

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Pavλίna Slezáková

Realizace tunelů metodou SCL

Implementation of the SCL method for tunnel construction

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. František Dragoun

Praha, 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 31.03.2020

Podpis

Ráda bych touto cestou poděkovala svému školiteli RNDr. Františkovi Dragounovi za vedení práce, trpělivost při konzultacích a cenné rady. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Michalu Uhrinovi za vstřícnost a poskytnutí potřebné literatury, stejně tak patří můj dík konzultantovi Ing. Josefu Rottovi, Ph.D. za věcné připomínky. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za podporu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce představuje všeobecné shrnutí dnešních znalostí o tunelovací metodě Sprayed Concrete Lining. První část je zaměřena na počátky stříkaného betonu, na historii metody SCL a souvislost s metodou NRTM. Podstatnou část práce tvoří zásady a principy ražeb s pomocí metody SCL, včetně samotného postupu ražby i náležitostí v podobě monitoringu stavby. Dále je vypracován přehled o stříkaném betonu, z čeho je tato směs složena a jaké geotechnické parametry bývají pro použití dané metody limitující. V druhé části práce jsou představeny mechanické parametry jílového horninového prostředí. Součástí bakalářské práce je i zhodnocení možnosti použití metody v rámci České republiky a uveden je i konkrétní příklad plánovaného projektu s využitím metody SCL.

Abstract

This Bachelor's thesis is a summary of recent knowledge about the tunneling method Sprayed Concrete Lining. The first part of the thesis is focused on the origins of sprayed concrete, on the history of the SCL method and its connection to the NRTM method. Essential parts of this thesis include the principles of excavation using the SCL method, the excavation process and the requirements, such as construction monitoring. Additionally, there is an overview of shotcrete material; both, what the mixture is composed of and what geotechnical parameters, usually, limit the application of this method. The second part of the thesis presents mechanical parameters of clay rocks, and also includes a summary of the possibilities of using the SCL method in the Czech Republic, with a specific example of a planned project.

Klíčová slova: Ostění ze stříkaného betonu, SCL, NRTM, stříkaný beton, jílové sedimenty

Key words: Sprayed Concrete Lining, SCL, NRTM, sprayed concrete, clay sediments

Obsah

Úvod.....	1
1. Historie	2
2. SCL	3
2.1. Zásady.....	4
2.1.1. <i>Ostění.....</i>	<i>6</i>
2.2. Postup	7
2.3. Monitoring	8
2.4. Numerické modelování	8
3. Stříkaný beton.....	9
3.1. Základní složky.....	9
3.1.1. <i>Cement.....</i>	<i>9</i>
3.1.2. <i>Kamenivo.....</i>	<i>10</i>
3.1.3. <i>Voda.....</i>	<i>10</i>
3.1.4. <i>Přísady a příměsi.....</i>	<i>11</i>
3.2. Vlastnosti a parametry stříkaného betonu	11
3.2.1. <i>Pevnost</i>	<i>12</i>
3.2.2. <i>Moduly přetvárnosti a pružnosti</i>	<i>15</i>
3.2.3. <i>Vodonepropustnost.....</i>	<i>16</i>
3.2.4. <i>Mrazuvzdornost</i>	<i>16</i>
3.2.5. <i>Přilnavost</i>	<i>16</i>
3.3. Metody stříkání betonu.....	17
3.3.1. <i>Suchá směs</i>	<i>17</i>
3.3.2. <i>Mokrá směs.....</i>	<i>18</i>
3.3.3. <i>Porovnání metod</i>	<i>18</i>
4. Mechanické parametry jílů	19
5. Použití v České republice.....	20
6. Závěr.....	25
7. Seznam tabulek a obrázků.....	26
8. Seznam použité literatury.....	27

Úvod

Úkolem bakalářské práce je představení tunelovací metody SCL pro ražbu v jílovém prostředí. Hlavním cílem je získání kompletního přehledu o metodě, o samotném stříkaném betonu a o možném využití metody v České republice, což je v současné době téma aktuální. Při řešení bakalářské práce je kladen důraz na rešerši poznatků a zároveň srovnání informací českých i zahraničních zdrojů, jelikož se mnohdy ohledně původu metody neshodují. Cizojazyčná literatura je čerpána zejména z Velké Británie, kde se s pomocí metody SCL razí většina podzemních děl.

1. Historie

Mnoho článků přikládá počátek metody SCL k havárii tunelů u britského letiště Heathrow v roce 1994. Událost nepochybně zapříčinila intenzivní zkoumání a zdokonalování metody, nicméně první kořeny této technologie sahají minimálně o dalších 100 let dál.

Pravděpodobně nejstarší zmínka spojená se stříkaným betonem pochází z Německa z roku 1892, kdy se August Wolfshotz soustředil na vyvíjení nástroje pro nástřik cementového materiálu na zajištění skalních stěn tunelů (Strubreiter, 1998). Metoda stříkaného betonu se jako vynález přikládá k jménu Carl Ethan Akeley. Ten stříkaný beton v roce 1907 používal jako odolnou vrstvu k ochraně dinosaurích kostí.

V rámci staveb se zdroje ohledně patentování metody stříkaného betonu rozcházejí. Britská asociace Sprayed Concrete Association (SCA, 1999) uvádí, že byl patent na metodu stříkaného betonu udělen roku 1911. Stříkaný materiál byl znám pod názvem "Gunité" a zařízení (předchůdce dnešní podoby torkretovacího stroje) byl tehdy znám jako "Cement Gun". Podle zdroje Atzwanger (1999) patent náleží Carlu Weberovi od roku 1919.

Zpočátku se metoda stala ve Velké Británii velmi oblíbenou. K prvnímu použití v Anglii došlo pravděpodobně v Liverpoolu u tunelu Mersey v roce 1930. Podle zdroje Thomas, (2009), našla významné uplatnění například u tunelů vodní elektrárny Dinorwic nebo u známého podmořského železničního tunelu Channel Tunnel spojující Velkou Británii s Francií v Calaiské úžině, kde se metoda SCL převážně využila v prostředí křídly. Na území Walesu pak znovu v letech 1990-1992 u silničních tunelů Brighton a Pen-Y-Clip.

Technický postup metody SCL se ale nepoužíval pouze v Anglii. Již v roce 1970 pomohl při výstavbě mělkých tunelů v měkkých horninách v rámci metra velkých měst jako je Frankfurt či Mnichov.

Výše zmíněný kolaps tunelů pod letištěm Heathrow realizovaných v roce 1994 bezpochyby k metodě upřel větší pozornosti. Zřízení železničních tunelů pozastavilo výstavbu dráhy HEX (Heathrow Express) i JLE (Jubilee Line Extension), stavěných od roku 1992. Dokončení s trvalým ostěním ze stříkaného betonu a otevření tunelových staveb proběhlo až v letech 1998-1999, čímž se vytvořila železniční trať z letiště do centra Londýna.

Samotnou havárii někteří považují za důležitý milník v historii metody SCL. Jelikož je technologie v podstatě vyvinuta z konvenční metody NRTM (Nová rakouská

tunelovací metoda), používané ve skalním či poloskalním prostředí, došlo u ní po zhroucení tunelů k přehodnocení a k vylepšování její adaptace na prostředí jílu. Na problematiku se zaměřila instituce Health & Safety Execution (HSE, 1996) a Institution of Civil Engineers (ICE, 1996), jejichž závěrečné zprávy zahrnují informace o ověření bezpečnosti projektování v měkkých horninách a také zásady pro navrhování konstrukcí pomocí SCL.

Po přezkoumání postupů metody SCL se i přes původní obavy v realizaci tunelových staveb danou metodou pokračovalo. Roku 1998 byla dokončena trať u přístavu Ramsgate, později také první část velkého britského projektu CTRL (Channel Tunnel Rail Link), konkrétně tunel North Downs. Velmi známou stavbou je také přístav v Dublinu nebo stále probíhající výstavba trasy Crossrail, dráhy protínající celý Londýn od východu na západ.

Od havárie v Heathrow bylo s pomocí metody SCL úspěšně vystavěno více než 200 000 m³ mělkých tunelů (Thomas, 2009), její ztracená pověst se tak po čase obnovila. V dnešní době je za určitých podmínek a pro určité druhy práce (šachty, tunely) možné metodou SCL plně nahradit tradiční konstrukční metody.

2. SCL

Metoda SCL – Sprayed concrete lining (v českém překladu OSB – ostění ze stříkaného betonu) se řadí mezi konvenční metody s cyklickým ražením podzemních staveb. Jak bylo již zmíněno dříve, SCL je odvozená z observačního postupu NRTM a v podstatě se jedná o její obdobu s přizpůsobením se na prostředí zemin, kde se méně pevná hornina chová jako kontinuum (Thomas, 2009). Přesto, že se i u SCL používají nástroje observace, např. monitoring, tak nebývá v Británii řazena k observačním metodám, jelikož je vždy pro každou konkrétní část projektu navržen jednotný a neměnný způsob zajištění (Zítko, Poštěk, 2019a).

