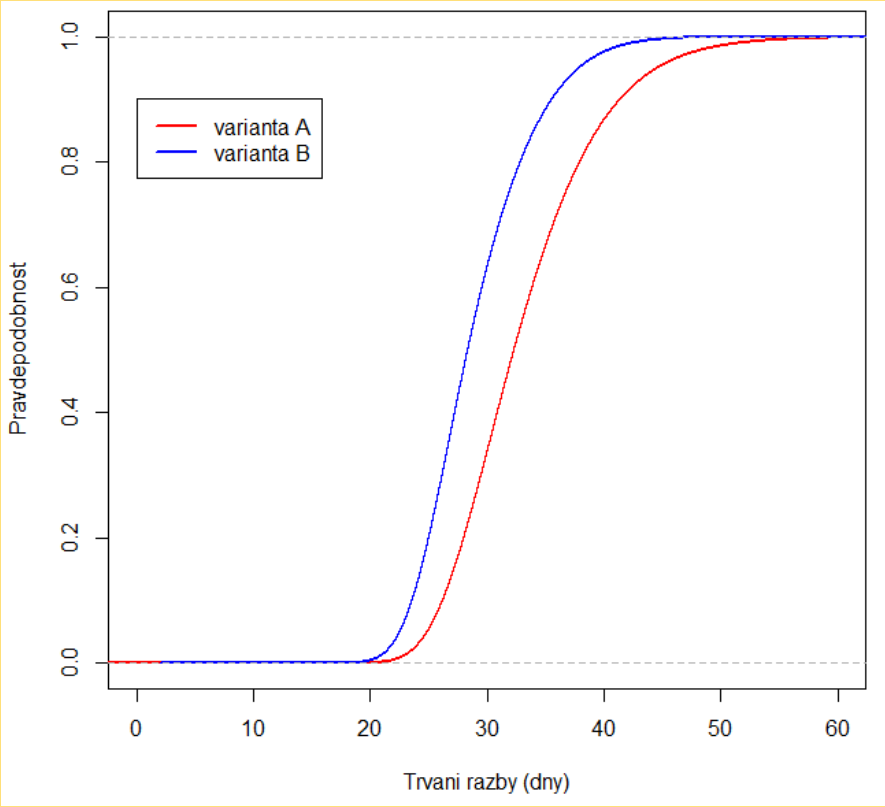


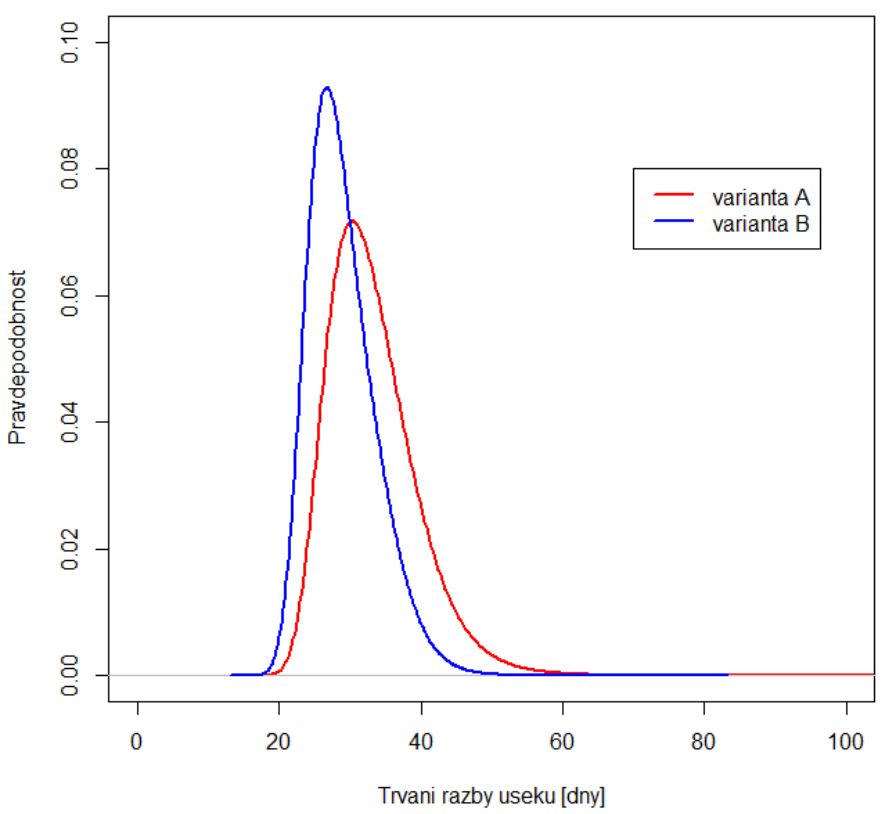
Obr. 8.2 Varianta A – Jádrový odhad hustot pravděpodobnosti trvání událostí pro úsek č. 4, kpor = 1.029, počet generovaných vzorků každé události N=10 000 000.

(*) Pozn.: Z důvodu znalosti skutečné délky záběru v predikovaném úseku jsme tuto skutečnu délku použili. V příkladech této disertační práce je používáno zjednodušení, že vztah mezi délkou záběru a trváním činností je lineární, ačkoli tomu v praxi tomu tak není, viz např. Př. 15. Tato chyba je relativně malá u záběrů, kde se jejich délka mění méně, např. změna do 10 %. Za účelem predikce harmonogramu ražby (L=2,78 m) v závislosti na referenčním úseku (Lpr.=2,90 m), můžeme tuto chybu tolerovat a k výpočtům trvání činností na 1 bm ražby v závislosti na délce záběru přistupovat v takových případech lineárním způsobem. Jinak je vhodné vzít do úvahy nelineární změnu trvání činností a délek záběrů.

4. krok – Simulace trvání ražby

Budeme provádět postupný součet vygenerovaných vzorků trvání jednotlivých událostí se zohledněním frekvence jejich výskytu přes všechny záběry úseku č. 4. Např. prostoje jsou cca v každém čtvrtém záběru, proto použijeme rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti pro zohlednění frekvence jejich výskytu. Zdrojový kód jazyka R týkající se tohoto příkladu je uveden v příloze 10. Kód je zobecněný tak, abychom případně mohli měnit porovnávací koeficienty vlivu jednotlivých událostí. Dostáváme výsledné trvání ražby U úseku č. 4 jako náhodnou veličinu. Pro tuto náhodnou veličinu vykreslíme jádrový odhad hustoty pravděpodobnosti ve variantách A a B, viz Obr. 8.3. Volíme počet simulací N = 10 000 000. V Př. 24. - Ot. 1 vypočítáme, jaký počet simulací je dostatečný.





Obr. 8.3 Empirická distribuční funkce (viz předchozí strana) a jádrový odhad hustoty pravděpodobnosti celkového trvání ražby úseku č. 4 ve variantách A (kpor = 1.029) a B (kpor = 0.588), počet simulací N=10 000 000.

5. krok – vyhodnocení

Potřebujeme znát dobu ražby pro námi zvolené pravděpodobnosti – 50%, 75%, 80%, 90%, 95% a 99,7%. V Tab. 8.4 jsou vypočtené hodnoty trvání ražby pro obě varianty A a B pro zvolené hodnoty pravděpodobnosti.

Tab. 8.4 Doba ražby úseku č. 4 délky 219,5 m ve dvou variantách (A = 4 dampry, B = 7 damprů) pro různé námi zvolené pravděpodobnosti; počet simulací N = 10 000 000.

zvolené pravděpodobnosti P:	50%	75%	80%	90%	95%	99.7%	MED	PRUM
varianta A: doba ražby ve dnech	28.7 - 36.6	26.7 - 40.2	26.1 - 41.3	24.8 - 44.5	23.7 - 47.6	20.9 - 60.8	32.3	33.2
varianta B: doba ražby ve dnech	25.5 - 31.8	23.9 - 34.7	23.5 - 35.5	22.5 - 37.8	21.6 - 39.9	19.2 - 47.7	28.3	29.0
rozsah rozdílu variant A a B (dny) (*)	-3.1 až 11.1	-8.0 až 16.3	-9.4 až 17.8	-13.0 až 22.0	-16.2 až 26.0	-26.8 až 41.6	4.0	4.2

(*) Pozn.: Výše uvedený rozdíl variant A a B představuje rozsah hodnot, kterého tento rozdíl může dosáhnout pro dané námi zvolené pravděpodobnosti P. Pokud bychom chtěli přesněji určit časový rozdíl mezi variantami A a B pro námi zvolené pravděpodobnosti P, tak bychom museli tento rozdíl také simulovat.

Doba ražby úseku č. 4 délky 219,5 m bude s pravděpodobností
- 75% činit 27 až 40 dnů ve variantě A a 24 až 35 dnů ve variantě B (vyšší počet damprů);
- 95% činit 24 až 48 dnů ve variantě A a 22 až 40 dnů ve variantě B (vyšší počet damprů).

Př. 24. - Ot. 1. Jaký je nutný počet simulací k dosažení uspokojivé přesnosti výsledku?

Odpověď:

Nejprve si určíme uspokojivou přesnost výsledku. Vzhledem k nepřesnostem na vstupu dat ohledně určování koeficientů vlivu a vzhledem k požadavku určit dobu ražby nejčastěji v řádech násobků celých dnů, je zajisté dostatečná přesnost výsledku v násobcích 0,5 dne.

V tomto příkladu budeme simulovat max. doby ražby, tj. kvantily, pro námi zvolené pravděpodobnosti. Pro kvantil odpovídající pravděpodobnosti 95% budeme na datech z Př. 24 určovat jaký počet simulací N je dostatečný pro zajištění uspokojivé předpovědi výsledku, tj. takové, aby směrodatná odchylka byla menší než 0,5 dne. Z toho důvodu provedeme 100-krát N simulací, kde N bude nabývat hodnot a) 100, b) 1000, c) 10 000, d) 100 000, e) 1 000 000 a budeme sledovat hodnotu směrodatné odchylky. Výsledek bude náhodná veličina, která má normální pravděpodobnostní rozdělení. Počet opakování 100 pro každých a) – e) variant N simulací vygeneruje dostatečný počet vzorků pro jejich vyhodnocení. Jakmile bude směrodatná odchylka menší než **0,25** (= 0,5 / 2, kde 0,5 je zvolená uspokojivá přesnost výsledku a 2 je počet směrodatných odchylek pro pravděpodobnost cca 95 %), budeme počet simulací N považovat za dostatečný.

Za účelem zjištění dostatečného počtu simulací byl upraven kód v jazyce R tak, aby tyto opakované simulace prováděl automaticky a výsledky max. doby ražby ukládal do pole výsledků v podobě odhadovaných kvantilů (získaných průměrem vzorků daných kvantilů) a přibližných chyb odhadů (sm. odchylky vzorků daných kvantilů) pro jednotlivé varianty A a B. Výsledné hodnoty jsou přehledně vypsány v Tab. 8.5 na další stránce.

Z Tab. 8.5 je zřejmé, že počet simulací 100 a 1000 je nedostatečný v obou variantách A i B pro téměř všechny zvolené pravděpodobnosti P, vyjma P 50% a P 75% pro var. B. Platí, že přibližná chyba (směrodatná odchylka) roste s max. dobou ražby predikovaného úseku, tj. s nárůstem trvání činností; dále s rostoucí pravděpodobností, pro kterou chceme znát hodnotu max. doby ražby a také s délkou predikovaného úseku (*), tj. s počtem součtů náhodných hodnot trvání činností.

V uvedeném příkladu Př. 24 byl pro obě varianty **A i B a pravděpodobnost 95%** dostačující počet simulací **N = 10 000**. Pro **pravděpodobnost 75%** a variantu **B** byl dostačující počet simulací **N = 1 000,** zatímco pro variantu **A** byl dostačující počet simulací **N = 10 000**, viz Tab. 8.5.

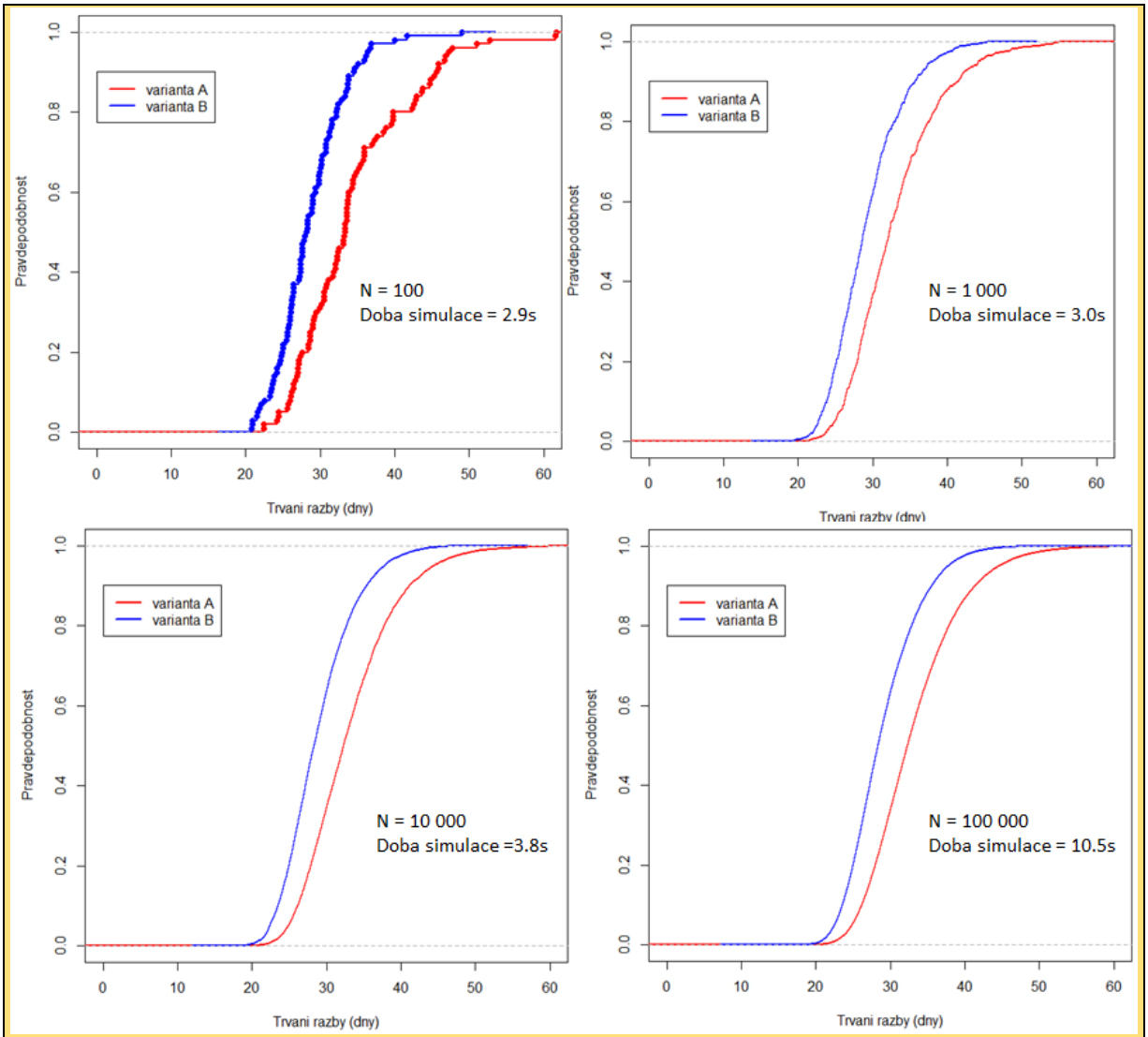
Pro názornost jsou na Obr. 8.4 zobrazeny křivky empirické distribuční funkce pro N simulací, kde N = a) 100, b) 1000, c) 10 000 a d) 100 000. Křivky empirické distribuční funkce byly vypočteny pro obě varianty A a B současně. Z porovnání jednotlivých grafů empirické distribuční funkce je patrné, že počet simulací N=100 není dostatečný; pro N=1 000 jsou distribuční funkce přesnější, nicméně jsou stále patrné nerovnosti; od N=10 000 je empirická distribuční funkce natolik hladká, že nejsou patrné nerovnosti v křivkách.

V grafech na Obr. 8.4 je také uveden výpočetní čas simulací pro obě varianty současně, tj. A + B, na středně výkonném počítači (CPU Intel Core 2 Duo 2,53 GHz, 4 GB RAM). Z uživatelského hlediska je v některých případech možno akceptovat delší výpočetní časy, ale doba výpočtu přesahující např. 10 sekund může vést při opakovaném používání ke snížení uživatelského komfortu aplikace.

(*) Pozn.: Např. pro variantu A a čtyřnásobnou délku predikovaného úseku, tj. 878 m (= 4 x 219,5), byla při počtu simulací N = 10 000 a kvantilem 95 % vypočtena střední hodnota max. doby ražby 178,025 dní se směrodatnou odchylkou 0,821. Směrodatná odchylka se tak zvýšila 3,5násobně (= 0,821 / 0,234). Doba výpočtu se také prodloužila.

Tab. 8.5 Tabulka výsledků max. doby ražby ve dnech – odhad kvantilů a přibližné chyby – pro počet simulací N a varianty harmonogramu A a B z Př. 24; počet vzorků pro každý jednotlivý výsledek = 100. Kritérium přibližná chyba < 0,25.