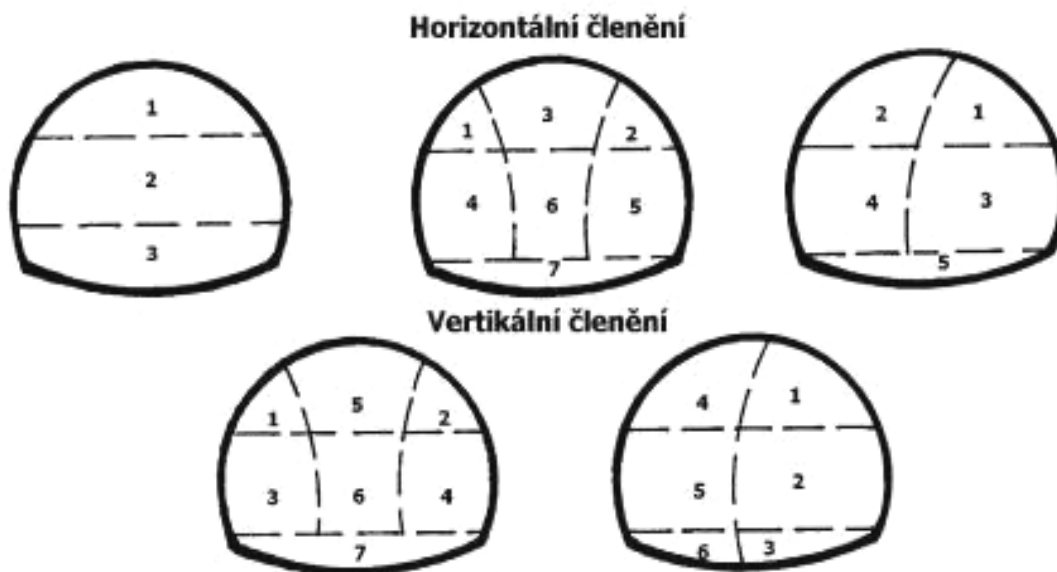
Zajímavostí je pojmenování metody: pro jasný a nezaměnitelný popis od NRTM se v Británii používá právě název Sprayed concrete lining a obdobně ve Švýcarsku název Spritzbeton-methode (Horák, 2007). Rakušané stojí za původním názvem NRTM a dokonce i v mém okolí jsem se setkala s názorem, že jsou jiná označení zbytečná a nejedná se o nové postupy. Příkladem odlišných názorů jsou například práce Thomase (2003) a Horáka (2007). Zatímco v zahraničním zdroji je na metody pohlíženo samostatně podle použití u různých hornin, ve skriptech VUT se píše o flexibilitě rakouské metody, o jejím širokém uplatnění ve všech možných geologických podmínkách a u všech typů podzemních staveb.

Pro zjednodušení v textu pokládám metodu SCL za samostatnou metodu. V následujících podkapitolách popisují základní principy této konkrétní modifikace rakouské metody, její odlišnosti v postupech oproti tradiční NRTM a současně čtenářům poskytují souhrn předností i nedostatků celého procesu při ražbě s metodou SCL.

2.1. Zásady

Pro pochopení postupu metody SCL je vhodné začít se základními principy NRTM, kterých se obvykle uvádí 21–24 (Horák, 2007). Některé jsou totožné s metodou SCL, přičemž ty odlišné principy jsou dány zejména dvěma faktory. Jedná se o ekonomické i bezpečnostní důvody, omezující volnost rozhodování projektanta i zhotovitele při ražbách (např. omezené dodatečné korekce tuhosti konstrukce vedoucí ke zmáhání výrubu nebo zřetelně rychlejší průběh mechanismu porušení). Výsledkem je použití konzervativnějšího přístupu ražby tunelu než u tradiční NRTM (Zítka, Poštěk, 2019b).

Jednotlivé zásady jsou podrobně vypsány v literatuře (Müller, Fecker, 1990) a zmíněny jsou i ve skriptech VUT Brno (Horák, 2007). Mezi nejdůležitější z nich patří využití nosných vlastností horniny (z horniny je vytvořen nosný prvek) za předpokladu udržení její původní pevnosti a zabránění jejímu uvolnění. Typické pro obě metody je členění výrubu v příčném i podélném řezu, s tím, že se u metody SCL očekává členitější plán na postup. Jelikož se hornina umí lépe vyrovnat s menšími zásahy ovlivňující její vlastnosti, platí všeobecné pravidlo, že se s méně pevnou horninou výkopové práce dělí na více menších výrubů (Müller, Fecker, 1990). Pro náročnou rozpojitelnost a nedostačující technologie se členění výrubu aplikuje i ve velmi kvalitních horninách. V takových případech se preferuje horizontální členění, naopak vertikální (obr. 1) je vhodné v prostředí jílu, kde je žádoucí zmenšit sedání nadloží a zajistit větší stabilitu masívu (Horák, 2007).



Obr. 1: Horizontální i vertikální členění výrubu s postupem od č. 1 (Horák, 2007)

Dalším důležitým faktorem je uzavření ostění v dostatečně krátkém čase. Menší výrub je možné rychleji zajistit, a i proto se práce člení a každá dílčí část uzavírá samostatně. Mezi projektanty/zhotoviteli existuje hranice, kde by plocha jednotlivých výrubů kaloty neměla svým objemem přesahovat hranici přibližně 40 m². Jeden metr záběru (postupu stavby) odpovídá odtěžení 40 m³ rubaniny. Stávající jednokolejné železniční tunely mají plochu přibližně 80–90 m² a není u nich tedy možná plnoprofilová ražba (Zítko, Poštěk, 2019a).

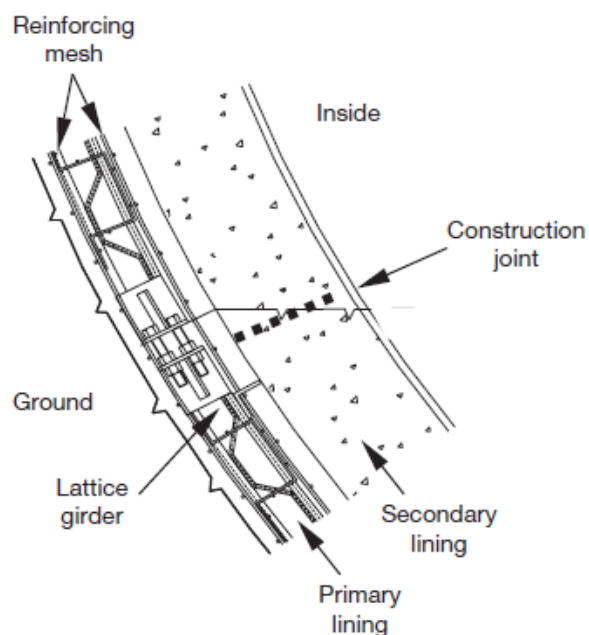
Pro zvýšení bezpečnosti je možné navrhnout jako členění i tzv. pilotní tunel, s menším profilem a umístěný v budoucí kalotě plánované podzemní stavby. U něj pak po částech dochází k reprofilaci na kalotu, jádro, dno až do finální podoby tunelu (Zítko, Poštěk, 2019b).

Při ražbě v jílech je nutné dbát i na potenciální rizika, která mohou vyplývat z předcházejícího geotechnického průzkumu. Výše zmíněné pravidlo 40 m² je i zároveň hranicí přijatelného rizika vyjždění mocných bloků horniny z čelby. V profilu ražby je totiž možné narazit na rozpadající se tzv. potrhane jíly, o nižší pevnosti, na jejichž puklinách může protékat podzemní voda. Druhým rizikem bývají plošně rozsáhlé a nahodilé výskyty pískových čoček. Jelikož se jedná o propustné horniny v prostředí nepropustného nasyceného jílu, hrozí při jejich naražení okamžitý výron zvodnělého materiálu doprovázený vznikem kaverny (Zítko, Poštěk, 2019a).

2.1.1. Ostění

Jak již napovídá název metody, výztuž je zajištěna převážně stříkaným betonem. Zajištění ostění je instalováno pro podporu pevnosti jílového masivu (obvykle se pevnost takové horniny pohybuje v rozmezí 0–10 MPa), vyžadujícího oporu okamžitou, případně ve velmi krátkém čase – optimálním ke stabilitě výrubu (Thomas, 2009). Rychlé zajištění ostění zabraňuje měknutí masívu, důraz se klade zejména na minimalizaci deformací, což je v prostředí jílu obzvláště důležité (Thomas, 2003). V prostředí pevnějších hornin je na rozdíl od jílu znatelně nižší průběh porušení, přesto je i u NRTM zajištění nezbytné. U počátku porušení skalních či poloskalních hornin je výhodou možnost využití observace – k dispozici je více času a pomocí účinných zařízení lze zabránit kolapsu výrubu.

Finální podoba ostění může mít více podob – tradiční primární ostění, později zakryté sekundárním, nebo případné vylepšení v podobě jednoplášťového ostění, tvořené všemi použitými vrstvami betonu. Jednoplášťové ostění je z hlediska minimalizace použitého materiálu i času velmi výhodné, a to i z ekonomického hlediska (Hilar *et al.*, 2005). Ostění (příklad obr. 2) je tvořeno obvykle z 150–350 mm vrstvy stříkaného betonu a bývá podpořeno sítíovou výztuží, případně příhradovými nosníky. V každém případě záleží na jednotlivém projektu, např. velikosti podzemní stavby (Thomas, 2009). Životnost ostění bývá projekty často navrhována až na 100 let (Thomas, 2003).



Obr. 2: Příklad průřezu ostění (Thomas, 2009)

Pro úspěšnou instalaci ostění budoucí podzemní stavby je nutné dodržení určitých pravidel. Pro dokonalý přenos sil (vzájemné působení konstrukce a zeminy) je nutné zajistit celoplošné přiléhání ostění k líci výrubu. Tímto opatřením se minimalizuje migrace vody mezi ostěním tunelu a zeminou. Migrace vody v tomto prostoru může způsobit deformace nadloží v podobě „natlačeného jílu“ do případných dutin v ostění (Horák, 2007).

Na rozdíl od NRTM je u SCL žádoucí ostění ve tvaru kruhu, případně kruhu podobném. U NRTM je běžné využití i podkovovitého průřezu (Horák, 2007). Důvodem pro kruhové ostění je zabránění koncentrace napětí v nárožních oblastech (Müller, Fecker, 1990).

Odlišná od NRTM bývá tuhost ostění. V jílovém prostředí bývá zvykem použití vyšší tloušťky (přesto se jedná o tenkou vrstvu, ideální pro rovnoměrné rozložení tlaku a zamezení projevu lokálních sil (Hilar *et al.*, 2005)), na místo nasazení svorníků a kotev. Při jejich použití by mohlo dojít k tzv. progresivnímu porušení, kdy se svorníky v případě deformace ostění mohou vytahovat a nenabudou tak již své maximální únosnosti (Zítko, Poštěk, 2019a). Určení tloušťky ostění závisí na vnitřním průměru tunelu. Příkladem poměru tloušťky k průměru tunelu jsou nedávné britské projekty (JLE, HEX, T5, CTRL), kde poměr vychází v rozmezí 1:10 - 1:15 (Thomas, 2009).

K ochranění výrubu před deformací pouhá instalace ostění nestačí. Masiv lze za nosný prvek považovat až ve chvíli uzavření a aktivování kompletního nosného prstence z horniny (Thomas, 2009). Za nejzazší vhodnou chvíli na takové uzavření se považuje při odstupu od čelby distance o velikosti průměru výrubu.

Sekundární ostění je třeba zkonstruovat až po doznění deformace primárního ostění. Mělo by být taktéž ideálně kruhové a přiléhat k primárnímu ostění.

Na kvalitu celé konstrukce má značný vliv práce operátora trysky (ang. nozzleman), jejíž nedůkladné provedení může být pro konstrukci kritické. K potížím dochází častěji u komplikovaných geometrií tunelů (HSE, 2000).

2.2. Postup

Zjednodušeně lze metodu shrnout do následujících bodů (Zítko, Poštěk, 2019a):

- ražba pilotního tunelu na plný profil (aplikace primárního ostění ze stříkaného drátkobetonu, instalace technologického vybavení – elektrické kabely, osvětlení atd.)

- ražba kaloty – dle členění (postupné dobrání záběrů do proražení kompletní kaloty s průběžnými kroky: osazení tunelového (příhradového) rámu a vnější výztužné sítě, aplikace první vrstvy stříkaného betonu, osazení vnitřní svařované sítě, aplikace druhé vrstvy stříkaného betonu)
- ražba dna (osazení tunelového rámu, aplikace první vrstva stříkaného betonu)
- dobírání výklenků, profilování tunelu, demontáž technického vybavení
- instalace hydroizolace
- betonáž sekundárního ostění

Možný postup výstavby je graficky zpracován na konkrétním projektu v kapitole č. 5: Použití v České republice (obr. 5 – 8).

2.3. Monitoring

Nedílnou součástí metody je tzv. monitoring. K monitoringu dochází před, během i po ražbě. Po zhodnocení známých informací z dané oblasti se nejprve posuzuje deformace ostění průzkumných štol (např. pilotního tunelu) s modely, což napomáhá při vytváření modelu budoucího podzemního díla. Během stavby se dohlíží na dodržení návrhu, splnění předpokladů projektu a sleduje se chování ostění i horninového masivu, přičemž staticky se na tunel nahlíží jako na „rouru“ tvořenou z nosného prstence masivu a z ostění (Müller, Fecker, 1990).

Naměřená data musí být opakovaně přezkoumána a pravidelně vyhodnocována (HSE, ICE, 1996). Pro potvrzení kvality stříkaného betonu se ještě realizují detailní průkazní zkoušky a v případě zjištění jakýchkoli potíží se provádí již předem připravená opatření (Hilar *et al.*, 2005).

2.4. Numerické modelování

Vhodnými nástroji k realističtějšímu odhadu chování konstrukcí jsou analýzy numerického modelování. Použití jednoduchých analytických metod je uplatněno v rané fázi návrhu, ale nebývají dostatečné (Thomas, 2009).

I když je modelování velmi užitečným pomocníkem, má řadu nevýhod. U modelování je stěžejní zkušený projektant, způsobilý pochopit prognózu a skutečné chování

konstrukce. Komplikovanější modely jsou časově náročné a zvyšuje se u nich riziko chyb, kterých se je možné při modelování dopustit, např. uplatnění lineární elasticity pro zeminu či beton nebo záměna diskontinua za kontinuum (Powell, Clayton, 2007). I přes mnohaletý vývoj je software, vhodný pro numerické modelování, finančně nákladný.

3. Stříkaný beton

Výhody použití stříkaného betonu v tunelářství popisoval ve své práci rakouský profesor Ladislaus von Rabcewicz, jehož jméno je spjaté s počátky metody NRTM. Všiml si, že takový beton je konstrukční materiál, který může sloužit jako trvalé ostění a jeho chování se dá využít ve prospěch staveb (Rabcewicz, 1969). Beton umíme vypracovat do požadovaného tvaru a lze jej kombinovat i s jinou formou podpory (Thomas, 2003).

Stříkaný beton podle užití vyčleňujeme do tří základních skupin:

- 1) SB I: bez konstrukční úlohy
- 2) SB II: s konstrukční úlohou
- 3) SB III: se zvláštní konstrukční úlohou

Vzhledem k realizaci tunelů metodou SCL se v následujících odstavcích zmíním pouze o stříkaném betonu s konstrukční úlohou (SB II), který se uplatňuje zejména jako primární ostění u podzemních staveb (ražba tunelů, štol), dále u hloubení studní či stavebních jam. Informace o jednotlivých složkách byly zpracovány na základě poznatků ze zdrojů ČTuK (2003) a Thomas (2009).

Beton je tvořen směsí práškového pojiva (cementu a hydratačně působící příměsí), kameniva, vody a přísad. Součástí mohou být i výztužná vlákna jako prevence výskytu trhlin a zvýšení odolnosti (vláknobeton, ocelová vlákna – drátkobeton). Pro všechny použité materiály platí všeobecná kritéria, jež je nutné dodržet a vždy brát v úvahu.

3.1. Základní složky

3.1.1. Cement

V České republice se vhodnost cementu pro stříkaný beton posuzuje podle normy ČSN EN 197-1.

Nejhojněji aplikovaným je cement portlandský. Jeho množství i druh závisí na požadavcích projektu, zvláště na pevnost a trvanlivost. Množství se běžně pohybuje u suchého

procesu v rozmezí 370-430 kg/m³ betonu, u mokrého 400-450 kg/m³. Jemnost mletí těchto cementů musí být mezi 3500 - 5000 cm²/g. U jiných cementů se stanovuje zvláštní dohodou. Zahájení tuhnutí se u jemnosti nad 3500 cm²/g očekává mezi 1,5 - 4 hodinami. Norma zahrnuje i požadavky na pevnost betonu v tlaku po 1 dni. Minimálně musí dosahovat hodnoty 9 MPa a při zkouškách po 28 dnech 20 MPa pro dočasný beton a více než 40 MPa pro trvalý beton (Thomas, 2003).

Po přípravě je čerstvý cement vhodné uchovávat v silech nebo na jiném suchém místě. Při přesunu do sila je v cementárně důležité dohlížet na teplotu nižší než 70°C. V betonárně se pak při přípravě směsi kontroluje stanovená teplotní hranice 50°C. Vzhledem k vlivu teploty je potřeba brát ohled na dobu zpracování.

3.1.2. Kamenivo

Podstatnou část stříkaného betonu tvoří písek a kamenivo. Pro stříkaný beton s konstrukční úlohou je preferována primárně oblá frakce o velikosti mezi 4 – 16 mm. Podle velikosti částic rozlišujeme dva názvy. Označení stříkaný beton obsahuje kamenivo s částmi nad 4 mm, pod hranicí 4 mm se hovoří o cementové maltě obsahující štěrkopísek.

Velikost zrn závisí na účelu použití - pokud má SB II ocelovou výztuž, velikost může maximálně dosahovat 11,2 mm, za ideální maximum se obvykle považuje 10 mm (tab. 1). Kvůli tendenci ucpávání se torkretovací hadice se dává přednost jemnější frakci.