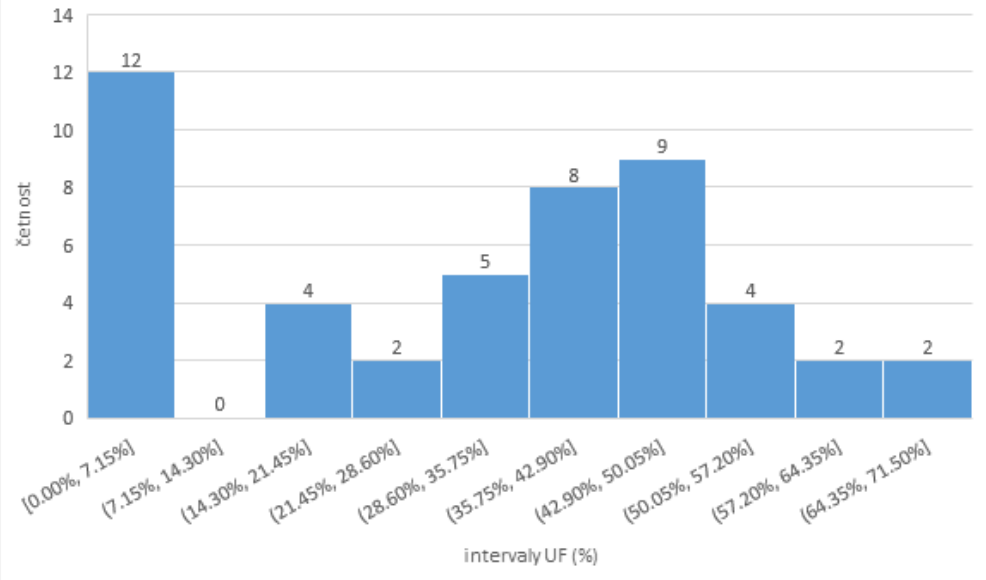
Kvantil 50%:					
počet simulací N	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
var. A - odhadovaný kvantil	32.206	**32.252**	32.249	32.254	32.291
var. A - přibližná chyba	0.897	**0.232**	0.076	0.05	0.029
var. B - odhadovaný kvantil	28.245	**28.324**	28.299	28.299	28.3
var. B - přibližná chyba	0.574	**0.179**	0.061	0.01	< 10-6
Kvantil 75%:					
počet simulací N	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
var. A - odhadovaný kvantil	36.376	36.663	**36.653**	36.643	36.658
var. A - přibližná chyba	0.919	0.259	**0.097**	0.05	0.05
var. B - odhadovaný kvantil	31.735	**31.83**	31.809	31.804	31.8
var. B - přibližná chyba	0.725	**0.243**	0.083	0.02	< 10-6
Kvantil 80%:					
počet simulací N	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
var. A - odhadovaný kvantil	37.567	37.871	**37.861**	37.863	37.893
var. A - přibližná chyba	0.998	0.292	**0.106**	0.049	0.026
var. B - odhadovaný kvantil	32.726	32.801	**32.783**	32.794	32.8
var. B - přibližná chyba	0.819	0.262	**0.087**	0.028	< 10-6
Kvantil 90%:					
počet simulací N	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
var. A - odhadovaný kvantil	40.954	41.323	**41.328**	41.317	41.305
var. A - přibližná chyba	1.301	0.395	**0.164**	0.057	0.022
var. B - odhadovaný kvantil	35.311	35.473	**35.478**	35.498	35.5
var. B - přibližná chyba	0.996	0.318	**0.112**	0.038	< 10-6
Kvantil 95%:					
počet simulací N	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
var. A - odhadovaný kvantil	43.947	44.575	**44.525**	44.507	44.503
var. A - přibližná chyba	1.92	0.582	**0.234**	0.067	0.017
var. B - odhadovaný kvantil	37.293	37.758	**37.779**	37.823	37.804
var. B - přibližná chyba	1.251	0.404	**0.146**	0.053	0.02
Kvantil 99.7%:					
počet simulací N	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000
var. A - odhadovaný kvantil	50.105	57.128	57.246	57.366	**57.355**
var. A - přibližná chyba	4.163	2.613	0.894	0.296	**0.094**
var. B - odhadovaný kvantil	41.15	45.146	45.626	**45.734**	45.76
var. B - přibližná chyba	2.122	1.333	0.481	**0.149**	0.055



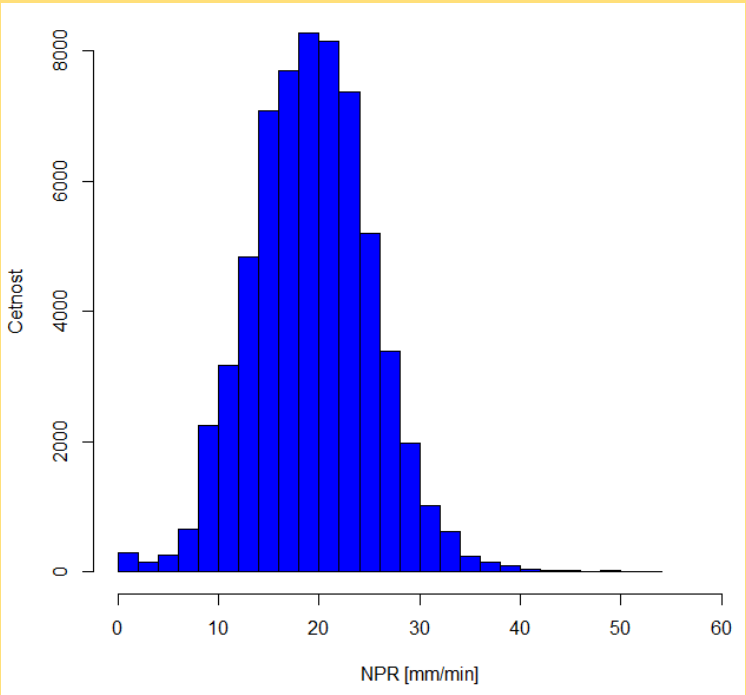
Obr. 8.4 Empirická distribuční funkce variant doby ražby A (4 dampry, kpor = 1.029) a B (7 damprů, kpor = 0.588) pro N simulací, kde N = a) 100, b) 1000, c) 10 000, d) 100 000 a čas potřebný k provedení simulací obou variant A + B společně.

Př. 25 Simulace trvání ražby tunelovacím strojem v závislosti na UF a NPR.

Tento příklad je založen na skutečných datech z ražby tunelu pomocí plnoprofilového tunelovacího stroje (*). Mějme reálná měření součinitele využitelnosti tunelovacího stroje UF a čisté penetrační rychlosti z tunelového úseku č. 3 délky cca 206 m. Celkem máme k dispozici 48 pozorování UF (pro každou 12-ti hodinovou směnu za 24 dnů ražby) a 41 168 pozorování NPR. Histogram UF je na Obr. 8.5, histogram NPR je na Obr. 8.6.



Obr. 8.5 Histogram součinitele využitelnosti tunelovacího stroje UF, úsek č. 3, celkový počet pozorování N = 48.



Obr. 8.6 Histogram čisté penetrační rychlosti tunelovacího stroje NPR, úsek č. 3, celkový počet pozorování N = 41 168.

(*) Pozn.: Vzhledem k poruchám v měření parametru NPR musela být některá vstupní data upravena. Princip příkladu touto úpravou narušen není.

Vzhledem k velmi nepravidelnému rozdělení vzorků náhodné veličiny UF budeme postupovat následujícím způsobem:

1. Nejprve odebereme pozorování, kde UF=0 %. Tato pozorování nahradíme v simulaci celkové doby ražby nějakého predikovaného úseku tak, že s pravděpodobností 25 % (= N_0 / N = 12 / 48) vygenerujeme UF = 0 %.

2. Zbylá nenulová pozorování UF mají stále velmi nepravidelné pozorování vzorků. Proto nepoužijeme některé z obecně známých rozdělení pravděpodobnosti pro jejich popis, ale při simulaci budeme vycházet z reálných dat, která při náhodném generování určitým způsobem upravíme z důvodu malého počtu vstupních dat.

3. Novou hodnotu UF generujeme vylosováním náhodného vzorku UF z původních dat, který zašumíme normálním rozdělením tak, abychom zajistili, že hustota pravděpodobnosti nových vzorků je hladká a zároveň, že můžou být vygenerovány i hodnoty UF, které nebyly zaznamenány. Parametry normálního rozdělení jsou následující

$$E = 0$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{N - N_0}}$$

Rovnice 61

Kde N_0 je počet nulových pozorování UF a N je celkový počet pozorování UF.

Střední hodnota je rovna 0 tak, abychom nepřiměřeně a jednostranně nevychýlili prvotní vygenerovanou hodnotu. Směrodatná odchylka je úměrná původní směrodatné odchylce zaznamenaných hodnot UF, ale snižuje se s vyšším množstvím dat, protože při vyšším množství dat by měl být šum nižší.

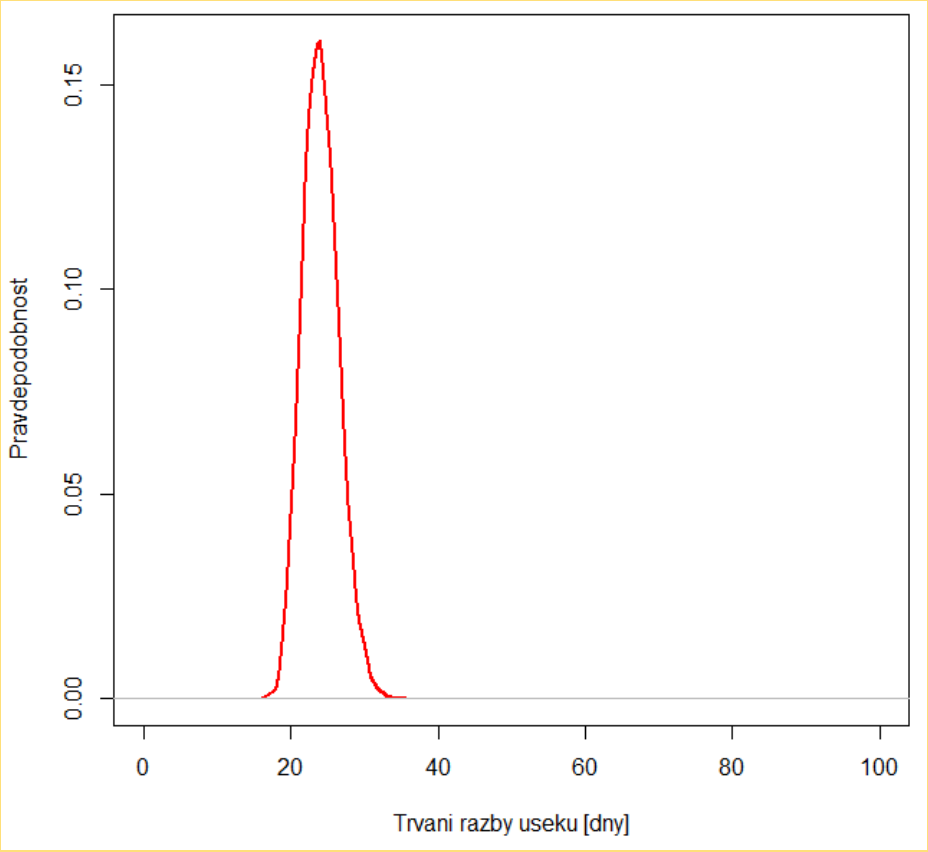
Odpovídající kód v jazyce R:

```
generuj <- function(data, count=1){
  return(sample(data,count,replace=TRUE)+rnorm(count,0,sqrt(var(data)/sqrt(length(data)))))
}
```

Ačkoli bychom se mohli pokoušet pro vzorky dat NPR hledat nějaké vhodné pravděpodobnostní rozdělení (například normální – nepokryje však spolehlivě velmi nízké hodnoty NPR), využijeme opět výše uvedeného postupu generování nových vzorků s využitím zašumění původních vzorků. Tento postup je relativně univerzální a v případě, že netušíme, jaké pravděpodobnostní rozdělení data vystihuje, i přesnější, než špatná volba rozdělení.

Na obdobném principu jako v Př. 24 budeme postupně generovat zašuměné vzorky UF a NPR a budeme provádět postupnou simulaci průběhu ražby. Pomocí koeficientů vlivů můžeme měnit vygenerované hodnoty UF a NPR tak, abychom reflektovali případnou změnu podmínek stavby. Budeme predikovat ražbu přímo navazujícího úseku č. 8 obdobné délky 205,3 m, jako byla délka referenčního úseku č. 3. Koeficienty vlivů UF a NPR nebudeme upravovat, protože předpokládáme, že ražba proběhne za podobných podmínek jako v úseku č. 3. V případě, že je vygenerovaný UF rovný 0%, započítáme, že uběhla jedna celá směna bez postupu ražby. Zvolíme N=10 000 simulací. Zdrojový kód jazyka R obsahující další detaily výpočtu je uveden v příloze 9.

Dostáváme výsledné trvání ražby U predikovaného úseku č. 8 jako vzorky náhodné veličiny. Pro tuto náhodnou veličinu vykreslíme jádrový odhad hustoty pravděpodobnosti, viz Obr. 8.7. Pro námi zvolené pravděpodobnosti – 50%, 75%, 80%, 90%, 95% a 99,7% – budeme určovat rozsah doby ražby. Tuto dobu můžeme porovnat se skutečnou dobou ražby úseku č. 8, která činila 27 dní.



Obr. 8.7 Jádrový odhad hustoty pravděpodobnosti celkového trvání ražby úseku č. 8, počet simulací N = 10 000.

V Tab. 8.6 jsou uvedeny vypočtené rozsahy doby ražby úseku č. 8 pro námi zvolené pravděpodobnosti. **Doba ražby** úseku č. 8 délky 205,3 m bude s pravděpodobností

- 75% činit 22 až 27 dnů;
- **95% činit 20 až 30 dnů**.

Tab. 8.6 Doba ražby úseku č. 8 délky 205,3 m s různou pravděpodobností; N = 10 000.

zvolené pravděpodobnosti P	50%	75%	80%	90%	95%	99.7%	MED	PRUM
doba ražby ve dnech	22.5 - 25.5	21.5 - 27.0	21.0 - 27.5	20.5 - 28.5	19.5 - 29.5	17.5 - 32.5	24.0	24.1

Úsek č. 8 navazoval na úsek č. 3, oba úseky byly délky cca 205 m. Ačkoli na úseku č. 8 byl skutečný průměrný součinitel využitelnosti tunelovacího stroje UF vyšší o cca 9% v porovnání s úsekem č. 3 (= 39,4 – 30,2; zhotovitel zefektivnil činnosti při výměně řezných nástrojů), tak vzhledem k nižší průměrné čisté penetrační rychlosti NPR o cca 6 mm/min (= 20 – 13,6; horninový masiv vyšší kvality) došlo k prodloužení doby ražby o cca 3 dny oproti úseku č. 3 a to na celkových cca 27 dnů.

Na úseku č. 8 došlo k uplatnění koeficientů vlivů zejména na činnost výměny řezných nástrojů a na geotechnické podmínky (ražnost tunelovacího stroje). Tyto skutečné koeficienty vlivů se do jisté míry lišily od koeficientů vlivů na úseku č. 3. Ražba na úseku č. 8 neproběhla za stejných podmínek jako na úseku č. 3. Z celkového pohledu však podmínky byly relativně podobné (nikoli shodné).

Pozn.: Vzhledem k tomu, že referenční a predikované úseky jsou v tomto příkladu relativně homogenní úseky, které nezahrnují delší odstávky tunelovacího stroje v řádech několika dnů jako např. za účelem plánovaného prodloužení inženýrských sítí nebo dopravníkového pásu, tak je možné generovat prostoje jako náhodné vzorky s určitou obdobnou pravděpodobností výskytu v referenčních a predikovaných úsecích.

8.3 Shrnutí

Byl vysvětlen postup jak simulovat dobu ražby a určovat rozsah této doby pro různé námi zvolené pravděpodobnosti. Postup ražby je simulován výpočetním softwarem. Výsledkem predikce je náhodná veličina trvání ražby a z ní určený rozsah doby ražby s určitou uživatelsky nastavenou pravděpodobností. Tento postup představuje plnohodnotnější řešení oproti současným zvyklostem, kdy se ukončení výstavby uvádí jedním termínem.

Rozsah doby ražby vypočtený s určitou pravděpodobností je pro praxi v řadě případů vhodnější. Taková forma výsledku je např. žádoucí pro práci s riziky souvisejících s harmonogramem ražeb.

Časový postup ražby a její ukončení si v grafech harmonogramu ražby můžeme představit jako nikoli jednu lomenou čáru, ale jako plochu, kde hranice plochy jsou tvořeny dvěma lomenými čárami zobrazujícími průběh námi zadaných kvantilů, např. 5 a 95%. Příklad je uveden v grafu na Obr. 4.8.

V Př. 24 se porovnával vliv počtu damprů na dobu ražby. Možnost predikovat dobu ražeb s určitou pravděpodobností umožňuje hlubší poznání jednotlivých vlivů na rychlost ražby a poskytuje prostředek pro lepší optimalizaci ražeb

V Př. 24. - Ot. 1 byl analyzován nutný počet simulací pro dosažení požadované spolehlivosti výsledku. Zároveň s tím se sledoval čas výpočtu. Bylo ukázáno, že potřebný počet simulací se zvyšuje s narůstající dobou ražby. Připravovaný softwarový modul by mohl brát do úvahy současně uživatelsky nastavenou spolehlivost výsledku a uživatelsky nastavený maximální čas simulace.