	<i>High quality wet-mix sprayed concrete</i>	<i>Cast in situ concrete</i>
Grade	C40	C40
Water/cement ratio	0.43	0.40
Cement inc. PFA, etc.	430 kg/m ³	375 kg/m ³
Accelerator	4%	–
Plasticiser	1.6% bwc	1.5%
Stabiliser	0.7% bwc	–
Microsilica	60 kg/m ³	–
Max. aggregate size	10 mm	30 mm
Aggregate < 0.6 mm	30–55%	32%

Tab. 1: Složení betonu (Darby, Leggett, 1997, Neville, 1995)

3.1.3. Voda

Pro stříkaný beton se používá běžná voda vyhovující směrnici ČSN EN 1008

(Záměsová voda do betonu), nejlépe s odpovídající kvalitou dle směrnice EFNARC 1996 (Evropské technické podmínky pro stříkaný beton).

Aplikace se liší pro suchou a mokrou betonážní směs. U suché dochází k míchání až bezprostředně při torkretování, u mokré se voda přidává už při dávkování betonu. Množství vody je velmi důležité regulovat (přednostně její poměr k cementu) z hlediska vlivu na pevnost betonu. Obvyklý poměr vody v betonu je v rozmezí 0,3-0,55, u mokré směsi pak mezi 0,4-0,65 (Malmberg, 1993).

3.1.4. Přísady a příměsi

Příměsi a přísady se cíleně přidávají za účelem upravení vlastností směsi. Jejich množství nesmí přesáhnout 35% váhy cementu ve směsi.

Z příměsí je nejčastější popílek, mletá struska nebo mikrosilika. Příměsi pozitivně ovlivňují například zpracovatelnost, přílnavost, pevnost a hutnost betonu.

Z přísad se jedná především o urychlovače tuhnutí a tvrdnutí. Existují urychlovače alkalické a nealkalické, mající řadu výhod. Nealkalické urychlovače oproti alkalickým nesnižují konečnou pevnost betonu a v případě působení vody na torkret představují menší ekologickou zátěž. Dalším příkladem možných přísad jsou ztekucující nebo zpožďující látky. Toleranci kombinace jednotlivých přísad je vždy nutno ověřit zkouškami.

3.2. Vlastnosti a parametry stříkaného betonu

Požadavky na vlastnosti stříkaného betonu se liší podle jeho jednotlivých typů, beroucí v potaz následnou úlohu materiálu v rámci celé konstrukce. Pro představu o rozdílných hodnotách betonu je přiložena tab. 2.

<i>Property</i>	<i>High quality sprayed concrete</i>	<i>Cast in situ concrete</i>
Compressive strength @ 1 day in MPa	20	6 (est.)
Compressive strength @ 28 days in MPa	59	44
Elastic modulus @ 28 days in GPa	34	31 (est.)
Poisson's ratio, ν , @ 28 days	0.48–0.18 ^a	0.15–0.22
Tensile strength @ 28 days in MPa	> 2 (est.) ^b	3.8 (est.)
Initial setting time (start–end) in mins	3–5 ^c	45–145 (est.)
Shrinkage after 100 days in %	0.1–0.12	0.03–0.08
Specific creep after 160 days in %/MPa	0.01–0.06	0.008
Density kg/m ³	2140–2235	2200–2600
Total porosity in %	15–20 ^d	15–19
Permeability in m/s	2.0×10^{-12} to 10^{-14}	10^{-11} to 10^{-12}
Microcracking @ 28 days in cracks/m	1300	–
Coefficient of thermal expansion in $-/K$	$8.25-15 \times 10^{-6}$ ^e	10×10^{-6} ^f
Slump in mm	200 (est.) ^g	50

Tab. 2: Typické hodnoty stříkaného betonu v porovnání s běžným litým betonem

Stejně jako v kapitole č. 3 bude popisován pouze typ stříkaného betonu s konstrukční úlohou (SB II), jenž je produkován za účelem zabezpečení a podepření staveb. Přesto, že je možné shrnout obecné požadavky, je žádoucí v každém konkrétním případě zohlednit návrh konstrukce a specifikace v projektové dokumentaci pro danou stavbu a pohlížet na každý projekt individuálně. Ohledně technických podmínek se jedná o nároky na pevnost v tlaku (v průběhu 1-28 dnů), pevnost v příčném tahu, smykovou pevnost, homogenitu, hutnost, modul přetvárnosti, modul pružnosti (může se zvlášť upřesňovat například i tepelné rozpínání nebo smrštění), dále například vodotěsnost (méně často plynonepropusnost), mrazuvzdornost, přilnavost k podkladu, zpracovatelnost, čerpatelnost, druh a množství složek směsi (cement, kamenivo, příměsi, přísady, vlákna), u mokré směsi i množství vody (kapitola 3.3.2.) a ve výsledku se specifikuje celková kvalita.

3.2.1. Pevnost

Stříkaný beton rozdělujeme do pevnostních tříd (stejně jako monolitický beton) a mladý beton do oborů (J1, J2, J3) podle nároků na vývoj pevnosti.

Klasifikaci tříd stanovujeme v souladu s kritérii pro obyčejný beton dle normy ČSN EN 206 + A1 (tab. 3), kde je rozhodující pevnost betonu v tlaku. Tu zjišťujeme pomocí zkoušek na vzorcích válcového tvaru, obvykle se použijí odvrtná jádra s rozměry 10 x 10

cm. Za předpokladu narušení nárůstu pevnosti na vzorcích přírodními podmínkami (např. nízkými teplotami) se domlouvají speciální podmínky na jejich ošetření.

Zatřídění do jednotlivých tříd probíhá zpravidla na vzorku starém 28 dní, dobu je ale možné stanovit i kratší (pro mladý beton do 24 hodin, pro beton nezralý na 3 a 7 dní) nebo delší (56 či 90 dní). Prodloužení uvádíme podle času u třídy následovně: SB 20 (56), SB 20 (90), apod.

Třída pevnosti stříkaného betonu	Průměrná hodnota krychelné pevnosti v tlaku (MPa)
SB 15 (C 12/15)	15
SB 20 (C 16/20)	20
SB 25 (C 20/25)	25
SB 30 (C 25/30)	30

Tab. 3: Třídy pevnosti stříkaného betonu (ČTuK, 2008)

Mladý beton (tj. beton aplikovaný v posledních 24 hodinách) dělíme podle nárůstu a požadavků na pevnost. Vymezujeme u něj tři obory (viz. tab. 4, graficky zobrazené v závislosti na čase na obr. 3).

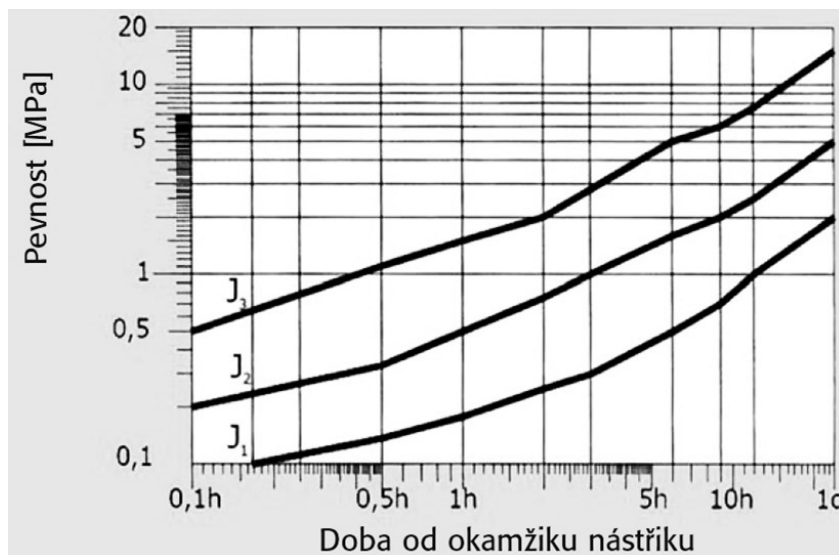
Doba nástřiku	Obor J1 (MPa)	Obor J2 (MPa)	Obor J3 (MPa)
6 min.	0,10	0,20	0,50
10 min.	0,14	0,25	0,75
30 min.	0,18	0,33	1,10
1 hod.	0,25	0,50	1,50
2 hod.	0,30	0,75	2,00
3 hod.	0,50	1,00	2,80
6 hod.	0,70	1,60	5,00
9 hod.	1,00	2,00	6,00
12 hod.	2,00	2,50	7,50
24 hod.	-	5,00	15,00

Tab. 4: Nejnižší pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu (v MPa) dle oborů

Vzhledem k ostění ze stříkaného betonu je důležité sledovat nárůst pevnosti v prvních minutách po nanesení. Zpravidla rychlý nárůst znemožní ukládání další vrstvy tím, že beton na podkladu okamžitě ztuhne. V nestabilních podmínkách je tato vlastnost žádoucí, jen

je nutné akceptovat krátkodobě zesílenou prašnost a odražení materiálu zpět. Vývoj pevnosti do 1 MPa (1 N/mm²) se kontroluje penetrační jehlou.

Často je také potřebný průkaz pevnosti v rozmezí od 6 minut do 6 hodin a poté po 24 hodinách. V případě mělce vedeného tunelu se zatížením celým nadložím se sleduje pevnost i po 9 a 12 hodinách.