Př. 25 ukázal postup predikce doby ražby pro tunelovací stroje v závislosti na skutečně změřených údajích – součiniteli využitelnosti tunelovacího stroje UF a parametru čisté penetrační rychlosti NPR.

V rámci této disertační práce jsme pro jednoduchost simulovali pouze trvání událostí a parametrů tunelovacího stroje. Obecně bychom mohli simulovat i délku záběrů, nelineární vztah trvání činností a délky záběrů a koeficienty vlivů na jednotlivé činnosti.

9 Třídy ražby

9.1 Úvod

Určování tříd ražby (zatřiďování), jejich specifikace a stanovení délky záběru je odlišné pro každý způsob ražby. Tato část je proto rozčleněna na relevantní podkapitoly v závislosti na způsobu ražby.

A) Zatřiďování u ražeb prováděných pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů

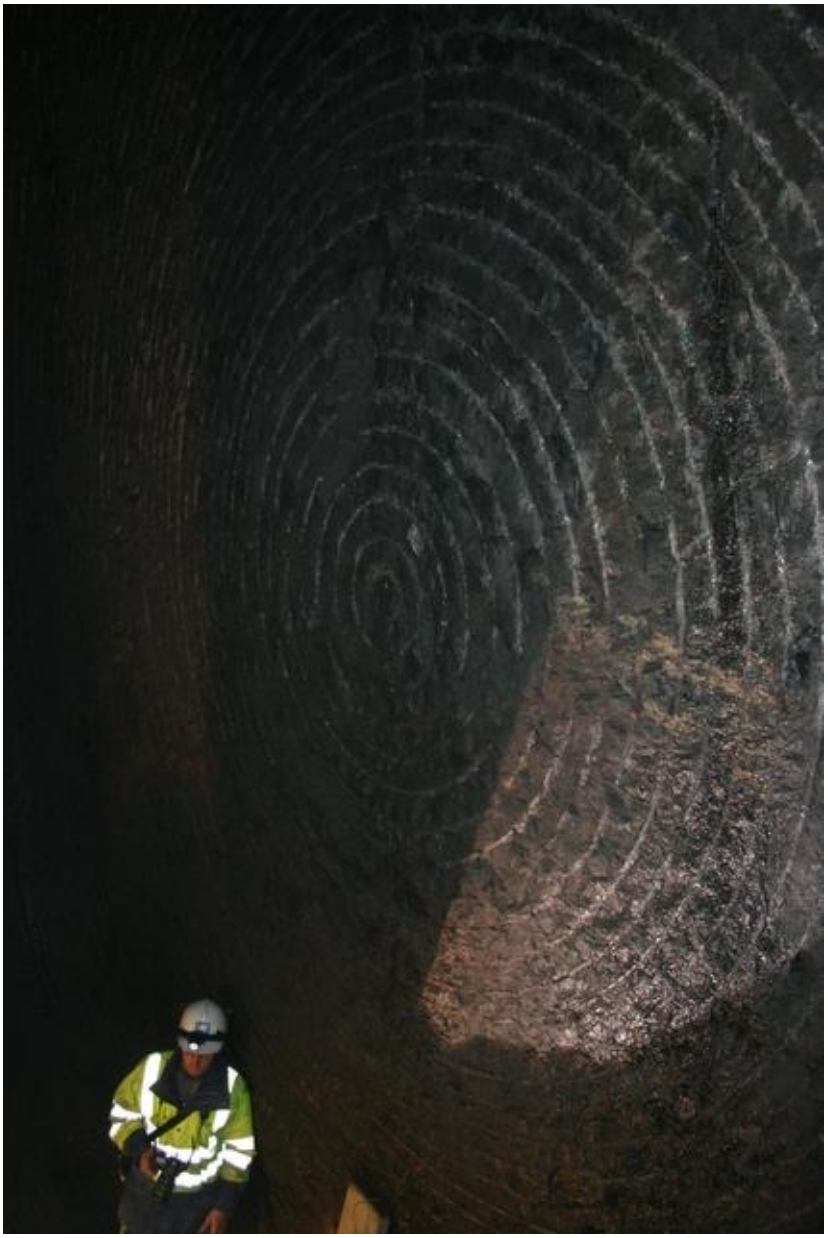
B) Zatřiďování a určení délky záběru u konvenčních ražeb

9.2 Zatřiďování u ražeb prováděných pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů

Autor disertační práce působil na projektech, kde probíhaly ražby pomocí TBM otevřeného typu a zeminových štítů (EPBM) a kde byly zavedeny různé metody pro určování tříd ražby. Vzhledem k výrazně odlišné úspěšnosti těchto metod a vzhledem k tomu, že problematika zatřiďování na tunelovacích strojích není nejen v České republice příliš známa, rozhodl se autor disertační práce mimo jiné provést průzkum zaměřený na způsoby zatřiďování při ražbě pomocí tunelovacích strojů, viz část „Průzkum (anketa)“.

TBM otevřeného typu do skalních hornin

V případě ražeb plnoprofilovými tunelovacími stroji TBM otevřeného typu bez štítu se geologické mapování čelby provádí pouze sporadicky před řeznou hlavou (Obr. 9.1) z důvodu obtížného přístupu. Protože je horninový masiv u tohoto způsobu ražby přístupný po celém obvodu výrubu za řeznou hlavou, dochází pravidelně k mapování geologických poměrů v této části (Obr. 9.2). Případně probíhá mapování čelby v průběhu odstávky TBM např. při výměně řezných nástrojů. V případech očekávaných poruch nebo zvýšených přítoků podzemní vody do výrubu jsou obvykle realizovány průzkumné předvrty, v některých případech i s odebíráním jádrových vzorků.



Obr. 9.1 Nepříliš časté mapování pěkně vysoustružené čelby v prostoru před řeznou hlavou, projekt Kárahnjúkar, příloha 1 a [8].

Obr. 9.2 Prostoru za řeznou hlavou, horninový masiv velmi dobré kvality, ojediněle odlučnost desek v klenbě podél ploch nespojitosti – lokálně instalované svorníky, projekt Kárahnjúkar, příloha 1 a [8].

Pro tunely ražené pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů TBM je ve vývoji klasifikační systém Q_{TBM} [21]. V současném stavu vývoje tohoto systému nedoporučuje autor disertační práce jeho použití za účelem určování tříd ražby v průběhu výstavby. Hlavními důvody jsou nejednoznačnost - dva a více uživatelů má zpravidla jiný názor na některé velmi citlivé parametry systému - a relativní složitost systému, více viz [31].

Příklad specifikace způsobu určování tříd ražby na TBM otevřeného typu je uveden na Obr. 9.3. Obecný popis s nejednoznačně nebo obtížně stanovitelnými kritérii byl jednou z příčin toho, že jednotliví účastníci výstavby hodnotili kvalitu horninového masivu zcela odlišně. Zatímco supervize se snažila o relativně ekonomický a bezpečný přístup při určování tříd ražeb, zhotovitel v daném případě sledoval svoji ziskovost, která byla nejvyšší v nejtěžší třídě Q5. Rozpory v zatřiďování dosáhly takové intenzity, že ražba byla po cca 1 km přerušena. Hledání kompromisního řešení bylo složité a vztahy mezi účastníky výstavby výrazně utrpěly. Jednalo se tedy o nevhodnou metodu zatřiďování.

Table 3-1 **Method for rock classification of surrounding rock of TBM tunnel**

Class	Q2	Q3	Q4	Q5
Geological Description	the integrity of exposed surrounding rock from excavation is in good condition; the surrounding rock is in stratified structure; the lithology is majorly sandstone (SS-I),medium bed, medium grained texture, with minor lamina pelite; no rock piece falling and collapse in the crown or side wall area; there may be minor seeping and dropping of ground water, or minor threadiness-like stream in localized points; the surrounding rock is from lightly weathered to fresh; the excavated muck pieces are with even size, which are majorly the fresh fractured rock piece result from the cutting by cutters, but with joint- fracture structure face in few case.	the integrity of exposed surrounding rock from excavation is in generally good condition; the surrounding rock is in stratified structure; joint fissure which is harmful to the stability of surrounding is developed; the lithology is majorly SS-II , with minor lamina pelite; there are rock piece falling and collapse in the crown or side wall area happens; there may be minor seeping and dropping of ground water, or minor threadiness-like flow in localized points; the surrounding rock is from moderate weathering to fresh; the evenness of the excavated muck piece is comparatively poor, with 3~5% collapse or rock piece falling visible; the muck surface is majorly the fresh fractured surface result from the cutting by cutters, with minor collapse, rock piece falling of apparent structure surface; after completing a single stroke, the spacing between surrounding rock of crown and cutter-head shield shall not change.	Surrounding rocks with poor integrity revealed after excavation show the fractured and inlayed structure characteristics, Joint set which is harmful to the stability of surrounding is more developed; The surrounding rocks mainly consist of mudstone, mudstone mixed with sandstone as well as alternate beds of mudstone and sandstone. Chip off-falling and collapse from top of tunnel and side of arch occurred widely. Groundwater was seeped or more points linear flow outcrop. Shear zone, shear cleavage development as well as mudstone are softening and performing argillization. Rocks become from strongly weathered to weakly weathered. The uniformity of excavated rock slag is poor, 10 to 15 percent of muck is chip off-falling and collapse with significant fracture characteristics occurred., the spacing between top arch and shield of cutter-head is reduced or no gap exists after complete a single stroke support.	Surrounding rocks with poor integrity revealed after excavation show the loose structure characteristics which lead to large deformation of fractured zone and affected zone, densely jointed zone, soft mudstone and extra soft rock. Large collapse, water gushing and mudding occurred on tunnel surrounding rocks. The size of excavated rock muck has great disparity and no rock dust exists. Fresh fractured rock surface result from the cutting by cutters is less visible, rock muck occurred from collapse and landslide shows the significant tectonic structure. Advanced reinforcement for surrounding rocks ahead and water shut-off measures shall be performed.

Obr. 9.3 Příklad specifikace metody pro zatřídění do tříd ražby; TBM otevřeného typu; pro jednotlivé třídy byla specifikována horninová výztuž, jednalo se tedy de facto o třídy horninové výztuže SC.

Opačný příklad, tj. vhodné specifikace tříd ražeb, byl použit na projektu Kárahnjúkar, kde tři tunelovací stroje společnosti Robbins (Obr. 9.4) vyrazily přes 40 km tunelů. Podrobnosti o zatřiďování jsou uvedeny v příloze 1. Třídy ražby se kombinovaly ze dvou typů tříd:

- třídy ražnosti tunelovacího stroje „Bore Class“ (BC), mapovací formulář viz příloha 14;
- třídy horninové výztuže „Support Class“ (SC), mapovací formulář viz příloha 15.

Třídy SC byly určovány v závislosti na typu a rozsahu skutečně použité horninové výztuže, která se odvíjela zejména od supervizí stanovené horninové výztuže. Supervize nařizovala použití trvalé horninové výztuže (jednalo se o vodovodní tunel, kde bylo trvalé ostění tvořeno zejména stříkaným drátkobetonem) pomocí tzv. instrukcí, viz kapitola 10.

Třídy ražnosti pomocí tunelovacího stroje BC vystihují práci potřebnou k rozpojení a odtěžení určité délky (objemu) tunelu. Třídy BC byly na projektu Kárahnjúkar určovány pouze v závislosti na procentuálním zastoupení geotypů a byly jednoznačně stanovitelné z provedených geologických mapování.

Zhotovitel i supervize průběžně prováděly svá mapování geologických poměrů, ale i skutečně nainstalované horninové výztuže. Několikrát do týdne probíhala jednání mezi zhotovitelem a supervizí, při kterých se rozhodovalo o zastižených třídách BC a aplikovaných třídách SC v závislosti na skutečně instalované horninové výztuži z tunelovacího stroje.

Vzhledem k tomu, že se zhotovitel rozhodl instalovat jen minimum horninové výztuže v průběhu ražeb, tak skutečné třídy SC se významně lišily od instruovaných tříd SC. Zbývající horninová výztuž byla instalována později v průběhu dokončovacích prací.

Obr. 9.4 Demontáž TBM 1 v podzemní kaverně poté, co úspěšně vyrazilo přes 14 km hlavního přivaděče, projekt Kárahnjúkar, příloha 1 a [8].

V praxi obvykle docházelo k tomu, že v horninovém masivu velmi dobré kvality tunelovací stroj razil nejpomaleji (nízká PEN, NPR) s výraznou spotřebou energií (vysoká CF, CHS) a řezných nástrojů. Tzn., že se jednalo o nejtěžší a nejdražší třídu BC. V takto kvalitním horninovém masivu se však nejčastěji aplikovala nejlehčí a také nejlevnější třída SC. Pro zajímavost - ve skutečnosti nebylo třeba aplikovat žádnou horninovou výztuž na většině délky tunelu.

Na druhé straně byly případy horninového masivu nízké kvality, kterému odpovídaly nejlehčí a nejlevnější třídy BC (tunelovací stroje razily rychleji – vyšší PEN, NPR), avšak v kombinaci s použitím nejtěžších a nejdražších tříd SC. Ačkoli problémy spojené se ziskovostí zhotovitele v jednotlivých třídách existovaly, tak zdaleka nedosahovaly extrémů předešlého případu. Vhodná specifikace tříd ražeb a zatřiďování pomáhá zkvalitnit a zrychlit výstavbu a ušetřit finanční náklady.

Ačkoli v daném případě projektu Kárahnjúkar se výše uvedený systém zatřiďování prokázal jako velmi úspěšný, tak v některých případech nebylo zatřiďování do jednotlivých BC prováděné pouze v závislosti na geotypu dostačující. Jedná se např. o případy, kde se může významně měnit abrazivita, pevnost horniny, přítoky podzemní vody nebo jiný, danou metodou zatřiďování neurčený, parametr horninového masivu.

Tyto geotechnické parametry lze řešit buď formou příplatků ke třídám ražby anebo se nechají přímo začlenit do tříd ražeb, viz švýcarská norma **SIA - General Contract Conditions** [25]. Výtah a překlad relevantní části této normy je uveden v Tab. 9.1. Tuto skutečnost potvrdil i průzkum provedený mezi osobnostmi tunelářské komunity, mající praktické zkušenosti se zatřiďováním na tunelovacích strojích, viz Tab. 9.2.

Tab. 9.1 Výtah ze švýcarské normy SIA - General Contract Conditions [25].

Tunelovací metoda	D&B (konvenční ražby)	TBM ot. typu	EPBM
Excavation Class (odpovídá TT pro konvenční ražby)	A, B, C, D, E	A	A
Support Class (třída horninové výztuže SC)	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5, T	--- (obvykle)
Cuttability (odpovídá ražnosti tunelovacího stroje BC)	---	X, Y, Z	(X, Y, Z)

(*1): opotřebování řezných nástrojů je zahrnuto ve třídách
(*2): klasifikace v závislosti na tom, z jakého místa je výztuž instalována relativně k pozici tunelovacího stroje
(*3): tunnelling class se určuje dle dané specifikace projektu; pokud není určeno jinak, rozhoduje penetrace
(*4): možné příplatky za vyšší abrazivitu způsobující vyšší opotřebovanost řezných nástrojů
(*5): možné příplatky v závislosti na velikosti přítoků podzemní vody do výrubu a sklonu ražby
(*6): X, Y, Z stanoveny na kvalitě horninového masivu a specifikovány jednotlivě na daných projektech (petrografie, zrnitost, objemová hmotnost, plasticita, lepivost, bobtnavost, obsah vody, HPV, hydraulický tlak v počvě apod.)
(*7): A značí plný profil

Rakouská norma ÖNORM B 2203-2 [63] a německé norma DIN 18312 [28] se vyjadřují v obdobném směru jako norma SIA a de facto člení třídy ražby u tunelovacích strojů otevřeného typu na třídy ražnosti BC a třídy horninové výztuže SC. Rakouská norma obsahuje dále obecné ustanovení o příplatcích za vyšší přítoky podzemní vody a abrazivitu.

Zeminové štíty (EPBM)

Pro ražby pomocí zeminových štítů EPBM, kde horninový masív není přístupný pro geologické mapování nebo je přístupný zcela výjimečně, se třídy ražby obvykle nepoužívají. Výjimkou bylo použití tunelovacího stroje EPBM v České republice – projekty pražského metra a projekt železničního tunelu Ejpovice (příloha 5), kde byly třídy ražby zavedeny. Specifikace těchto tříd a způsob zatřiďování nebyl jednoduchý a jednoznačný. Vzhledem k tomu, že tato problematika není dle autora disertační práce v České republice příliš známá, rozhodl se provést průzkum zaměřený na způsoby zatřiďování při ražbě pomocí EPBM, viz dále část „Průzkum (anketa)“.