Obr. 3: Hranice oborů nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu v tlaku (ČTuK, 2008)

Pevnost betonu narůstá mnohem déle než pouze jeden den nebo měsíc. Na konečné hodnotě se ustálí až po několika letech, přičemž za normálních podmínek dosahuje přibližně 70% konečné pevnosti již po 28 dnech. V případě použití cementu hlinitanového dokonce již po 3 dnech a u betonu s vysokou počáteční pevností (označován písmenem R) po 7 dnech. Hranice 90% konečné pevnosti beton obvykle dosáhne již po několika měsících.

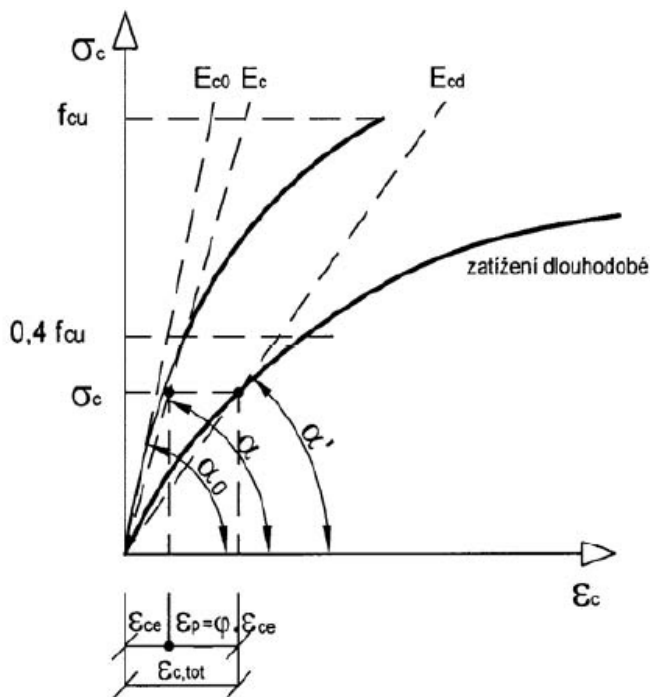
Na vývoj pevnosti má vliv několik faktorů, zejména teplota prostředí a složení betonu (použitím cementu). V každém případě probíhá nárůst pevnosti betonu nejdříve rychleji, poté zpomaluje. Urychlit nárůst pevnosti lze hydratací a navýšením teploty.

Pro primární ostění tunelu je nejvhodnější beton SB 25 / typ II / obor J2. Obor J2 (obr. 3 rozmezí hodnot vyšších než J2 a nižších než J3) je vhodný právě pro rychlou aplikaci silných vrstev (i v případě použití na stropě), při kontaktu s podzemní vodou a i při očekávání rychlého nástupu zatížení horninových a zeminových tlaků.

3.2.2. Moduly přetvárnosti a pružnosti

Moduly přetvárnosti a pružnosti v tlaku jsou základní charakteristikou pro popis vztahu napětí σ a přetvoření ε pomocí přesných číselných hodnot. Jedná se o přetvoření pružná, a díky modulům přetvárnosti i o přetvoření plastická, tedy i trvalá. Prakticky se využívají k výpočtu deformací.

Hodnoty modulů přetvárnosti nejsou stálé a vždy klesají s rostoucím napětím, přičemž jsou důležité především jejich extrémní hodnoty. Příkladem je modul na mezi únosnosti, jenž je minimálním mezním případem pro porušení. Dalším je modul skutečný (tečnový) a modul okamžitý. K popisu betonu pod vlivem malých napětí se využívá modul počáteční. Na obr. 4 jsou vyobrazeny různé moduly betonu v tlaku pro dlouhodobé zatížení.



Obr. 4: Vyobrazení různých modulů betonu v tlaku, E_{c0} počáteční modul, E_c sečnový modul (Terzijski, 2005).

Modul pružnosti lze dělit na statický a dynamický, dále na tečnový a sečnový. Souvisí se složením betonu, a tudíž je nutné jeho závislost s pevností betonu stanovit vždy pro konkrétní betonovou směs a nelze ji aplikovat pro beton jiného složení. Modul pružnosti je charakteristický tím, že je u mladého betonu jeho hodnota nižší a při identickém zatížení se u vyšší hodnoty projevuje menší deformace. Je možné jej předepsat (stejně jako pevnost betonu), čehož se využívá především u citlivých konstrukcí. Nejlépe se stanovuje u betonu s

velmi nízkým namáháním, zejména pomocí metod dynamických (např. rychlost ultrazvukového signálu v materiálu).

3.2.3. *Vodonepropustnost*

Odolnost vůči průsaku vody se stanovuje na základě kritérií norem pro standardní monolitický beton (ČSN EN 206 + A1). Posouzení probíhá na pevném odvrtném jádru ze stříkaného betonu. Při požadavku na jeho úplnou vodotěsnost nesmí voda na jeho povrchu prosáknout dále než k hranici 50 mm a součinitel propustnosti zapříčiněným vodou nesmí být větší než 10^{-12} m/s (ČTuk, 2003).

Požadavek na vylepšené vlastnosti, úroveň jakosti a vodotěsnosti, je i pro ta nejnáročnější prostředí výhodou, i přes navýšení nákladů na stavební materiál (Neville 1995). V Anglii je mezi investory v oblibě aplikace vodotěsné izolace u veřejných prostor, v neveřejných (části trasy u letišť) pak dávají přednost jednoplášťovému ostění bez izolace (Powell, Clayton, 2007).

S vodonepropustností souvisí i odolnost proti chemické agresivitě. V prostředí chemicky agresivním je potřeba použít beton se sníženou propustností (tzn. při zkoušce snížit proniknutí vody maximálně na hloubku 30 mm (ČTuK, 2008). Dále se navrhuji síranovzdorné cementy, různé přísady a k neutralizaci chemického agresora i kamenivo (kyselinovzdorné, vápencové, dolomitické).

3.2.4. *Mrazuvzdornost*

Zkoušky na mrazuvzdornost se provádí na základě tříd podle normy ČSN EN 206 + A1. Samotná průkazní zkouška se vykonává u stříkaného betonu vystaveného méně agresivnímu prostředí, tzn. s opakovaným mrznutím při mírném zavodnění bez výskytu soli (stupeň vlivu prostředí XF1). V agresivnějších podmínkách (XF2, XF3, XF4) je nutné splnění nároků na mrazuvzdornost i na odolnost proti odlupování vnějších vrstev.

3.2.5. *Přilnavost*

Minimální hodnoty přilnavosti se uvádí v rozmezí od 0,1 do 1 MPa. V případě konstrukčního typu vazby by měla přilnavost k betonu dosahovat minimálně 1 MPa (1 N/mm^2) a k hornině minimálně 0,5 MPa (1 N/mm^2). Uvedené hodnoty jsou průměrem 3 vzorků o velikosti 10 cm a stáří 28 dní s tím, že žádný z nich nesmí klesnout pod 75%

zmíněného průměru. Přílnavost se neuvádí v případě, pokud žádnou hornina nevykazuje.

3.3. Metody stříkání betonu

Směs na stříkaný beton se připravuje dvěma způsoby: technologií pro suchý a pro mokrý způsob nástřiku. Každá z nich přináší určité výhody a nevýhody, srovnání obou postupů je uvedeno v podkapitole 3.3.3.

3.3.1. Suchá směs

Betonová směs pro suchý způsob aplikování se míchá z kameniva vysušeného i vlhkého. Rozdíl spočívá v předepsané vnitřní vlhkosti kameniva a v místě zhotovení. Dodržení vlhkosti je důležité kvůli prevenci ucpání dopravního vedení (potrubí) stříkacího stroje (u nízkých výkonů), způsobeným zvýšenou prašností. Dle zdroje ČTuK (2008) by u vysušeného kameniva vlhkost neměla přesáhnout hranici 0,2% a u vlhkého musí být v rozmezí 1,5 - 5 %. Dle normy ČSN EN 14487-1 je hranice stanovena na 6%, přičemž obvykle se pohybuje mezi 2 – 4 %.

Zhotovení suché směsi probíhá u vysušeného kameniva přímo v míchacím středisku výrobce. Směs s vlhkým kamenivem se zhotovuje buď v betonárně, nebo v mísicím centru přímo na staveništi. Produkt je nutné okamžitě přepravit na staveniště a přitom dodržet maximální dobu pro zpracování (1,5 hodiny), a to kvůli zajištění předepsané kvality stříkaného betonu.

U samotného nástřiku se betonová směs ve strojním zařízení dopravuje prostřednictvím stlačeného vzduchu v dokonale utěsněné hadici k trysce, kde se pomocí dávkovacího čerpadla mísí s vodou a urychlovačem. Přibližné složení celé směsi je uvedeno v tab. 5.

Složka	Množství
Cement CEM I 42,5 R	400 kg
Kamenivo 0–4 mm	1140 kg
Kamenivo 4–8 mm	560 kg
Roztok urychlující přísady s vodou (přidávaný do trysky)	cca 190 kg
Urychlující přísada	6 až 8 % k hmotnosti cementu

Tab. 5: Přibližné složení pro nástřik 1 m³ suchým způsobem (ČTuK, 2008)

3.3.2. Mokrý směr

Z hlediska vysokých požadavků na kvalitu se výroba mokré směsi svěruje betonárně s příslušnou certifikací, dodávající směs s obsahem plastifikačních přísad. U tohoto způsobu nástřiku je možné použít i vlákna pro vyztužení (velikostně vhodně zvolená pro minimalizování rizika zacpání dopravního potrubí - hadic). Doba zpracovatelnosti je stejná jako u suché směsi a k jejímu prodloužení lze využít zpomalujících přísad. Nezbytnou součástí u výroby je průkazní zkouška a vyhotovení dodacích listů.