Výsledkem průzkumu bylo zjištění, že třídy ražby se při ražbách prováděných tunelovacími stroji EPBM obvykle nezavádí. Důvodem pro nepoužívání tříd na EPBM je zejména skutečnost, že zeminový masiv není přístupný pro geologické mapování, protože je po celém obvodě výrubu zakryt obálkou štítu nebo postavenými prstenci. Jediným místem, kde je možné provádět geologické mapování je čelba. Ovšem ta je přístupná ve výjimečných případech, když EPBM razí v otevřeném módu nebo v přechodovém módu (záleží na poloze vstupu a množství zeminy v komoře). Mapování probíhá přes několik málo otvorů v řezné hlavě, tzn. je přístupný jen zlomek plochy čelby, a dále úzký pás po obvodě výrubu v odtěžovací komoře. Pokud razí EPBM v uzavřeném módu, což je mód pro který byl tento stroj primárně navržen, tak je prostor odtěžovací komory přístupný jen přes přetlakovou komoru (pokud je nainstalována). Současná praxe je však taková, že je snaha minimalizovat práce v přetlaku pouze na výjimečně nutné případy [24].

Dalším místem, odkud lze získat limitované údaje o horninovém masivu je dopravníkový pás. Přepravovaná rubanina má však již jinou konzistenci a charakter než rostlá zemina z důvodů přidávání aditiv a vody při ražbě a z důvodu jejího rozpojení a přemístění. Některé parametry ražby tunelovacím stroje jsou plně v kompetenci zhotovitele, nastavuje je pilot stroje v závislosti na zhotovitelových instrukcích k ražbě, projektu a konkrétních podmínkách. Horninový masiv nelze charakterizovat jednoznačně a objektivně na základně rozboru rubaniny na pásu.

Německá norma DIN 18312 [28] a pracovní skupina „Tunnel Construction“ ETB německé geotechnické společnosti doporučuje u EPBM rozlišovat ražbu dle módu ražby tunelovacího stroje a to pomocí tří tříd SM1, SM2 a SM3 [23]. Módy ražby jsou popsány jako otevřený (bez podpory čelby), přechodový (s částečnou podporou čelby) a uzavřený (s plnou podporou čelby). Módy ražby však nejsou jednoznačně specifikovány. Jaký tlak lze např. považovat za plnou podporu čelby apod.?

Norma SIA [25] má rovněž uvedeny tři třídy u ražby EPBM, nazvané třídy ražnosti tunelovacího stroje (cuttability), a stanovených obecně v závislosti na geotechnických parametrech a na potřebách projektu. Tzn., že třídy ražby jsou specifikovány s ohledem na konkrétní projekt. Norma je však primárně určena pro ražbu v prostředí skalních a poloskalních hornin.

Rakouská norma ÖNORM B 2203-2 [63] zavádí značně obecně třídy ražby u EPBM a vztahuje je k tomu, zda je pro ražbu potřeba podpora čelby nebo nikoli. Konkrétní specifické ustanovení nechává v kompetenci jednotlivých projektů.

Vyhodnocením průzkumu (viz níže část „Průzkum“) bylo zjištěno, že na 12 zahraničních projektech nebyly ani na jednom z nich používány třídy ražby a cena ražby za 1 bm byla fixní. Jediným projektem, kde se použily třídy ražby, byl projekt Ejpovice v ČR. Některé smlouvy výstavby tunelů pomocí EPBM mají položky resp. příplatky za ražbu s vyšším přítlakem na čelbu. Např. projekt metra Circle Line 4 & 5 v Singapuru měl příplatek pro ražbu s tlakem na čelbě přesahující 1,5 baru.

Průzkum (anketa)

Dotazníkový průzkum, přesněji anketa (nesystematický průzkum názorů dotazem u malé skupiny respondentů) probíhal tak, že autor oslovil některé vybrané osobnosti z tunelářské komunity, které mají praktické zkušenosti s ražbou pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů. Těmto osobnostem byl zaslán dotaz týkající se zatřiďování spolu s formuláři a příklady dle přílohy 11. Autor oslovil cca 30 osobností, u nichž předpokládal znalost dané problematiky. Odpovědi se podařilo získat od 10 účastníků ankety a to zejména z důvodu, že povědomí a zkušenosti s danou problematikou jsou relativně nízké. V Tab. 9.2 je uveden seznam projektů, typů tunelovacích strojů a referenčních osob. Výsledek ankety byl jednoznačný:

1. Na tunelovacích strojích typu TBM otevřeného typu do skalních hornin je vhodné a obvyklé provádět zatřiďování pomocí kombinace tříd horninové výztuže SC a tříd ražnosti tunelovacího stroje BC. Metody pro zatřiďování do třídy ražnosti tunelovacího stroje jsou stanoveny v závislosti na geologických podmínkách a konkrétní specifikace se liší od projektu. Případně se některé parametry horninového masivu klasifikují odděleně a proplácí se formou příplatků jako např. za zvýšenou abrazivitu apod.

2. Na tunelovacích strojích typu EPBM se zatřiďování do tříd ražeb neprovádí. Třídy ražby nejsou používány a ražba je obvykle proplácena v konstantní ceně za 1 bm tunelu resp. pevnou cenou za tunelový úsek. To se týká všech projektů typu EPBM uvedených v Tab. 9.2 vyjma projektů realizovaných v nedávné době v ČR. Na projektu metra Circle Line v Singapuru byl zaveden příplatek při ražbě s přetlakem na čelbě více než 1,5 baru.

Tab. 9.2 Projekty, typ tunelovacího stroje, referenční osoby.

Č.	Jméno projektu	Země	Typ tun. stroje	Ref. osoba(y)
TBM otevřeného typu do skalních hornin				
1	Kárahnjúkar HEP (příloha 1)	Island	3x TBM ot. typu, pr. 7,6 m	Aristotelis Caravanas, Marcel Winter (Managing Director, Pöyry Switzerland), Alun Thomas (Director of Tunnelling, Minova), atd.
2	Neelum-Jhelum HEP (příloha 3)	Pákistán	2x TBM ot. typu	Gary Peach (Resident Engineer, MultiConsult)
3	Durchmesserlinie Zürich	Švýcarsko	TBM ot. typu	Marcel Winter (Managing Director Pöyry Switzerland)
4	Nant de Drance Pump storage plant	Švýcarsko	TBM ot. typu	Marcel Winter
5	Taschinas HEP	Švýcarsko	TBM ot. typu	Marcel Winter
6	Milchbucktunnel Sicherheitsstollen	Švýcarsko	TBM ot. typu	Marcel Winter
7	East Side Access Project, New York	USA	TBM ot. typu, pr. 6,7 m	Fero Buday
8	Alto Maipo HEP	Chile	4x TBM ot. typu, pr. 6,9 m	Holger Evers (Sr. Tunnel Engineer, MultiConsult)
EPBM				
1	Metro Valencia	Venezuela	EPBM	Marcel Winter

2	Jubilee Line Extension, C110	Velká Británie	EPBM	Gary Peach
3	Circle Line 4 & 5, Metro, C855	Singapur	EPBM	Gary Peach
4	Riyadh Metro, Green Line	Saudská Arábie	2x EPBM, pr. 9,8 m	Fero Buday (Project Manager, Riyadh Metro Project)
5	Metro de Porto	Lisabon	EPBM	Lisa Daniel (McMillen Jacobs Associates)
6	Hallandsås, žel. tunel	Švédsko	EPBM	Lisa Daniel
7	STEP tunnel, Abu Dhabi	Spojené Arabské Emiráty	EPBM	Tom Olliver (Manager, CH2M)
8	Ejpovice, železniční tunel (příloha 5)	ČR	1x EPBM, pr. 10 m	Aristotelis Caravanas
9	Airport Link	Austrálie	2x EPBM, pr. 12,5 m	Fero Buday
10	Waterview Connection	Nový Zéland	1x EPBM, pr. 14,1 m	Fero Buday
11	Downtown Line, C927	Singapur	6x EPBM, pr. 6,7 m	Fero Buday
12	Brighton Sewerage	Velká Británie	EPBM	Gary Peach
13	Cityringen Copenhagen Metro M3	Dánsko	4x EPBM, pr. 5,8 m	Simon Taylor (Head of Tunnelling, Metroselskabet I/S)

Závěr

Třídy ražby nejsou obvykle při ražbách zeminovými štíty **EPBM** používané. Záleží však na konkrétních podmínkách projektu. Na základě provedeného průzkumu/ankety a vyšetřovaných tunelů autor práce došel k závěru, že je podmínečně vhodné použít třídy ražnosti pro zeminové štíty EPBM. Třídy horninové výztuže se u tohoto způsobu ražby nepoužívají, případně jsou rozlišeny typy prefabrikátů, ale nejsou zavedeny třídy.

Podmínky pro případné použití tříd ražnosti zeminového štítu EPBM jsou následující:

- Tunel je ražen ve velmi proměnlivých geotechnických podmínkách, které budou vyžadovat použití více módů ražby často se měnících po délce tunelu.
  Tunel by měl být v každém případě zodpovědně rozčleněn na úseky s předpokládaným použitím jednotlivých módů ražby a tlaků na čelbu již ve fázi návrhu. Ražba se poté řídí návrhem, který se upravuje o poznatky získané při skutečné ražbě. Při provádění díla je změna tlaků a módů ražby možná, avšak v současnosti nejsou některá kritéria spolehlivě měřitelná (např. objem skutečně vytěženého materiálu).

- V případě, že projekt předpokládá ražbu pouze s přetlakem na čelbě (návrh u tohoto způsobu ražby má obvykle přímo stanovit rozsah a velikost potřebného tlaku na čelbě), není zavedení tříd obvykle vhodné. To platí i pro tunely, kde se nepředpokládá časté střídání geotechnických podmínek a módů ražby. V takových případech se tunel rozdělí na úseky, pro které jsou stanoveny

parametry ražby a tyto úseky jsou propláceny konstantní cenou za 1 bm. To je případ většiny projektů uvedených v anketě. Případně se může specifikovat příplatek za použití vyššího tlaku na čelbě, nejlépe vztažený k vrchní části výrubu.

- Návrh specifikuje jednoznačně třídy ražnosti zeminového štítu. Pokud jsou třídy navázány na módy ražby, tak tyto módy ražby musí být také jednoznačně specifikovány a to nejlépe rozmezím tlaků v čelbě. Vágní formulace by se neměly připouštět.

- Jsou specifikovány jednoznačné a objektivní postupy jak určovat třídy ražby, v závislosti na jakých parametrech, kritériích a jakými měřeními. Opět platí, že vágní a nejednoznačné formulace by se neměly připouštět. Měření musí být objektivně proveditelná – to však u většiny měření geotechnických vlastností naráží při ražbě s přetlakem v čelbě na problém nepřístupnosti horninového masivu. Kritéria by měla být relativně snadno zjistitelná v závislosti na předpokládané četnosti jejich zjišťování.

- Pro případ, že projekt předpokládá provádění předvrtů z tunelu, je možné specifikovat zvláštní třídu (viz doporučení pracovní skupiny „Tunnel Construction“ ETB [23]). Důvodem je podstatná redukce času dostupného pro ražbu. Tento bod souvisí s jiným doporučením autora disertační práce, které se týká stanovování procentuálního zastoupení činností při ražbě již v nabídkách.

U **TBM** otevřeného typu do skalních hornin se s úspěchem používají třídy ražby, které jsou tvořeny kombinací třídy ražnosti tunelovacího stroje BC a třídy horninové výztuže SC.

9.3 Zatřiďování a určení délky záběru u konvenčních ražeb

Určování tříd ražeb a stanovování délek záběrů je procesem postupné optimalizace, který se odehrává v délce nějakého tunelového úseku. Postupná optimalizace je ve své podstatě iterační proces, kdy se snažíme dosáhnout:

a) optimální třídy ražby resp. technologické třídy výrubu (co nejrychleji instalovaná horninová výztuž v minimálním množství při dodržení limitních deformací apod.; pozn.: členění výrubu je zahrnuto v technologické třídě výrubu),
b) optimální délky záběru (maximální délka záběru při zachování bezpečnosti ražby, zohlednění nadvýlomů apod.)
c) atd. (např. předstihová opatření)

Pokud nastane změna geotechnických podmínek, případně změna podmínek stavby, začíná další nový iterační proces. Původní přerušený proces optimalizace se může restartovat, pokud se podmínky vrátí zpět na původní podmínky. Pokud jsou informace o výstavbě kvalitně zpracovávány, proces optimalizace se restartuje velmi rychle – zaučovací křivka je strmá.

U konvenčních ražeb stanovujeme horninovou výztuž tunelu a další opatření jako např. délku záběru, členění čelby apod. na základě více kritérií. Jedním z nejdůležitějších z těchto kritérií by měly být:

A) Skutečné **dlouhodobé chování** systému ostění – horninový masiv, které sledujeme na již vyražené části tunelu, kde je ostění již nainstalováno, včetně porovnání s předpokládaným chováním. Tyto postupy jsou obecně relativně dobře zvládnuté, i když na některých stavbách lze stále nalézt nedostatky.
B) Skutečné **krátkodobé chování** nezajištěného horninového masivu po otevření záběru.

Rozhodnutí o třídě ražby by nemělo být založené výhradně na použití klasifikačních systémů [54].

Chování horninového masivu

Jak je definováno obecně chování? Chování je soubor vnějších pozorovatelných projevů člověka, živočichů a jiných organismů. Slovo může označovat nejrůznější změny, postoje, pohyby, gesta a další projevy, ale také jejich celek. V přeneseném smyslu lze hovořit i o chování neživých předmětů a látek, pokud jsou vystaveny působení svého okolí. [58]

U horninového masivu a u systému ostění – horninový masiv představuje chování soubor vnějších pozorovatelných projevů, což jsou nejčastěji různé typy deformací, opadávání horniny a tvorba nadvýlomů, odprysky horniny apod. V přeneseném smyslu platí, že horninový masiv určitého typu (geotyp, pevnost, soudržnost, orientace, stav diskontinuit atd.) jedná určitým způsobem chování, který je mu vlastní. Tento způsob chování popisuje, jak horninový masiv reaguje na různé podněty jako např. otevření výrubu, vrty atd. Toto chování může být v čase proměnlivé.

Autor pro popis a metody stanovení chování horninového masivu čerpal zejména z následující literatury a dále z vlastních praktických zkušeností:

- Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR [50] – obsahuje pouze obecná ustanovení
- Practical Rock Engineering [53]
- Excavation and Support Determination for the Design and Construction of Tunnels [54]
- Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock [55]
- Optimization of the round length in design stage for tunnel excavation in weak rock [56]

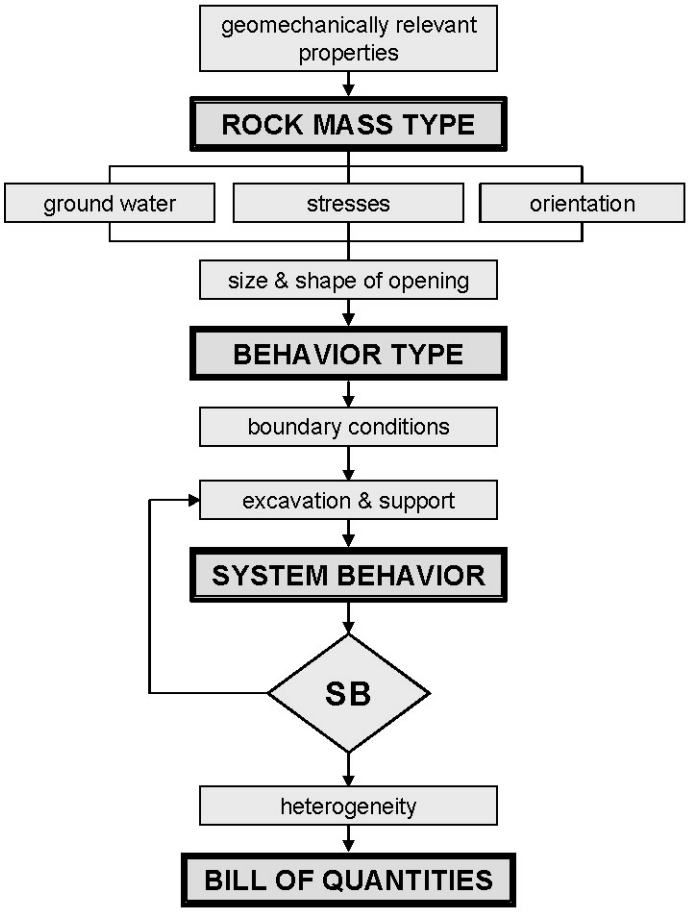
Určení třídy ražby (zatřiďování)

Chování systému ostění – horninový masiv je běžně vyhodnocováno pomocí dlouhodobého sledování prostorových deformací ostění apod. Tzn., že sledujeme **dlouhodobé chování**, které by mělo být hlavním a pravidelným vstupem do iteračního procesu (optimalizace) determinujícího použitou horninovou výztuž pro většinu geotechnických podmínek (vyjma nedeformujícího se skalního masivu, viz dále). Obecně lze konstatovat, že pokud je skutečná konečná deformace ostění blízká/rovná očekávané nebo

případně limitní deformaci ostění předpokládanou v návrhu, ostění by mělo být efektivně využité.

Výjimkou jsou ražby ve velmi tvrdých skalních horninách, kde nedochází k deformacím. Zde je rozhodujícím kritériem dodržení minimální bezpečnosti. V nejlehčích třídách odpovídající vysoké kvalitě horninového masivu je doporučená jako minimální horninová výztuž instalace stříkaného drátkobetonu v minimální tloušťce cca 5 cm v horní části klenby v kombinaci s lokálním kotvením.

Systematický postup pro určení tříd ve fázi návrhu a v průběhu provádění konvenčních ražeb je představen v [54] a spočívá ve vyhodnocení chování systému horninový masiv – ostění, viz Obr. 9.5.



Obr. 9.5 Graf obecného postupu při určení třídy ražby [54].

Tento postup je založen na určení typu chování horninového masivu BT, které se odvíjí od typu horninového masivu RMT (litologie, pevnost UCS, intenzita rozpukání atd.) v kombinaci se systémovými faktory jako jsou velikost a tvar výrubu, napěťové podmínky, relativní orientace diskontinuit k ose tunelu a vliv podzemní vody. Jednotlivé RMT mohou v kombinaci se systémovými faktory vykazovat více různých BT a naopak jedno chování horninového masivu BT může odpovídat více typům horninového masivu RMT. Prozatím je rozlišeno 11 typů chování, viz Tab. 9.3. Posledním krokem je odvození chování systému ostění – horninový masiv SB. Toto chování je potom porovnáno s „okrajovými podmínkami“ jako jsou např. max. sedání povrchu, maximální zatížení ostění nebo kompatibilita skutečných a očekávaných deformací ostění. Chování SB je odvislé např. i od rychlosti

instalace prvků horninové výztuže (zkušenost a motivace posádek). Ve fázi návrhu jsou používány numerické simulační metody pro rozhodnutí o typu SB, které doplňují zkušenosti a analytická řešení. [54]

Tab. 9.3 Typy chování horninového masivu BT [54].

Basic Behavior Type		Description
1	Stable	Stable rock mass with small local gravity induced falling or sliding of blocks
2	Stable with the potential of discontinuity controlled block fall	Deep reaching discontinuity controlled, gravity induced falling and sliding of blocks, occasional local shear failure
3	Shallow shear failure	Shallow stress controlled shear failures in combination with discontinuity and gravity controlled failure of the rock mass
4	Deep seated shear failure	Deep seated, stress induced shear failures and large deformations
5	Rock burst	Sudden and violent failure of the rock mass, caused by highly stressed rock and the rapid release of accumulated strain energy
6	Buckling failure	Buckling of rocks with a narrowly spaced discontinuity set, frequently associated with shear failure
7	Shear failure under low confining pressure	Potential for excessive overbreak and progressive shear failure with the development of dead loads, caused mainly by a deficiency of side pressure
8	Ravelling ground	Flow of cohesionless dry or moist material
9	Flowing ground	Flow of material with high water content
10	Swelling	Time dependent volume increase of the rock mass, caused by physical-chemical reactions of rock and water in combination with stress relief, leading to inward movement of the tunnel perimeter
11	Rock mass with frequently changing deformation characteristics	Rapid variations of stresses and deformations, caused by block-in matrix situation of a tectonic melange (brittle fault)

Pro který záběr se stanovuje třída ražby (horninová výztuž) a jakým způsobem? Na základě vlastní zkušenosti autora disertační práce je možný postup takový, že se po provedení geologického mapování čelby potvrdí nebo v některých případech upraví horninová výztuž v daném otevřeném záběru (třída horninové výztuže SC). Po zohlednění podmínek na čelbě se provede predikce geotechnických podmínek a chování systému ostění - horninový masiv v příštím záběru. Tzn., že se na základě zkušeností s dosavadní ražbou, provedenému geologickému mapování čelby a průzkumným pracím, analýzy dosavadních deformací systému ostění – horninový masiv a při zohlednění krátkodobého chování horninového masivu právě otevřeného výrubu provede predikce dlouhodobého chování systému ostění – horninový masiv pro příští záběr. Třída ražby (horninová výztuž) pro příští záběr se stanoví tak, aby toto chování odpovídalo požadavkům návrhu s relativně vysokou pravděpodobností – např. v extravilánu je možné připustit vyšší riziko vyšších deformací než v intravilánu; nebo u některých typů podzemních děl můžou být limitní deformace lokálně překročeny apod.

Délka záběru

Délka záběru se má odvíjet zejména od stability nepodepřeného výrubu. Vzhledem k dočasnosti stavu nepodepřeného výrubu, rozhoduje krátkodobá stabilita výrubu[11] v řádech nižších jednotek hodin, **tj. krátkodobé chování horninového masivu**.

Obecně stanovil stabilitu nepodepřeného výrubu v závislosti na čase, minimální hodnotě z nepodepřené délky a šířky výrubu (active span) a kvalitě horninového masivu Lauffer (1958) [53] a to na základě sledování chování horninového masivu ve výrubech značného množství alpských tunelů a štol.

Později byla Laufferova klasifikace aktualizována mnoha autory a v současnosti je součástí NRTM. Dle [53] je hlavním významem konceptu skutečnost, že zvýšením rozpětí a/nebo nepodepřené délky úseku vede k významné redukci času, který je k dispozici pro instalaci horninové výztuže. Např. štola malého profilu může být úspěšně vyražena s minimem horninové výztuže, zatímco tunel s větším profilem nemusí být bez okamžitého použití těžké horninové výztuže stabilní ve shodných geotechnických podmínkách.

NRTM obsahuje způsoby, jak bezpečně razit v podmínkách, kdy horninový masív má časově velmi omezenou stabilitu nepodepřeného výrubu. Tyto způsoby, zahrnující např. členění čelby, jsou vhodné do podmínek poloskalních hornin nebo horninového masivu, kde se překročení únosnosti masivu projeví postupnými deformacemi. Třídy ražby (technologické třídy ražby) mají již ve své specifikaci determinováno použité členění výrubu.

Naopak v případech velmi kvalitního horninového masivu dochází k jinému typu porušení a je třeba vycházet z toho, že horninový masiv se může porušit nenadále. Hoek [53] doporučuje přistupovat ke stabilitě výrubu při návrhu podzemních děl vedených v horninovém masivu vysoké kvality jako k časově nezávislému jevu. To znamená, že v případech, kdy je horninový klín obnažen v klenbě, dojde k jeho vypadnutí, jakmile je odstraněna okolní hornina, která ho do té doby podporovala. K tomu může dojít nejčastěji při odstřelu nebo v průběhu začišťování výrubu.

Pokud se má předejít vypadávání horninových klínů, tak je nutné včas instalovat horninovou výztuž, pokud možno ještě před tím, než je hornina, která podporuje horninový klín, odstraněna. Na druhou stranu, v případech, kdy je horninový masiv vystaven relativně vysokým napětím (v poměru ke své únosnosti), tak bude nestabilita výrubu iniciována redistribucí napětí v okolí výrubu. Takový projev nestability se může odehrát postupně ve formě postupného odlupování a opadávání horniny nebo se může projevit nenadále formou násilných odprysků (rock bursting). Při dimenzování horninové výztuže v takových případech rozhodují častěji změny napětí v okolí výrubu než strukturní stabilita horninových klínů.

Délku záběrů bychom měli obvykle (při rozlišení výše uvedených podmínek) určovat zejména na základě krátkodobého chování horninového masivu. Členění chování horninového masivu na různé typy je uvedeno v Tab. 9.3, viz [54]. Po zohlednění predikce

[11] Stabilitou nezajištěného výrubu se rozumí stav, kdy nezajištěný výrub nevykazuje projevy nestability, kterými jsou např. významné deformace, opadávání horniny/zeminy a horninových klínů spojené s rozvojem nadvýlomů s možností přechodu do závalu. Projevy nestability mohou být vyvolány samovolně nebo způsobeny účinky použité technologie ražby jako např. nárazy, vibrace apod.

krátkodobého chování horninového masivu resp., podmínek práce pod nepodepřeným výrubem, dosavadních zkušeností atd. se určí délka příštího záběru.

Jak sledovat a určovat skutečné krátkodobé chování horninového masivu?

Před čelbou obvykle chování horninového masivu nesledujeme vyjma např. tunelů s nízkým nadložím, kde můžeme monitorovat pokles terénu apod. Nezbývá, než ve většině případů sledovat chování nezajištěného výrubu od okamžiku jeho otevření do doby instalace horninové výztuže. Poté se již uplatňuje chování systému ostění – horninový masiv.

Autor disertační práce získal nejlepší praktickou zkušenost takovou, že **krátkodobé chování horninového masivu** je velmi dobře vysledovatelné především v průběhu provádění profilování, začišťování výrubu (stěn a zejména klenby výrubu a horní části čela čelby), kde je nejvyšší riziko vzniku nekontrolovatelných nadvýlomů. Kdy a na základě čeho sledovat a vyhodnocovat krátkodobé chování horninového masivu je podrobně uvedeno níže a dále v Př. 8.

a) Při profilování a začišťování výrubu, kdy lze získat velmi cenné informace o chování horninového masivu, který reaguje na nárazy impaktoru nebo lžíce stroje.
b) Při vrtání čelby pro trhací práce – moderní stroje umožňují analýzu dat jako např. o počtu, směru a délky vrtů, čisté penetrační rychlosti a její změny, velikosti přítlaku apod.; sledováním výplachu při vrtání, případně geotechnik přímo na místě instruuje předvrt(y) za účelem zjištění kvality horninového masivu a možných přítoků podzemní vody z předpolí čelby.
c) Při aplikaci stříkaného betonu – opadává horninový masiv nebo kusy horniny spolu s čerstvě nastříkaným betonem a z jakého důvodu (geologie, způsob nástřiku apod.)?
d) Při činnosti vrtání, nabíjení a instalaci svorníků – došlo k vyjetí bloku horniny z čelby, projevu nestability, jak se chová horninový masiv v okolí vrtů – zasypávají se vrty?

Dle autora disertační práce má být důraz kladen na sledování a určování krátkodobého chování horninového masivu zejména v horní části klenby (mezi 10. a 2. hodinou) a horní části čela čelby, protože tyto místa nejčastěji rozhodují o krátkodobé stabilitě. Sledování by mělo být prováděno u více operací pracovního cyklu.

Dále je nutné zohledňovat aspekty jako např. rychlost instalace horninové výztuže, trvání odtěžování, aspekt bezpečnosti práce pod otevřeným nebo pouze částečně zajištěným (předstihová opatření) výrubem apod.

Př. 26 Predikce geotechnických podmínek ražby a reakce na jejich změnu

Na Obr. 9.6 je uveden příklad, kdy byla účastníky výstavby předvídána problematická ražba několika následujících záběrů z důvodu nedostatečné stability horninového masivu v klenbě (ražba NRTM). Ta byla stanovena na základě pozorování krátkodobého chování masivu dle výše uvedeného postupu. Proto byly provedeny předstihová opatření v podobě instalace jehel v každém záběru, zkrácení délky záběru a zejména byla zajištěna možnost včasné reakce v podobě rychlé aplikace s/b (přítomnost mixu s betonem v blízkosti čelby) pro případ dalšího zhoršení podmínek.

Rozhodnutí o přerušení odtěžování a zahájení okamžité aplikace s/b (Obr. 9.6) bylo přijato v čase, kdy horninový masiv v klenbě začal opadávat za první řadu jehel. Do cca 10 minut, kdy byla zahájena aplikace s/b, opadala hornina v některých místech až za třetí řadu jehel. Jehly omezily a zpomalily opadávání horniny z klenby a při aplikaci s/b výrazně pomohly k tomu, že čerstvě nastříkaný beton také neopadal.

Obr. 9.6 Příklad intenzivního opadávání horniny z klenby v prostoru mezi 10 a 1 hodinou a to i přes tři řady deštníků z jehel; zastižena vrstva nedostatečně zpevněné zeminy; okamžik, kdy bylo přerušeno odtěžování rubaniny a okamžitě zahájena aplikace s/b. Výborná reakce účastníků výstavby zvláště, když se jednalo o první takový případ při ražbě daného tunelu.

Predikce podmínek a připravenost na jejich možnou náhlou změnu (informovanost posádek, sledování krátkodobého chování horninového masivu v průběhu odtěžování, mix s betonem přistaven u portálu již v průběhu odtěžování) umožnila včasnou reakci. Touto reakcí bylo zabráněno propagaci nadvýlomu, který by byl pravděpodobně velmi významný a případnému závalu.

Př. 27 Stabilita čelby

Nebezpečí nenadálého a náhlého výpadu horniny nebo ujetí horninového klínu z čela čelby je projev nestability, ke kterému může dojít u konvenčních ražeb v čase po začištění výrubu a to i po aplikaci vrstvy s/b na čelbu. Pokud je ražba prováděna správně, dochází k tomuto jevu výjimečně, protože ihned po prvním takovém projevu nebo při jeho signalizaci musí být přijata opatření k zamezení jeho opakování.

Příkladem může být nenadálé vyjetí horninového klínu z čela čelby v čase, kdy probíhala příprava pro nabíjení vrtů v čelbě. Na čelbě byl již v té době aplikován s/b. Jednalo se o případ, který mohl mít fatální důsledky. Míru nestability čela čelby je někdy velmi obtížné určovat z pohledu aplikace horninové výztuže – je třeba zajištění pomocí s/b nebo je již nutno aplikovat kombinaci s/b s ocel. sítí a svorníky?

Část dané čelby byla následně zajištěna pomocí s/b v kombinaci s ocelovou sítí a svorníky. Je třeba zdůraznit, že před tím a ani poté k obdobnému jevu při ražbě daného tunelu nedošlo. I proto je predikce tohoto jevu velmi obtížná a vyžaduje značné zkušenosti účastníků výstavby. Ve většině případů rozhoduje krátkodobé chování horninového masivu (v řádu nižších jednotek hodin) částečně

zajištěného horninovou výztuží. Při odstávkách v ražbě dané čelby se jedná o střednědobé chování hor. masivu (obvykle v řádu dnů až měsíců) v kombinaci s horninovou výztuží.

Tyto případy jsou obvykle ojedinělé, můžou mít však fatální následky. Lze učinit mnohé, aby se předešlo nestabilitě čela čelby při ražbě - instalace svorníků nebo jiných prvků v čelbě; důslednější začišťování čelby, což ale nemusí být vždy možné; mocnější vrstva s/b nebo lépe použít stříkaný vláknobeton; ponechat horninový klín v čelbě apod. Při ekonomické ražbě nelze tento jev spolehlivě vyloučit – riziko lze snížit nikoli však zcela eliminovat.

Ačkoli tento problém neměl přímo co do činění s délkou záběru, tak k překvapení autora disertační práce se někteří účastníci výstavby vehementně dožadovali aplikace těžší horninové výztuže (třídy ražby) a zkrácení délky záběru. Tomuto požadavku nebylo vyhověno. Naopak, horninová výztuž (třídy ražby) byly dále optimalizovány zejména z pohledu dlouhodobého chování systému ostění – horninový masiv. Stability čela čelby byla řešena odděleně od třídy ražby (čelba nebyla členěna, ale byla použita dočasná přídatná výztuž v čelbě – svorníky, sítě a s/b).

Délka záběru se odvíjí zejména od geotechnických podmínek, velikosti a tvaru výrubu a použité technologie ražby. Dalšími činiteli, které ovlivňují délku záběru, jsou zkušenosti účastníků výstavby, technologická kázeň, dostupnost materiálů atd.

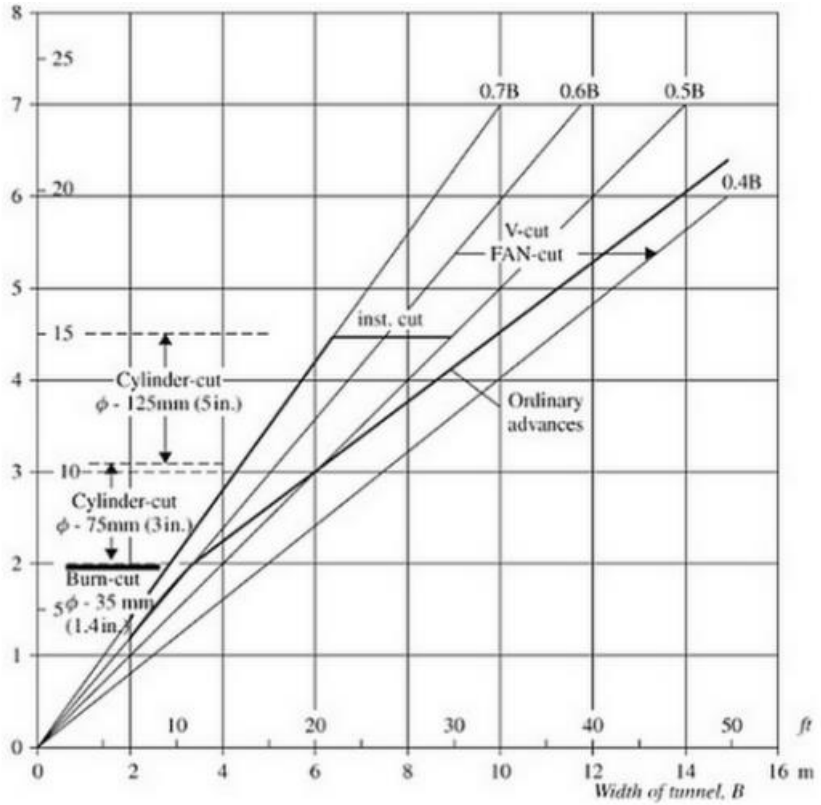
Při stanovení délky záběru je třeba rozlišovat, jaká část profilu tunelu je ražena. Pokud se nerazí na plný profil, pak je obvykle při ražbě opěří a počvy výrubu možno použít delších záběrů v porovnání s ražbou kaloty. V Tab. 9.4 jsou uvedeny nejčastěji používané délky záběrů v závislosti na použité technologii ražby a části raženého profilu pro tunely o průměrech výrubu cca 6 až 12 m. Na Obr. 9.7 je uveden vztah mezi šířkou výrubu, trhacími pracemi a obvyklou maximální délkou záběru při konvenčních ražbách [79].