Aplikace probíhá pomocí čerpadel na beton. Dopravená směs se v trysce mísí pouze s urychlovačem a je připravená jako běžný monolitický beton. Její přibližné složení je uvedeno v tab. 6.

Složka	Množství
Cement CEM I 42,5 R	430 kg
Kamenivo 0–4 mm	1025 kg
Kamenivo 4–8 mm	645 kg
Plastifikátor	4 kg
Roztok urychlující přísady s vodou (přidávaný do trysky)	cca 185 kg
Urychlující přísada	5,5 až 8 % k váze cementu

Tab. 6: Přibližné složení pro nástřik 1 m³ mokrým způsobem (ČTuK, 2008)

3.3.3. Porovnání metod

Ve srovnání suchého a mokrého způsobu nástřiku se i přes vyšší finanční nároky upřednostňuje postup mokrý, poskytující zřetelně vyšší denní výkon. Při současné rychlosti ražby tunelů se cení především čas. Kromě toho se u mokré aplikace lépe kontroluje dávkování vody a přísad, je u ní možnost rovnoměrného promíchání vláken ve směsi nebo třeba nástřik silnějších vrstev. Navíc má směs lepší přilnavost a lze u ní dosáhnout pevnosti v tlaku až 80 MPa (Hilar *et al.*, 2005). Technologie mokrého nástřiku je vhodnější z hlediska pracovních podmínek, zejména nižší prašnosti. Nevýhodou jsou vyšší kvalitativní požadavky a náklady na přípravu, především se jedná o technická zařízení určená pro realizaci mokrého nástřiku betonu.

4. Mechanické parametry jílu

Mechanické vlastnosti jílu a jílovitých zemin jsou od ostatních zemin odlišné a jsou velmi specifické. V rámci staveb bývají považovány za rizikové, přičemž stačí respektovat jejich chování. Z hlediska podzemních staveb je prostředí jílu výhodné díky jejich snadné rozpojitelosti a nízké propustnosti pro podzemní vodu. Naopak příčinou komplikací může být, oproti poloskalním horninám, příliš nízká pevnost, vyšší stlačitelnost a také špatné využití rubaniny (Zítka, Poštěk, 2019a).

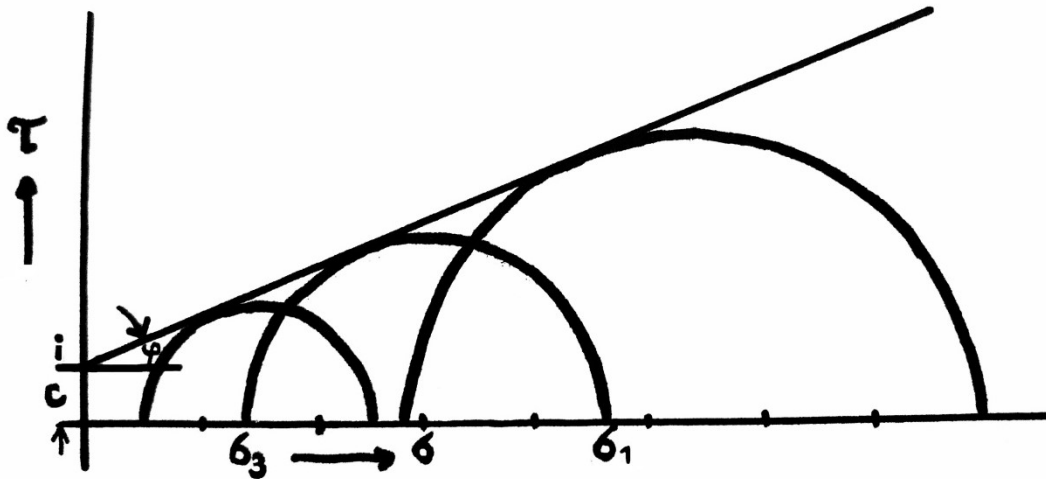
Za jíly jsou všeobecně považované neuzpevněné, plastické, sedimentárně uložené zeminy, složené především z jemnozrnných minerálů, přičemž jsou tvořeny minimálně z poloviny z částic menších než 0,002 mm (Šucha, 2001).

Zásadní změny mechanických vlastností způsobuje v první řadě obsah vody, dále složení minerálů, struktura zeminy a tvar částic. Pokud dojde k vysušení jílu, je sypký a smršťuje se. Se snížením vody se zvyšuje pevnost zeminy (jílu) a snižuje stlačitelnost. V opačném případě zemina bobtná. Pro popis nasycení se používá vlhkost w , stupeň nasycení S_r a pórovitost n (Weiglová, 2007).

Mezi základní charakteristické vlastnosti zemin se řadí smyková pevnost a ve spojení s klasifikací plasticity: mez tekutosti w_l a mez plasticity w_p . Pro popis dále například objemová hmotnost, soudržnost, úhel vnitřního tření a součinitel tlaku v klidu.

Pojem pevnost ve smyku je maximální rezistence zeminy při určité zátěži a je důležitá při výstavbách z hlediska bezpečnosti (závisí na únosnosti, stabilitě a případné deformaci). Stanovení pevnosti ve smyku probíhá na neporušených vzorcích, a to například na triaxiálním smykovém přístroji.

Pro popis stavů napětí je vhodné použití Mohr-Coulombova modelu (pro zobrazení Mohrova kružnice) podle teorie, počítající se smykem po překročení smykové pevnosti, závislé na vlastnostech daného materiálu a velikosti kolmého napětí. Závislost mezi napětím a pevností jílu je zobrazena na obr. 5, kde křivka protíná vertikální osu ve vzdálenosti c – soudržnost (koheze). Její velikosti se odvíjí podle vzdálenosti z_{rn} – menší distance znamená větší přitažlivé síly a tím i soudržnost (Myslivec *et al.*, 1970).



Obr. 5: Mohr-Coulombovo zobrazení definující smykovou pevnost jílu (Myslivec et al., 1970), φ – úhel vnitřního tření, c – soudržnost, σ – normálové (kolmé) napětí, τ – tangenciální (tečné) napětí

Mechanika zemin je ale mnohem komplexnější, především kvůli anizotropii tuhosti a smykové pevnosti. Obě tyto anizotropie bývají stejného fyzikálního původu, což se předpokládá i u anizotropie vrozené a anizotropie získané. Rozlišení anizotropií na vrozené a získané se provádí zejména u specifických zemin, tedy i u jílu, kde je vrozená vlastnost projevem anizotropní struktury jílových minerálů, a kde vlastnost získaná představuje mechanickou reakci na současné namáhání jílové zeminy (Rott, Mašín, 2012).

Pro usnadnění popisu anizotropie jsou zavedeny tzv. koeficienty anizotropie. Zastupují poměr smykových modulů, modulů pružnosti v tahu (Youngova modulu) a Poissonovy konstanty (Mašín, Rott, 2013). K výpočtu a popisu anizotropie tuhosti se užívá symetrické matice o rozměru 6x6, která obsahuje všechny důležité deformační parametry (Rott, Mašín, 2012).

Hodnoty parametrů a charakteristiky anizotropních zemin se zjišťují pomocí několika experimentálních zkoušek (zkouška za konstantního komorového napětí, zkouška za konstantního osového napětí, nebo zkouška za izotropní napjatosti), přičemž je žádoucí využití minimálně dvou zkoušek včetně použití lokálních snímačů deformace a piezokeramických snímačů, tzv. bender elements (Rott, Mašín, 2012).

5. Použití v České republice

Jíly a jílovité zeminy na území České republiky nejsou výjimkou, nicméně výstavba tunelů se například v oblasti limnických pánví ekonomicky nevyplatí a doprava je