Tab. 9.4 Obvykle dosahované max. délky záběrů a možné délky nezajištěných úseků.

<table>
<tr><th>Technologie ražby</th><th>Část profilu výrubu</th><th>Obvykle dosahované max. délky záběrů (*1)</th><th>Možné max. délky nezajištěných úseků (*1); u tunelovacích strojů jsou uvedeny i min. délky částečně podepřených záběrů pomocí řezné hlavy a případně štítu</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Konvenční ražba - D&B, NRTM, NMT</td><td>plný profil nebo pouze kalota</td><td>4 až 5,5 m</td><td>4 až 5,5 m (*2)</td></tr>
<tr><td>opěří, počva</td><td>a) 4 až 5,5 m v případě trhacích prací a vodorovného vrtání
b) desítky metrů i více v případě trhacích prací a svislého vrtání (odstřel v jednom záběru, rubanina se může odtěžovat v jednotlivých krocích s tím, jak se instaluje horninová výztuž)</td><td>stovky metrů (neomezené)</td></tr>
<tr><td>TBM otevřeného typu</td><td>plný profil</td><td rowspan="2">cca 2,5m (výsun stroje/tlačných pístů)</td><td>max.: neomezené
min: délka řezné hlavy, obvykle jednotky metrů</td></tr>
<tr><td>Zeminové štíty EPBM</td><td>plný profil</td><td>max. = min.: vzdálenost instalace segmentového ostění za čelbou a injektáže prostoru mezi segmenty a výrubem; obvykle ve vzdálenosti 7-10 m za čelbou</td></tr>
</table>

(*1) Bez provedení předstihových opatření.

(*2) Při ražbě pomocí trhavin platí doporučení vyztužit minimálně kalotu v rozsahu 10-2 hodin pomocí stříkaného drátkobetonu v každém záběru.



Obr. 9.7 Vztah mezi šířkou výrubu, trhacími pracemi a obvyklou maximální délkou záběru při konvenčních ražbách [79].

Délka záběru může být pozitivně ovlivněna, tj. delší, v případě použití předstihových opatření. Předstihovými opatřeními před čelbou tunelu se rozumí opatření, která byla provedena v čase, než ražba zasáhla do daného úseku. Opatření mohla být provedena z čelby raženého tunelu, z jiného podzemního díla nebo z povrchu území. Níže jsou uvedeny příklady opatření, které lze v závislosti na podmínkách použít jednotlivě nebo v kombinaci ke zlepšení kvality horninového masívu před ražbou:

- Jehlování po obvodě klenby
- Deštník z mikropilot nebo skupina mikropilot
- Deštník ze sloupů tryskové injektáže nebo skupina sloupů tryskové injektáže
- Deštník z ocelových trubek zatažených maloprofilovým tunelovacím strojem a následně vyplněných betonem, případně skupina ocelobetonových trubek
- Injektáž
- Ražba pod ochranou předem zhotovené konstrukce v klenbě výrubu atd.

Další aspekty související s třídami ražby a délkou záběru

V souvislosti s třídami ražby a délkou záběru je kromě kvality horninového masivu a jeho chování vhodné sledovat a vyhodnocovat i řadu dalších aspektů, které jsou často ve vzájemné souvislosti a mohou přispívat určitým způsobem ke změně třídy ražby a délky záběru. Jedná se například o následující (členění výrubu se pro tento účel uvažuje jako součást tech. třídy ražby):

- hledisko bezpečnosti, dostupného materiálu, mechanizace, zkušenosti a motivace posádek
- tvorba nadvýlomů při určování délky záběru
- kvalita trhacích prací [66]
- specifikace horninové výztuže v rámci jednotlivých tříd a její možná úprava,
- kvalita instalované horninové výztuže,
- skutečný průběh a velikost deformace ostění při zohlednění různých vlivů (např. nevhodně provedené odvodnění podél stěn výrubu může mít vliv na dlouhodobé deformace stěn výrubu),
- činnosti a prostoje zhotovitele při ražbě, optimalizace cyklu ražby
- smluvní podmínky (případná ziskovost zhotovitele v jednotlivých třídách ražby),
- další podmínky stavby.

9.4 Shrnutí

Změny související se třídami ražby mají vždy zásadní vliv na cenu a harmonogram díla, nezřídka i na jeho kvalitu.

Plnoprofilové tunelovací stroje

U TBM otevřeného typu do skalních hornin se používají třídy ražby, které jsou tvořeny kombinací třídy ražnosti tunelovacího stroje BC a třídy horninové výztuže SC. Některé geotechnické parametry (abrazivita, přítoky podzemní vody apod.) mohou být řešeny odděleně formou příplatku ke třídám ražby.

U zeminových štítů EPBM je vhodný postup takový, že se tunel v návrhu rozdělí na úseky s předpokládaným použitím jednotlivých módů ražby a tlaků na čelbu. Ražba se poté řídí návrhem, který se upravuje o poznatky získané při skutečné ražbě. Třídy ražby se obvykle nepoužívají.

Konvenční ražby a ražby pomocí TBM otevřeného typu do skalních hornin

Třídy ražby (horninové výztuže SC) se stanovují zejména v závislosti na vyhodnocení dlouhodobého chování systému ostění – horninový masiv. V případě horninového masivu velmi vysoké kvality může být rozhodující typ porušení nenadálá ztráta stability horninového klínu. V takovém případě se k problému přistupuje jako k časově nezávislému jevu, který může nastat okamžitě.

V závislosti na vyhodnocení dlouhodobého chování systému ostění – horninový masiv je vhodné optimalizovat horninovou výztuž, deformační limity, sled operací apod. v jednotlivých třídách ražby.

Délka nepodepřeného záběru se u konvenčních ražeb a u ražeb pomocí TBM otevřeného typu stanovuje zejména s ohledem na krátkodobé chování horninového masivu. Je vhodné délku záběru nesvazovat striktně s třídou ražby, ale umožnit její flexibilní změnu v závislosti na skutečně zastižených podmínkách/chování horninového masivu.

10 Supervize

10.1 Úvod

Tato kapitola popisuje některé vybrané úlohy supervize a její roli při výstavbě podzemních děl v návaznosti na kapitolu 4.5, kde byl popsán současný stav supervize, a bylo konstatováno, že úloha supervize na projektech podzemních děl v ČR nebyla zatím plně využita. Autor k napsání této kapitoly využil zejména vlastních rozsáhlých zkušeností s prací supervize na zahraničních projektech a konkrétních smluvních ustanovení mezi objednateli a supervizí na jednotlivých projektech (zejména Kárahnjúkar, Neelum-Jhelum, Melamchi), kde byly použity osvědčené standardizované ustanovení používané ve vyspělých tunelářských zemích (Norsko, Švýcarsko, USA). Autor disertační práce ve spolupráci publikoval na toto téma články a prezentace jako např.:

- Supervision of tunnelling constructions and software used for their evaluation [9]
- Tunnelling cocktail – Pakistan – Nepal – Iceland [10]

10.2 Kontrola kvantity a kvality stavebních prací a použitých materiálů

Mezi hlavní úkoly supervize patří kontrola kvality a kvantity prováděných prací. V případě nedodržení kvality je supervize povinna na toto upozornit, trvat na opravě nebo ve zvláštních případech, a po odsouhlasení objednatelem, sankcionovat zhotovitele. Pro tyto účely se v zahraničí používají formuláře zvané Listy závad (Non-Conformance Records, NCR), jejichž pomocí se závady na díle evidují a vyžaduje se jejich oprava. Součástí záznamu bývá detailní popis závady s fotodokumentací, popis jejího vzniku, její skutečné nebo možné důsledky, žádost o opravu, záznamy provedených oprav a jejich schválení, tj. uzavření problému. Do ukončení výstavby by měly být všechny závady odstraněny a formuláře NCR uzavřeny.

Autor disertační práce tyto formuláře zavedl při výstavbě tunelů na projektu Ejpovice, kde byly úspěšně použity zejména pro identifikace vad a potřebných oprav tunelového ostění.

Na řadě projektů je součástí supervize i tým zodpovědný za kontrolu kvality použitých materiálů. Tento tým např. provádí kontrolní zkoušky stříkaného betonu, použitých složek betonu, kontrolu kvality ocele atd. Za tím účelem jsou obvykle k dispozici na stavbě základní přístroje na zkoušení kvality materiálů nebo se případně vzorky ke zkoušení odesílají do specializovaných zkušebních laboratoří.

10.3 Vyhodnocování ražeb

Supervize má sledovat a vyhodnocovat průběh prací, plnění harmonogramu a případně navrhovat opatření ke zrychlení prací. U ražeb tunelů je často třeba sledovat skutečný průběh postupu ražeb ve vztahu:

- k původnímu plánovanému harmonogramu, který je založen na předpokládaném zastižení tříd ražby,
- k aktualizovanému očekávanému harmonogramu, který je založen na skutečných třídách ražby.

Příklad harmonogramu ražby a jeho podrobný popis, kde je patrné vzájemné porovnání skutečného, plánovaného a očekávaného postupu ražby, je uveden v kapitole 4.3 a na Obr. 4.6.

Monitorování činností zhotovitele je důležitý prvek kontroly, který je zajišťován zejména tunelovými inženýry a inspektory přímo na místě v tunelu. Bez tohoto monitorování by supervize a objednatel neměli úplnou a pravdivou představu o tom, zda jsou práce vykonávány kvalitně a efektivně, v souladu se smlouvou a zda případná prodlení jsou zaviněná nebo nezaviněná zhotovitelem. Vytvoření pravdivého „obrázku“ o tom, co se děje při ražbách, je klíčové pro optimalizaci výstavby a pro schvalování provedených prací, viz kapitola 10.6.

Různé druhy prostojů, často provázející práce v podzemí, mohou být způsobeny řadou faktorů, z nichž jedním z nejvýznamnějších je kvalita zhotovitele a jeho motivace. Někdy se může ukázat, že prostoje jsou neúměrně prodlužovány z důvodu nekvalitně sepsané smlouvy o dílo, která patřičně neošetřuje zpoždění prací ze strany zhotovitele. Dalším významným důvodem zpoždění postupu ražeb, který téměř vždy uplatňuje zhotovitel, je výskyt obtížných geologických podmínek, které nebyly projektem očekávány. Úlohou supervize je posoudit míru odlišnosti skutečně zastižených geologických podmínek od projektem předpokládaných a v případě, že se prokáže odchýlení od stanovených mezí, tak navrhnout další postup. Supervize by ve svých řadách rovněž měla mít pracovníka schopného posoudit strojní výbavu zhotovitele, zda je náležitě udržovaná a dle smluvních podmínek.

Supervize má za povinnost pravidelně reportovat objednateli prostřednictvím denních zpráv o postupech ražeb, měsíčních zpráv, závěrečné dokumentace a dalších zvlášť vyžádaných dokumentů. Součástí disertační práce jsou některé typy reportů, které autor disertační práce vytvořil a/nebo používal při své práci na tunelových projektech.

10.4 Zatřiďování, optimalizace horninové výztuže apod.

Na některých projektech může být supervize zodpovědná za mapování geologických podmínek na čelbě, zatímco na jiných projektech je tento druh mapování prováděn jinou organizací, geomonitoringem. V takovém případě, provádí supervize kontrolu mapování.

Mapování geologických podmínek je velmi důležitým podkladem pro určování tříd ražby, které je jedním z důležitých náplní supervize – odsouhlasování tříd ražeb. Proto je velmi důležité, aby v projektu a ve smluvních podmínkách bylo jednoznačně nastaveno, jak se bude zatřiďovat a kdo bude za zatřiďování zodpovědný. Rovněž je vhodné předem stanovit kvazi-arbitra, který bude ve výjimečných případech, kdy není nalezena shoda, rozhodovat o konečném zatřídění. Může se jednat např. o expertní komisi, která na projektu působí výjimečně, např. s frekvencí několikrát v roce. Spolu s určováním tříd ražeb se u konvenčních ražeb stanovuje délka záběru.

Mezi další z činností supervize často patří optimalizace nebo návrh optimalizace horninové výztuže v jednotlivých třídách ražby. V závislosti na smluvních podmínkách je supervize obvykle zodpovědná za instruování trvalé horninové výztuže, zatímco zhotovitel zodpovídá za dočasnou výztuž, přičemž supervize kontroluje, zda tato odpovídá skutečným podmínkám zastižených při ražbě.[12]

V závislosti na smlouvě o dílo může supervize v součinnosti se zhotovitelem upravovat deformační limity apod.

10.5 Kontrola projektové a další dokumentace

Důležitou pracovní náplní supervize je kontrola, připomínkování a případné schvalování projektové dokumentace, technologických postupů a další dokumentace. Supervize má navrhovat úpravy projektu vedoucí k optimalizaci ražby, může přímo na stavbě navrhovat nebo upravovat deformační limity a horninovou výztuž v jednotlivých třídách, instruovat předvrty v případech očekávaného zvýšeného přítoku podzemní vody do díla nebo v úsecích, kde jsou předpokládaná poruchová pásma a instruovat (včetně návrhu) provádění injektáží před čelbou výrubu. Dodatečné injektáže v/přes ostění tunelu tak, aby byla zajištěna odpovídající kvalita díla, jsou obvykle zodpovědností zhotovitele.

Supervize schvaluje a případně navrhuje změny projektu.

10.6 Finanční záležitosti

Zpravidla v měsíčních intervalech jsou schvalovány vykonané práce, které slouží jako podklad pro platby zhotoviteli. Často se jedná o kontrolu a schvalování jednotlivých položek jako např. tříd ražeb, horninové výztuže, injektáží, předvrtů atd. Supervize má povinnost odmítnout nebo pouze částečně akceptovat nekvalitně provedenou práci a žádat nápravu.

Supervize také řeší vícenároky zhotovitele a rozhoduje o jejich oprávněnosti. Pro výše uvedené je nutné, aby kvantita a kvalita vykonaných prací byla řádně monitorována a zaznamenávána tak, aby i po delším časovém období, např. několik let, bylo možné k těmto údajům přistoupit.

[12] Pozn: Autor byl v praxi svědkem toho, že třídy horninové výztuže byly uzpůsobovány z důvodů nedostatečného strojního vybavení zhotovitele, špatné kvality nebo nedostatku materiálu, ziskovosti zhotovitele nebo jeho subdodavatele v jednotlivých třídách, nevhodně nastavených smluvních podmínek apod. V takových případech hraje klíčovou roli supervize, která musí posoudit, zda tyto změny jsou oprávněné a následně, v jaké míře jsou takové změny z hlediska ceny, času a dalších faktorů uznatelné. Jedná se o velmi komplikovaný úkol, který je ne vždy možné zcela jednoznačně posoudit. Supervize se také musí řídit závaznými smluvními ustanoveními a specifikacemi.

10.7 Kvazi-arbitr

Supervize má zajišťovat, že smlouva o dílo je řádně plněna, má aktivně vystupovat a předcházet sporům mezi účastníky výstavby. Ve zvlášť sporných případech, kdy se nedaří nalézt dohodu, může supervize sloužit jako kvazi-arbitr. Zbývající účastníci výstavby mají možnost výsledek rozhodnutí supervize akceptovat nebo odmítnout. V případě odmítnutí slouží obvykle jako další rozhodovací instance expertní komise.

10.8 Nástroje supervize a korespondence

Pro svoji činnost používá supervize zejména následující prostředky:

- Instrukce zhotoviteli ve formě zápisů do stavebního deníku (praxe ČR) nebo lépe, jak je zvykem na zahraničních projektech, vydáváním instrukcí na samostatných formulářích.

- Dopisy adresované zhotoviteli nebo objednateli. Objednatel by měl ve všech případech dostat kopie dopisů vedených mezi supervizí a zhotovitelem. Veškerá písemná komunikace mezi objednatelem a zhotovitelem by se měla odehrávat prostřednictvím supervize.

- Listy závad (NCR).

- Stavební informace ve formě samostatných formulářů.

- Jednání, z kterých se pořizují písemné záznamy.

Tuto dokumentaci musí supervize pečlivě evidovat v elektronické a písemné formě, umožnit její sdílení mezi oprávněnými účastníky výstavby, sledovat její plnění a její vzájemné návaznosti. Bez vhodného softwarového nástroje není možné výše uvedené efektivně plnit.

Autor disertační práce používal aktivně všechny zmíněné nástroje supervize na mezinárodních projektech, kde působil v roli supervize.

10.9 Složení týmu supervize

Tým supervize může sestávat nejen z tunelových inženýrů, geologů, materiálových inženýrů, inspektorů, konzultantů, administračních pracovníků, ale jeho součástí může u velkých projektů a dle typu zajišťovaných služeb být i právní expert(i), projekční tým apod. Aby byl tým supervize úspěšný, měl by obsahovat pracovníky se zkušenostmi se supervizí, projektování a realizací podzemních staveb a experta na smluvní podmínky ve výstavbě.