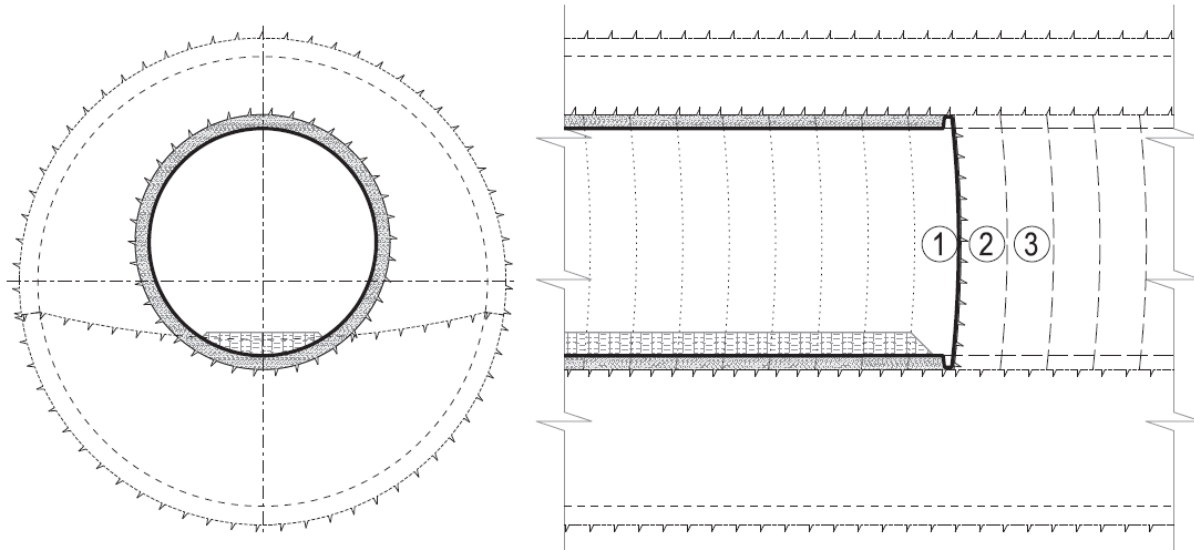
tedy vedena povrchově. Použitelným prostředím pro metodu SCL v rámci České republiky jsou mocné jílovité sedimenty v neogénu karpatské předhlubně. Se zájmem o tuto oblast se společnost SUDOP PRAHA a.s. a SUDOP BRNO spol. s.r.o. podílí na přípravě použití ražby postupem SCL, prozatím v rámci návrhu v projektovém stupni (Dokumentace pro územní rozhodnutí, DÚR), od kterého je cesta k realizaci stavby ještě poměrně dlouhá. Zdrojem informací této kapitoly jsou materiály Ing. Tomáše Zítka, vedoucího střediska tunelů SUDOP PRAHA a.s. (Zítka, Poštěk, 2019a).

Projekt zahrnuje konzervativní návrh na modernizaci železnice (zdvoukolejnění a její přizpůsobení na rychlost 200 km/h) a kompletní rekonstrukci spojení mezi městy Brno a Přerov v jílech s nízkým nadložím (konkrétně nanejvýš o mocnosti do 22 metrů). Trať by měla být v budoucnu součástí železničního spojení Gdaňsk – Varšava – Brno/Bratislava – Vídeň a je rozplánovaná do 5 dílčích částí (1. Brno - Blažovice, 2. Blažovice - Vyškov, 3. Vyškov - Nezamyslice, 4. Nezamyslice - Kojetín, 5. Kojetín - Přerov).

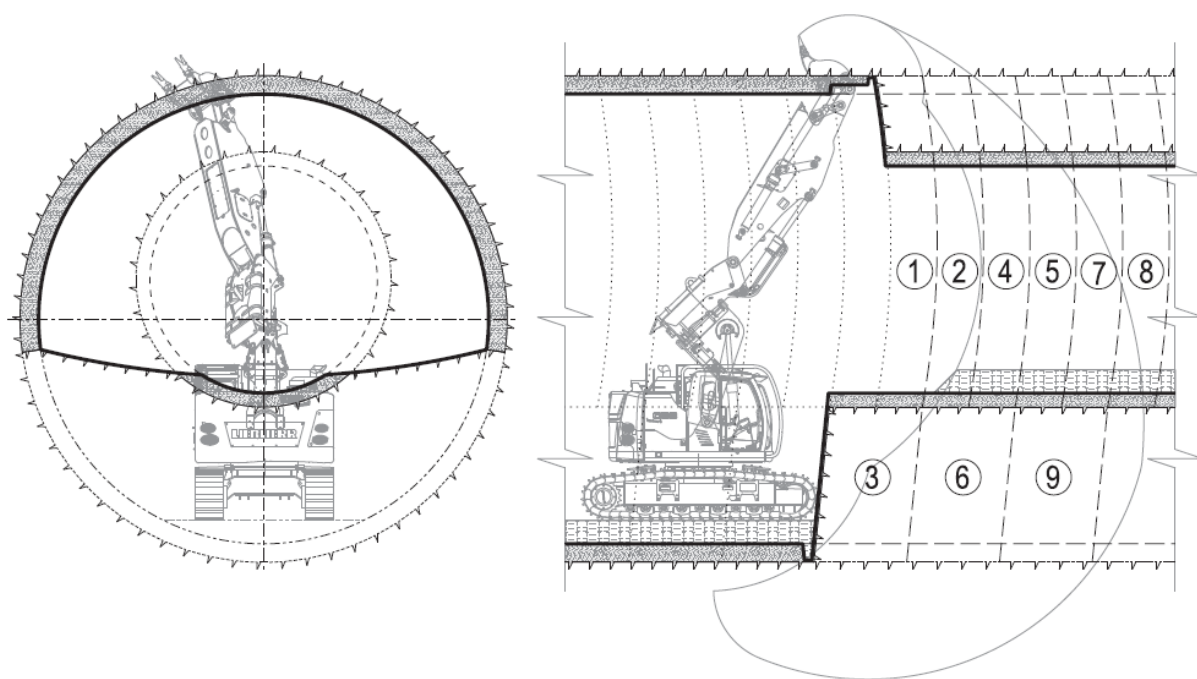
Zajímavými jsou především báňská díla 2. části Blažovice – Vyškov. Zahrnují ražené tunely (Holubnický a Habrovanský) a například i hloubenou stavbu (Rousínovský tunel). Dalším významným raženým dílem je navržený Dřevnovický tunel v části úseku stavby Vyškov – Nezamyslice.

Kromě neogenních jílu se v nadloží u velké části trasy nachází i vrstva spraší a sprašových hlín, dosahujících variabilních mocností. Pro zvýšení bezpečnosti ražených staveb v takto náročných geotechnických podmínkách je v plánu přistupovat ke stavbě jako ke dvěma jednokolejným tunelům (u hloubených jako k dvoukolejným) a začít s ražbou pilotních tunelů, jakožto dočasných konstrukcí. Výhodou pilotních tunelů je jejich možné využití i jako štol průzkumných, ventilačních nebo únikových.

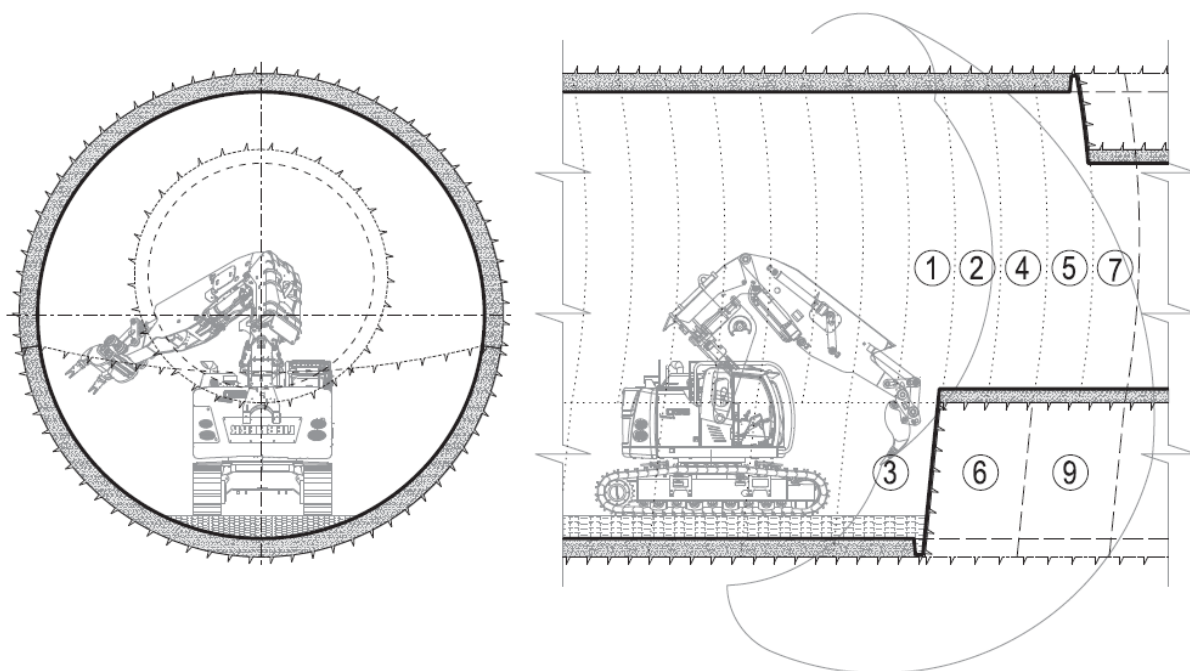
Plánovaný postup je následující: Pilotní tunely budou raženy po 1 m (s 4 - 6 záběry denně), s finálním průměrem 2,75 m a ve tvaru kruhu. Ostění těchto výrubů bude ze stříkaného betonu o tloušťce 300 mm, a jelikož se jedná jen o konstrukce dočasné, využít bude drátkobeton bez pevné výztuže. Poté se provede reprofilace, tunely se prorazí na finální profil o průměru 5,25 m. Postupovat se bude ve dvou záběrech po 1 m v kalotě a dále po jednom záběru na dobrání dna po 2 m. Po každém záběru proběhne na čelbě opatření v podobě 50 – 75 mm vrstvy stříkaného betonu. K uzavření prstence dojde v rozmezí 0,5 – 3 m od čelby. Graficky zpracovaný postup je pro představu zobrazen na obr. 6 – 9.