Níže je uveden příklad složení týmu supervize dozorující ražby podzemních objektů při stavbě cca 80 km soustavy tunelů, šachet a kaveren pro podzemní hydroelektrárnu. Jednalo se o položkový kontrakt „červený FIDIC“, kdy supervize zodpovídala za geologické mapování,

zatřiďování, tvorbu/úpravu projektové dokumentace atd. Ražby se odehrávaly až na cca 20 čelbách najednou na třech velkých staveništích vzdálených od sebe několik desítek kilometrů. Na každém ze staveništ bylo složení týmu supervize zhruba následující:

- tři 12 hod. směny střídající se na nepřetržitém dozoru cca čtyř simultánně ražených čeleb; každá směna sestávala z tunelového inženýra, geologa a jednoho až dvou inspektorů;
- Resident Tunnel Engineer, který zodpovídal za výše uvedené pracovníky a měl k dispozici inspektora s mnohaletou zkušeností s realizací podzemních staveb;
- tým pro materiálové zkoušky sestávající cca ze tří členů, které vedl Laboratory Engineer;
- v případech, kdy ražba probíhala pomocí tunelovacích strojů, byl součástí týmu expert na strojní a elektro vybavení;
- výše uvedené odborníky zaštiťoval na každém staveništi tzv. Chief Resident Engineer, tito pak podléhali hlavnímu manažerovi stavby;
- v hlavní kanceláři byl k dispozici projekční tým, hlavní geolog, tunelový specialista, expert na stavební právo, finanční oddělení, administrativní pracovníci apod.

Na jiných stavbách bylo složení týmu supervize odlišné, přizpůsobené druhu projektu, typu kontraktu, úkolům supervize specifikovaných smlouvou apod.

10.10 Software pro supervizi ražeb

U každého stavebního projektu dochází v průběhu výstavby k rozhodnutím, která jsou ovlivněna skutečnostmi vzniklými při výstavbě. U projektů podzemních staveb jsou rozhodovací procesy na vyšší úrovni a je velmi důležité, aby tyto procesy – např. rozhodování o zatřiďování, použití horninové výztuže, délce záběru, tvaru a rozměrech výrubu, přídavné výztuži nebo injektážních prací atd. – běžely v průběhu výstavby hladce. Skutečné podmínky v podzemí se totiž mohou velmi často měnit a zbývá obvykle jen velmi krátký čas na přijetí rozhodnutí. Navíc po aplikaci horninové výztuže již není masív přístupný pro pozdější mapování. K tomu je nejen nutné správně nastavit rozhodovací pravomoci, ale zároveň shromažďovat průběžně data, která jsou k těmto rozhodnutím potřebná. Může se například jednat o následující údaje:

- postupy ražeb;
- geologické mapování;
- data o zatřídění;
- data o skutečně použité horninové výztuži;
- údaje o kvalitě provedených prací;
- monitoring deformací, hydrogeologických podmínek apod.;
- výsledky materiálových a dalších zkoušek;
- údaje z předvrtů;
- činnosti a prostoje při ražbách na jednotlivých čelbách;
- pracovní charakteristiky tunelovacích strojů nebo případně použité strojní vybavení;
- vydané instrukce, listy závad a další korespondence;
- zápisy z jednání;
- reporty o postupech ražeb a další;
- projektová dokumentace a její aktualizace, tj. platné verze;

- technologické postupy apod.
- kontrola dodržování bezpečnosti práce a životního prostředí
- atd.

Aby rozhodování v průběhu výstavby bylo správné, je nutné data vhodným způsobem a na vhodném místě shromažďovat a následně analyzovat. Za tímto účelem je vhodné použít specializovaný software. Příkladem takového softwaru je aplikace Tunnel Supervision [1], která byla a je používána na tunelových projektech a kterou autor vytvořil. Aplikaci je možné používat on-line a umožnit tak sdílení vybraných dat oprávněným účastníkům výstavby. Podle přiděleného oprávnění se ve vybraných datech nechá vyhledávat, data se mohou prohlížet anebo vytvářet a upravovat a dále lze nad daty automaticky provádět vybrané analýzy a tisknout reporty.

10.11 Shrnutí

Supervize má u podzemních staveb velmi důležitou roli a může významně přispět k tomu, aby byl projekt realizován v odpovídající kvalitě s tím, že cena a harmonogram budou odpovídat smluvním podmínkám. Obrazně řečeno supervize vynáší ze tmy podzemí na denní světlo informace, které nejsou ovlivněné partikulárními zájmy ostatních účastníků výstavby.

U podzemních staveb často dochází k prodloužení doby výstavby a navýšení ceny díla a to z tzv. neočekávaných geologických důvodů, za kterými se nezřídka skrývají pochybení při výstavbě, špatně nastavené smluvní podmínky, případně nedostatky v projektové dokumentaci nebo nedostatečně provedený geologický průzkum. Úlohou supervize je tyto chyby rozkrývat, pokud možno včas na ně upozorňovat, nalézat řešení a snažit se o to, aby se dalším chybám předcházelo. Supervize by měla přispívat k zefektivnění výstavby za dodržení podmínek bezpečnosti práce a kvality díla.

Po čas výstavby je nutné spravovat databanku všech relevantních dat shromážděných při stavbě jako např. údaje o geologii, třídách, deformacích, kvalitě prací, časové snímky směn, vlivu na životní prostředí, fotodokumentaci, atd. Po skončení výstavby mohou být vybraná data předána klientovi a mohou sloužit později jako podklad např. v případě poškození díla, apod.

11 Přehled vybraných doporučení

Pro každý z okruhů disertace – A) činnosti a prostoje při ražbách, B) analýza a predikce harmonogramu ražby, C) třídy ražby a D) supervize - byl popsán současný stav problematiky, problematika byla řešena (studium literatury, průzkum, vlastní zkušenosti autora disertační práce, výpočty s použitím statistických metod a simulace), byly uvedeny praktické příklady a následovala některá doporučení pro zlepšení současného stavu. Níže v Tab. 11.1 jsou vypsána vybraná doporučení spolu s odkazy do relevantních kapitol, v kterých jsou uvedeny další podrobnosti.

Tab. 11.1 Doporučení a odkazy do relevantních kapitol.

Číslo	Okruh / Doporučení ve stručnosti	Kapitoly / Př.
A	**Činnosti a prostoje při ražbách**	
1	Požadavek na uvádění nabídkových trvání jednotlivých činností minimálně jako procentuální údaj z celkového pracovního času (případně speciálního času) a v závislosti na třídách ražby.	4.2, 7
2	Pravidelně a důsledně zaznamenávat a vyhodnocovat prováděné činnosti při ražbách. Pro vyhodnocení je často vhodné použít jednotky min / 1 bm tunelu.	4.2, 7
3	Stanovovat koeficienty vlivů podmínek stavby na jednotlivé činnosti a jejich uznatelnost.	7.4.4
4	Optimalizace jednotlivých činností s ohledem na jejich váhu (procentuální zastoupení v čase) a dílčích operací.	7.4
5	Minimální požadavky pro zajištění vyšších produktivit při provádění činností.	7.4.4
6	Trvání jednotlivých činností a prostojů jsou náhodné veličiny. Možné použití empirické distribuční funkce s využitím zašumění původních vzorků.	Př. 11. - Ot. 4, Př. 25
7	Určení zaučovacího procesu (LF) v nabídkách a kontrola v praxi.	6.7, 7.6, Př. 16
8	V případě neuvedení nabídkových trvání činností v jednotlivých třídách je možné tyto určovat zpětnou analýzou z vhodných referenčních úseků.	7.3
9	Porovnávat efektivitu provádění činností mezi jednotlivými posádkami.	7.6.5
10	Používat speciální software za účelem zadávání, kontroly a vyhodnocování dat.	4.2
11	Ve smlouvě o dílo specifikovat pracovní čas, případně speciální smluvní čas.	4.2, 7.3
B	**Analýza a predikce harmonogramu ražby**	
1	Rozdělení tunelu na referenční a predikované úseky s obdobnými podmínkami stavby. Při výstavbě průběžně určovat podmínky stavby, koeficienty vlivů a jejich uznatelnost.	4.3, 4.7, 7.1, Př. 11. - Ot. 3, 7.4.4, 7.5.4
2	Predikce doby ražby jako náhodné veličiny. Pro zvolené pravděpodobnosti počítat rozsah doby ražby pomocí simulací.	6.8, 8
3	Trvání ražby simulovat na základě reálných vstupních dat – činnosti a prostoje při ražbě jako náhodné veličiny upravené o koeficienty vlivů.	6.9, 8, Př. 24
4	Vyhodnocovat parametry ražby tunelovacího stroje (NPR, PEN, CHS atd.) a součinitel využitelnosti stroje za účelem predikce postupu ražby (ale i dalších vyhodnocení).	4.3.1, Př. 23

C	**Třídy ražby**	
1	Popsány některé vhodné metody zatřiďování na tunelovacích strojích typu TBM otevřeného typu do skalních hornin a doporučení pro začlenění dalších hledisek.	4.4.2, 9.2
2	Nepoužívat třídy ražby na tunelech ražených pomocí EPBM nebo pouze za určitých velmi specifických podmínek. Tunel v návrhu rozdělit na úseky s předpokládaným použitím jednotlivých módů ražby a tlaků na čelbu. Ražba se poté řídí návrhem, který se upravuje o poznatky získané při skutečné ražbě.	9.2, 9.4
3	Kdy a na základě čeho provádět zatřiďování a jak určovat délku nepodepřeného záběru při konvenčních ražbách nebo při ražbách prováděných pomocí TBM otevřeného typu do skalních hornin. Nespojovat rozhodnutí o třídě ražby a délce záběru pouze s obecně známými klasifikačními systémy.	4.4, 9.3, 9.4
4	Vyhodnocovat dlouhodobé chování systému ostění – horninový masiv za účelem stanovení horninové výztuže (tříd ražby), optimalizace horninové výztuže, deformačních limitů apod.	9.3
5	Vyhodnocovat krátkodobé chování za účelem stanovení délky záběru. Zohlednit toto chování při určování třídy ražby.	9.3
D	**Supervize**	
1	Zavedení úloh supervize v ČR v rozsahu obvyklém v zahraničí.	4.5, 10
2	Používání speciálních softwarových aplikací (váže se ke všem okruhům A až D).	4.6, 5, 10.10
3	Supervize by měla mít k dispozici vhodné softwarové nástroje a dostatek personálu.	7.5, 10.9

12 Závěr

Řešená problematika

Výstavba podzemních děl je komplexní činnost, která je ovlivněna větším množstvím různých faktorů. Před vlastní ražbou lze jen obtížně určit podmínky stavby, navíc ty se v průběhu výstavby mění. Analýza postupu ražeb a jejich optimalizace hrají při výstavbě podzemního díla velmi důležitou roli a přispívají k tomu, aby toto bylo realizováno v souladu s původními předpoklady. U tunelů často dochází k prodloužení doby výstavby a navýšení ceny díla z geologických důvodů, nicméně nezřídka dochází i k dalším prostojům při výstavbě, které s geologickými poměry nesouvisí.

Disertační práce se podrobně zabývá analýzou činností a prostojů při ražbách, která by měla být součástí kontrolního a optimalizačního procesu výstavby každého rozsáhlejšího podzemního díla. Jednotlivé vlivy je nutné kvalifikovat, kvantifikovat a určovat jejich opodstatněnost. V závislosti na skutečně dosažených výsledcích ražeb je možné aktualizovat a predikovat jejich harmonogram. Pro daný účel je potřeba zpracovávat, vyhodnocovat a sdílet rozsáhlé množství dat. To není možné bez speciálních softwarů. Autor této práce pro tento účel vytvořil specifický software – online aplikaci Tunnel Supervision [1]. V disertační práci je dále řešena problematika určování tříd ražeb, protože činnosti při ražbě jsou vázány nejen na způsob ražby, ale i na její třídy.

Podklady k disertační práci čerpal autor zejména ze svých praktických zkušeností nabytých zejména na mezinárodních projektech, jakož i z odborné literatury. Výše uvedená problematika je zpravidla na tunelových projektech velmi zanedbávaná, dokonce často není vůbec zohledňována. To platí jak pro prostředí českého podzemního stavitelství, tak i pro mezinárodní prostředí. Upozornit na tuto skutečnost, navrhnout metody řešení a demonstrovat praktické ukázky bylo hlavním motivem pro volbu tématu této disertační práce.

Členění práce

V této disertační práci jsou obecně popsány základní podmínky výstavby tunelů a jejich vliv na rychlost postupu ražby, včetně vlivu na výslednou cenu díla. Práce je zaměřena na čtyři hlavní okruhy:

- činnosti a prostoje při ražbě – jejich kvalifikace a analýza jako náhodných veličin; porozumění vlivu podmínek stavby,
- stanovení harmonogramu ražby jako náhodné veličiny s empirickou distribuční funkcí,
- vývoj softwaru za účelem zpracování a vyhodnocení rozsáhlých datových souborů,
- třídy ražby a metody zatřiďování zejména při ražbách tunelovacími stroji.

Dále jsou uvedena doporučení související s danou problematikou – role supervize při výstavbě; požadavky na projektovou dokumentaci, nabídky a smluvní dokumentaci.

Základní podmínkou řešení jakéhokoliv problému je znalost jeho vlivu a zájem o jeho řešení. Problém nedostatečného zohlednění náročnosti řešení činností a prostojů při ražbě, predikce harmonogramu ražby, specifikace tříd ražby, metody zatřiďování a nedostatek vhodných softwarových aplikací je popsán v kapitolách 1 a 4.

V kapitole 5 je představen software vyvinutý autorem disertační práce, který pomáhá při řešení uvedeného problému.

V kapitole 7 jsou uvedeny některé podrobné analýzy činností a prostojů při konvenčních ražbách a vyhodnocení vybraných parametrů ražby při ražbách plnoprofilovými tunelovacími stroji. Na příkladech z praxe je demonstrováno možné zefektivnění prováděných činností a dopad prostojů na dobu výstavby a cenu díla.

Predikce harmonogramu ražeb je náplní kapitoly 8. Postup ražby je simulován výpočetním softwarem. Výsledkem predikce je náhodná veličina trvání ražby, která představuje plnohodnotnější řešení oproti současným zvyklostem, kdy se ukončení výstavby uvádí jedním termínem. Možnost predikovat dobu ražeb s určitou pravděpodobností umožňuje hlubší poznání jednotlivých vlivů na rychlost ražby a poskytuje prostředek pro lepší optimalizaci ražeb.

V kapitole 9 jsou uvedeny poznatky o třídách ražby a metodách zatřiďování. Autor provedl dotazníkový průzkum, ve kterém byly zohledněny rozdíly v přístupu k dané problematice v ČR a v zahraničí. Výsledky průzkumu jsou uvedeny v této kapitole.

Ačkoli je supervize a její úloha při výstavbě podzemních děl ve světě poměrně dobře zavedena, tak v ČR je zpravidla výrazně zanedbávaná. Kapitola 10 je proto věnována úlohám supervize při výstavbě podzemních děl.

Disertační práce je příspěvkem ke komplexnímu pochopení problematiky analýzy, optimalizace a predikce výstavby tunelů v souvislosti s třídami ražby. Nedostatečné zohledňování zpracované problematiky má za následek prodloužení doby výstavby podzemních děl a navýšení jejich ceny. Proto by mělo být obecným zájmem výstavbu podzemních děl důsledně kontrolovat a optimalizovat.

Splnění cílů práce

Hlavním cílem práce bylo v prvé řadě vytvoření speciálního softwaru umožňujícího spravovat databanku relevantních dat shromážděných při výstavbě podzemních děl – např. podrobných údajů o činnostech a prostojích při výstavbě, jejich porovnávání s nabídkovými/smluvními hodnotami, třídách ražby, kvalitě provedených prací, jejich detailní popis ve formě inspekčního deníku s fotodokumentací atd.

Tato data, jichž je značné množství, jsou v průběhu výstavby vyhodnocována a tvoří důležitý podklad pro optimalizaci ražeb a pro různá jednání mezi účastníky výstavby. Po skončení výstavby mohou vybraná data sloužit k dalším účelům.

Autor této práce postupně vyvinul online softwarovou aplikaci Tunnel Supervision [1], jejímuž vývoji předcházelo vytvoření jednotlivých softwarových modulů [2] a aplikace Tunnel Supervision Database [3], [15]. Vývoj softwaru probíhal po celou dobu tvorby disertační práce. Softwarové aplikace byly ověřeny na řadě reálných projektů v ČR a zahraničí. Data a většina analýz prezentovaných v této disertační práci pocházejí z uvedených softwarových aplikací. Ačkoli je v zahraniční již několik obdobných softwarů používáno, jejich možnosti ohledně analýz časových snímků a podrobných uživatelsky nastavitelných statistik jsou omezenější.

Dalším hlavním cílem práce byla detailní analýza činností a prostojů při ražbách prováděných konvenčním způsobem a pomocí tunelovacích strojů. Některé z těchto analýz jsou prezentovány v disertační práci. Bylo poukázáno na skutečnost, že řada tunelových projektů je významně ovlivněna podmínkami stavby a že tyto podmínky je nutné kvalifikovat a kvantifikovat, a to i za účelem zjištění jejich uznatelnosti, tj. kvůli oprávněnému nároku zhotovitele na jejich proplacení. Změnou podmínek stavby lze docílit urychlení ražeb. Aplikace Tunnel Supervision [1] umožňuje podrobné statistické analýzy týkající se časových snímků. Výstupy těchto analýz jsou úspěšně používány v tunelářské praxi, např. při vyhodnocování navýšení rozpočtu zhotovitele, optimalizaci stávajících ražeb apod.

Predikce harmonogramu ražby byla dalším hlavním cílem disertační práce. Záměrem bylo stanovit postup řešení, jak v závislosti na dosažených výkonech ražby dokončených tunelových úseků predikovat budoucí ražbu. Autor práce představil jedno z možných řešení ve formě simulace harmonogramu ražby, přičemž toto řešení úspěšně demonstroval na příkladech. Simulace různých podmínek ražby umožňuje srovnávat doby ražby za různých podmínek při současném hlubším porozumění jednotlivých vlivů na rychlost výstavby. Tím se výrazně zlepší optimalizace ražeb.

Dalším důležitým cílem práce byl popis současného stavu určování tříd ražby, a to zejména u ražeb pomocí tunelovacích strojů typu TBM do skalních hornin a zeminových štítů EPBM. Jsou představeny některé úspěšně použité specifikace tříd ražeb a metod zatřiďování. Výsledkem jsou doporučení pro budoucí ražby.

V rámci disertační práce jsou uvedeny příklady z praxe, kdy došlo k různým nežádoucím situacím s negativním vlivem na harmonogram a cenu podzemního díla. Následně jsou uvedena doporučení, jak daným situacím předcházet a jak je řešit. V práci je popsáno, jak specifikovat, sledovat a vyhodnocovat činnosti a prostoje při ražbách, rychlosti a harmonogram ražby v závislosti na typu ražby.

Autor disertační práce publikoval řadu odborných článků, konferenčních příspěvků a prezentací na výše uvedená témata. Touto činností a pomocí softwarové aplikace Tunnel

Supervision [1] přispívá k šíření informací o dané problematice a jejímu hlubšímu porozumění, což představuje vedlejší cíl práce.

Výsledky a přínosy práce

Autor vyvinul speciální software Tunnel Supervision [1], který byl a je úspěšně používán na skutečných projektech výstavby podzemních děl. Software umožňuje průběžnou i okamžitou kontrolu, vyhodnocení a optimalizaci prováděných prací.

V rámci disertační práce jsou uvedeny příklady z praxe, kdy došlo k různým nežádoucím situacím s negativním vlivem na harmonogram a cenu podzemního díla. Autor popisuje, jak specifikovat, sledovat a vyhodnocovat činnosti a prostoje při ražbách a harmonogram ražby. Na některých projektech byl software Tunnel Supervision použit při řešení problematiky uznatelnosti víceprací. Pomocí softwaru bylo možné uznatelné vícepráce významně upřesnit.

Vypracovaná doporučení pro specifikaci tříd ražeb a zatřiďování (zejména u ražeb prováděných plnoprofilovými tunelovacími stroji) můžou být použita např. při tvorbě zadávací dokumentace a smluvních podmínek výstavby u budoucích tunelových projektů v České republice.

Další postup

Šířka uvedené problematiky dává značné možnosti pro její další zpracovávání v celém rozsahu nebo pouze v jejích vybraných částech.

Software Tunnel Supervision je dále zdokonalován a rozšiřován o nové moduly. Cílem je, aby se software stal platformou pro všechny účastníky výstavby budoucích projektů podzemních děl.

Doporučení týkající se činností a prostojů při výstavbě by se mohla uplatnit při tvorbě zadávacích podmínek a smluvní dokumentace u budoucích projektů tak, aby byla objednateli vyžadována kvalitní průběžná kontrola a vyhodnocení prací. Při výstavbě by pak bylo možné provádět kontrolu efektivity prováděných prací a jejich porovnání s nabídkovými předpoklady, bylo by možné kvalifikovat a kvantifikovat zpoždění a určovat jejich uznatelnost.

Časový faktor výstavby má prokazatelně významný vliv na výslednou cenu díla. Další studium a zdokonalení metod sledování a vyhodnocování činností a prostojů a predikce harmonogramu by mohlo přispět k optimalizaci ražeb a mohlo by podpořit rozsáhlejší použití rychleji aplikovatelných materiálů a postupů, které jsou obvykle prvotně dražší.

Doporučení týkající se specifikací tříd ražeb a metod zatřiďování by mohla najít uplatnění při tvorbě nových předpisů a norem.

Značná část sledovaných dat je vzájemně a komplexně provázána. To platí jak pro konvenční, tak zejména pro mechanizované ražby pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů. Použití vyspělejších metod analýzy jako například umělých neuronových sítí je jedním z možných způsobů řešení problematiky spojené s ražbou pomocí tunelovacích strojů.

13 Použitá literatura a software autora disertační práce

Softwarové aplikace:

[1] Caravanas, A. (2017): Tunnel Supervision, www.tunnelsupervision.com, MS SQL, C#, ASP.NET softwarová online aplikace

[2] Caravanas, A. (2011): Tunnel Supervision – Production Module, VBA, Excel softwarová aplikace

[3] Caravanas, A., Lowson A. (2007): Tunnel Supervision Database, VBA, MS Access softwarová aplikace

Články v časopisu Tunel:

[4] Peach, G. – Caravanas, A. (2014): Predikce geologických poměrů při ražbě TBM na projektu Neelum-Jhelum, Tunel 2/2014

[5] Caravanas, A. (2013): Projekt podzemní hydroelektrárny Bunji v severním Pákistánu, Tunel 4/2013

[6] Caravanas, A. (2012): Melamchi – tunely pro přivedení pitné vody do Káthmándú, příspěvek v časopisu Tunel 1/2012

[7] Caravanas, A. – Salák, P. (2009): Crossrail – Nové železniční spojení pod centrem Londýna, Tunel 3/2009

[8] Caravanas, A. (2009): Tunely pro elektrárnu Kárahnjúkar, Tunel 1/2009

Konference a sborníky:

[9] Caravanas, A., Matouš, H. (2017): Supervision of tunnelling constructions and software used for their evaluation, příspěvek do sborníku, konference BESTI 2017, Praha

[10] Caravanas, A. (2016): Tunnelling cocktail – Pakistan – Nepal – Iceland, prezentace na konferenci BTSym 2016 – Challenges of today, challenges of tomorrow, Londýn

[11] Caravanas, A. (2015): Přínos supervize na tunelových stavbách a software k jejich provádění a vyhodnocování, poster a příspěvek do sborníku, konference Tunely a podzemné stavby 2015, Žilina

[12] Caravanas, A. (2013): Bunji Hydropower Project, 7100 MW, prezentace a příspěvek do sborníku, konference Podzemní Stavby 2013, Praha

[13] Caravanas, A. (2010): Tunely ražené pomocí TBM pro hydroelektrárnu Kárahnjúkar, prezentace a příspěvek do sborníku, konference Podzemní Stavby 2010, Praha

Ostatní:

[14] Caravanas, A. (2011): Q-system: rock mass classification & rock support, prezentace Káthmándú 2011

[15] Caravanas, A. (2007): Manual - Tunnel Supervision Database

[16] Caravanas, A. (2015): Brochure – Tunnel Supervision, www.tunnelsupervision.com

14 Použitá literatura

[17] Department of Civil and Transport Engineering at Norwegian University of Science and Technology NTNU (2007): TunSim, cost and advance rate estimation database for tunnelling

[18] Hilar a kol. (2011): Přehled terminologie podzemního stavitelství, CzTA ITA-AITES, ISBN 978-80-254-8366-4, Id01066

[19] Meloun, M., Militký, J., Kočmídová, H. (1994): Statistické zpracování experimentálních dat. Plus.

[20] Hendl, J. (2012). Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat. Portál.

[21] Barton, N. (2010): TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock, ISBN 9058093417, Id00776

[22] Messinella, M. (2010): Models for the Analysis of Tunnelling Construction Processes, Universiteit Twente, Id 01927

[23] Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., Herrenknecht, M. (2008): Hardrock Tunnel Boring Machines, Ernst & Sohn, ISBN 978-3-433-01676-3, Id00816

[24] Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., Wehrmeyer, G. (2012): Mechanised Shiedl Tunnelling, Ernst & Sohn, ISBN 978-3-433-02995-4

[25] SIA Zurich (2007): Švýcarská norma SIA 118/198:2007 Civil Engineering, General Conditions for Underground Constructions, General Contract Conditions applicable to code SIA 198, Underground construction - Execution

[26] Rakouský normalizační institut (2001): Rakouská norma ÖNORM B 2203-1 Práce v podzemí – smlouva o provedení díla, Část 1: Cyklické ražby (konvenční tunelování), CzTA ITA-AITES, ISBN 978-80-260-0581-0

[27] Rakouská společnost pro geomechaniku (2008): Rakouská směrnice pro geotechnický návrh konvenčně ražených podzemních staveb, CzTA ITA-AITES, ISBN 978-80-260-0111-9

[28] German Standard (1988): DIN 18312, General Technical Conditions of contract for construction work – underground construction

[29] Barták a kol. (2014): Uživatelská příručka pro mechanizované tunelování v podmínkách ČR, CzTA ITA-AITES, ISBN 978-80-260-5957-8

[30] Løset, F., Barton, N., Grimstad, E., Bhasin, R., K. (1999): Use of the Q-system in weak rock masses, NGI, ID00783

[31] Palmstrom, A., Broch E. (2006): Use and Misuse of Rock Mass Classification Systems with Particular Reference to the Q system, Tunnels and Underground Space Technology, vol. 21, page 575-593

[32] Blindheim, O., T. (2005): A critique of QTBM, Tunnels and Tunnelling International, vol. 37, page 32-35, ISSN: 0041-414X, ID00

[33] Barton, N. (2005): Comments on 'A critique of QTBM' by Blindheim, Tunnels and Tunnelling International, vol. 37, page 16-19, ISSN: 0041-414X

[34] Leber, C., Schubert, W.: Review of current rock mass characterization practices, Institute for Rock Mechanics and Tunnelling

[35] Palmstrom, A. (2005): Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD), Tunnels and Underground Space Technology 20, page 362-372

[36] Morgan, E., K. (2004): Parameters of the Norwegian Q-system and geological conditions correlated with grout take in the JA1 Skaugum Railroad Tunnel, Cand. Scient. Thesis in Engineering and Structural Geology, Department of Geosciences, University of Oslo

[37] Panthi, K., K., Nilsen, B. (2007): Comparison between predicted and actual rock mass conditions: a review based on tunnel projects in Nepal Himalaya, Tunnelling and Underground Space Technology 22, page 173–184, Id01410

[38] Page, D. (2009): Geotechnical baseline reports, Engineering Group of the Geological Society

[39] Klee, L., Hruška, D. (2013): Jak účelně alokovat riziko nepředvídatelných fyzikálních podmínek u podzemních staveb?, Tunel 3/2013

[40] Alejano, R., Perucho, Á., Olalla, C., Jiménez, R. (2014): Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses

[41] Vašek, J. (2005): Rozpojování hornin řeznými nástroji razících strojů, Tunel 1 a 2/2005

[42] Klepsatel, F. – Kusý, P. – Mařík, L. (2003): Výstavba tunelů ve skalních horninách, ISBN 8088905435

[43] Stříkaný beton v podzemním stavitelství, Český tunelářský komitét ITA-AITES, 2008

[44] Ježek, V.: Geologický průzkum: Jako párky bez masa?, časopis Stavebnictví 5/2017

[45] Cyroň, D., Hybský, P., Rössler, K., Ivor, Š., Prajer, J.: Realizace ražby jednokolejných tunelů pražského metra V.A pomocí zeminových štítů; Tunel 1/2013

[46] Guo, Sy-Jye: Analysis of cycle excavation and productivity of large-scale rock tunnel projects — lesson learned in Taiwan, ID01006

[47] Baláž, M. (2017): Využití stříkaného vláknobetonu pro primární ostění tunelu Považský Chlmec; Praha

[48] Byung, J., Asad, R.M., Zafar, B., Sikanda, M.A., Heon, K. (2014): Tunnels Construction Planning and Suggestions to Speed up Tunnel Excavation Progress; ID01936

[49] Přehled terminologie podzemního stavitelství (Výklad a překlad základních pojmů); Česká tunelářská asociace ITA-AITES; 2011; ID01066

[50] Český tunelářský komitét ITA/AITES (2006): Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR; ID 01016

[51] Ministerstvo Dopravy ČR (2006): Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací, kapitola 24 Tunely; ID 01939

[52] Hoek, E.: Rock Engineering, Course notes by Evert Hoek; ID 00357

[53] Hoek, E. (2006 atd.): Practical Rock Engineering; ID 01940

[54] Schubert, W., Goricki, A., Button, E., Riedmüller, G., Pölsler, P., Steindorfer, A., Vanek, R. (2001): Excavation and Support Determination for the Design and Construction of Tunnels. In P. Särkkä, P. Eloranta (eds.), EUROCK 2001; Proc. intern. symp., Espoo: 383-388. Rotterdam: Balkema

[55] Schubert, W., Leea, Y., Z.: Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock; ID

[56] Leea, Y., Z., Schubert, W., Kim, Ch., Y.: Optimization of the round length in design stage for tunnel excavation in weak rock

[57] Hadikusumo B, Tobgay S, 2015 Construction Claim Types and Causes for a Large-Scale Hydropower Project in Bhutan Journal of Construction in Developing Countries 15 pp 49-63

[58] https://cs.wikipedia.org

[59] https://wikisofia.cz

[60] http://kvalita-jednoduse.cz/box-plot/

[61] https://www.wolfram.com/mathematica/new-in-8/probability-and-statistics-solvers-and-properties/demonstrate-the-glivenko-cantelli-theorem.html

[62] Kasal, P., Hladíková, M.: Koutek pro statistiky amatéry; http://stary.lf2.cuni.cz/projekty/pelikan/peli0395/statis1.htm

[63] Rakouský normalizační institut (2001): Rakouská norma ÖNORM B 2203-2 Práce v podzemí – smlouva o provedení díla, Část 2: Kontinuální ražba pomocí tunelovacích strojů, přeložil a vydal ČTA ITA-AITES

[64] Riedmüller, G., Schubert, W. (1999): Critical comments on quantitative rock mass classifications. Felsbau 17(3): 164-167

[65] Hoek, E. (1999): Putting numbers to geology – an engineer's viewpoint. Felsbau 17(3), 139-151

[66] Barton, N., Grimstad, E., Aas, G., Opsahl, O.A., Bakken, A., Pedersen, L. & Johansen, E.D. 1992. Norwegian Method of Tunnelling. WT Focus on Norway, World Tunnelling, June/August 1992.

[67] Barton, N. & Grimstad, E. (1994): Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM. Tunnels & Tunnelling, October 1994, pp. 39-42.

[68] Bienawski, Z. T. (1989): Engineering Rock Mass Classifications, ISBN 0-471-60172-1

[69] Wilfing, F., S., L. (): The Influence of Geotechnical Parameters on Penetration Prediction in TBM Tunnelling in Hard Rock

[70] Cheema, S. (1999): Development of a rock mass boreability index for the performance of tunnel boring machines, Dissertation Thesis, Colorado School of Mines, 262 pp.; Golden

[71] Salimia, A., Moormanna, Ch. , Singhb, T.N., Jain, P. (2015): TBM Performance Prediction in Rock Tunnelling Using Various Artificial Intelligence Algorithms, 11th Iranian and 2nd Regional Tunnelling Conference "Tunnels and the Future"

[72] Yagiz, S. (2014): Modified CSM model for predicting TBM performance in rock mass. – 1, 235 pp.; Saarbrücken (LAP Lambert Academic Publishing)

[73] Thuro, K., Plinninger, R., J. (2003): Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavability; ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, 1227 – 1234 pp.; South African Institute of Mining and Metallurgy

[74] EFNARC (2005): Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock; EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK

[75] Rostami, J., Ozdemir, L., Nilson, B.: Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models; Department of Mining Engineering and University of Trondheim

[76] Farrokh, I. (2013): STUDY OF UTILIZATION FACTOR AND ADVANCE RATE OF HARD ROCK TBMS , dissertation thesis, The Pennsylvania State University

[77] Macias, J. (2016): The updated NTNU TBM prediction model, NTNU/SINTEF, 10.13140/RG.2.2.15752.01285

[78] Ullah, I., Peach, G., Nadeem, M. (2017): Tunnel Boring Machine Advance Ground Investigation in Rockburst-Prone Ground Conditions on Neelum-Jhelum Project; Engineering Challenges for Sustainable Underground Use, 53 – 70 pp.; Egypt

[79] Hemphill, G., B. (2013): Practical Tunnel Construction, ISBN 978-0-470-64197-2

[80] Helm, U., Bonke, F. (2017): Dispute Adjudication Boards – a preferred mechanism for tunnelling projects?, Tunnelling Journal June/July 2017

[81] FIDIC (2004): Obchodní podmínky pro stavební a inženýrské práce staveb, jejichž projektovou přípravu zajišťuje objednatel (investor), tzv. „Červená kniha“ (The Red Book of FIDIC), ISBN 2 - 88432 - 022 –9, 2004

[82] FIDIC (2004): Obchodní podmínky pro zakázky „dodej a vyprojektuj – postav“ pro elektrická a strojní vybavení a pro stavební a inženýrské práce staveb, jejichž inženýrskou přípravu zajištuje zhotovitel, tzv. „Žlutá kniha“ (The Yellow Book of FIDIC), ISBN 2 - 88432 - 023 - 7, 2004

15 Přílohy