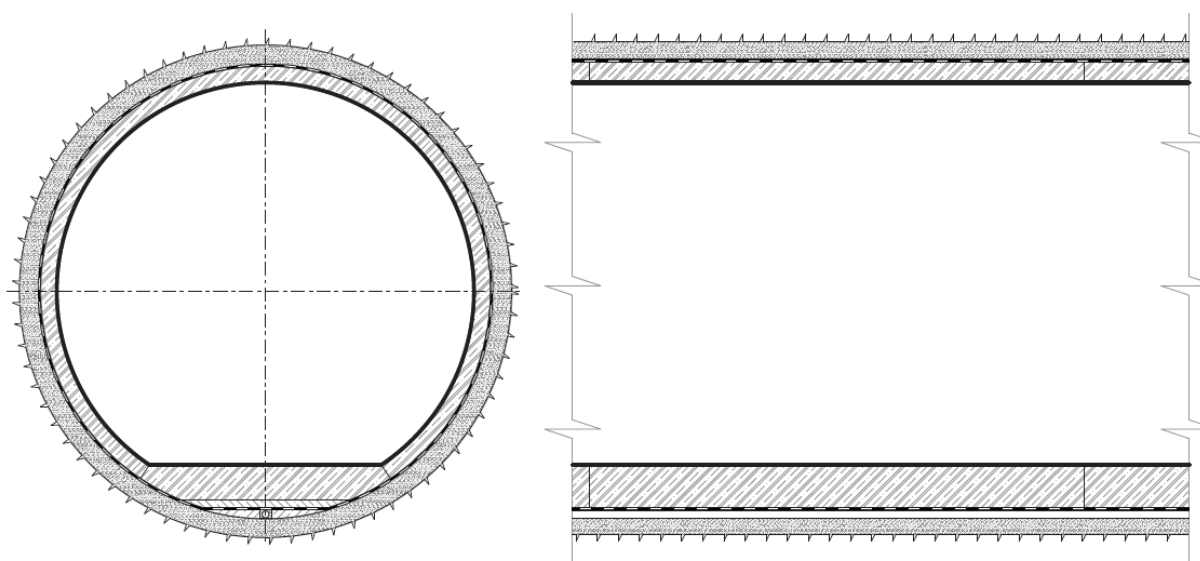
Obr. 6: Ražba pilotního tunelu (Zítko, Poštěk, 2019b)



Obr. 7: Ražba kaloty (Zítko, Poštěk, 2019b)



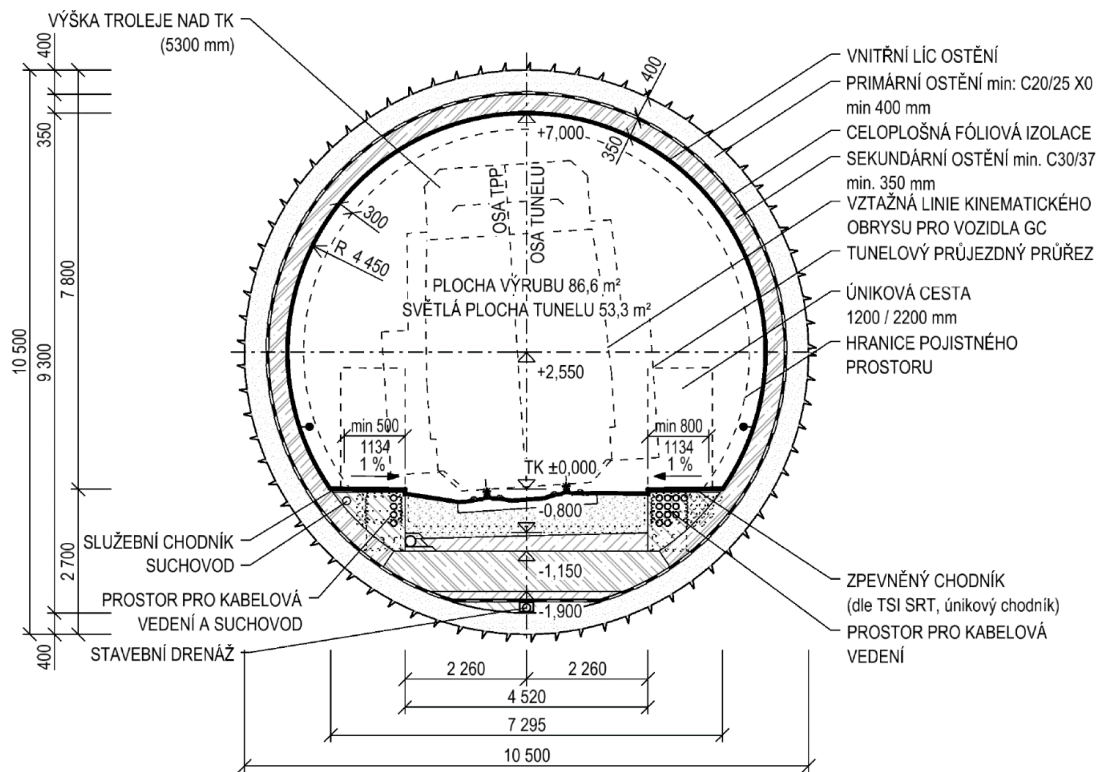
Obr. 8: Ražba dna tunelu (Zítko, Poštěk, 2019b)



Obr. 9: Instalace hydroizolace a sekundárního ostění (Zítko, Poštěk, 2019b)

U všech výše zmíněných ražených tunelů se plánuje dvouplášťové ostění. Tloušťka primárního ostění ze stříkaného betonu je navrhovaná 400 mm, u sekundárního ostění ze železobetonu 350 mm (v koruně). Primární ostění budou tvořit i příhradové rámy v podobě betonářské výztuže a svařovaných sítí. Pro představu o celé konstrukci je přiložen vzorový list pro mechanickou ražbu (obr. 10). Finální délka ražeb by měla být například u Holubnického

tunelu z celkových 975 m maximálně 700 m a u Habrovanského tunelu z celkových 637,5 m necelých 390 m.



Obr. 10: Vzorový list pro mechanickou ražbu (Zítka, Poštěk, 2019b)

6. Závěr

Bakalářská práce obsahuje shrnutí odlišných pohledů na metodu SCL a může sloužit i jako přehled o stříkaném betonu v rámci ostění podzemních staveb. Přesto, že základy metody nepochybně tvoří často využívaná metoda NRTM, přijde mi odlišení obou postupů výhodné, a to zejména ve Velké Británii. Obě metody doprovází určité náležitosti a pro snazší popis je ideální přímé užití termínu SCL, a to například z důvodu možného vynechání specifikace o prostředí zemin.

Ačkoliv ražby pomocí metody SCL v jílových horninách provází řada rizik, soudobé poznatky a technologie výrazně minimalizují jejich výskyt. Metoda se ukázala jako ekonomicky efektivní, všestranná a vhodná i pro podzemní stavby složitých tvarů.

V rámci České republiky není ražba tunelů pomocí této metody běžná. Zatím je do budoucna plánováno renovovat spojení na železniční trati mezi městy Brno a Přerov. K realizaci by projektantům mohly přispět i zkušenosti ze zahraničí, ale není jisté, zdali se modernizace uskuteční právě podle současného stupně projektové dokumentace.

7. Seznam tabulek a obrázků

Tab. 1: Složení betonu (Darby, Leggett, 1997, Neville, 1995)	10
Tab. 2: Typické hodnoty stříkaného betonu v porovnání s běžným litým betonem.....	12
Tab. 3: Třídy pevnosti stříkaného betonu (ČTuK, 2008)	13
Tab. 4: Nejnížší pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu (v MPa) dle oborů	13
Tab. 5: Přibližné složení pro nástřik 1 m ³ suchým způsobem (ČTuK, 2008)	17
Tab. 6: Přibližné složení pro nástřik 1 m ³ mokřým způsobem (ČTuK, 2008)	18
Obr. 1: Horizontální i vertikální členění výrubu s postupem od č. 1 (Horák, 2007).....	5
Obr. 2: Příklad průřezu ostění (Thomas, 2009).....	6
Obr. 3: Hranice oborů nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu v tlaku (ČTuK, 2008).....	14
Obr. 4: Vyobrazení různých modulů betonu v tlaku, E_{c0} počáteční modul, E_c sečnový modul (Terzijski, 2005).	15
Obr. 5: Mohr-Coulombovo zobrazení definující smykovou pevnost jílu (Myslivec et al., 1970), φ – úhel vnitřního tření, c – soudržnost, σ – normálové (kolmé) napětí, τ – tangenciální (tečné) napětí....	20
Obr. 6: Ražba pilotního tunelu (Zítko, Poštěk, 2019b)	22
Obr. 7: Ražba kaloty (Zítko, Poštěk, 2019b).....	22
Obr. 8: Ražba dna tunelu (Zítko, Poštěk, 2019b).....	23
Obr. 9: Instalace hydroizolace a sekundárního ostění (Zítko, Poštěk, 2019b)	23
Obr. 10: Vzorový list pro mechanickou ražbu (Zítko, Poštěk, 2019b)	24

8. Seznam použité literatury

ATZWANGER, R. (1999): Die Sulfatbestandigkeit alkalifrei beschleunigter Spritzbetone. Diplomarbeit, University of Innsbruck.

ČSN EN 1008 (2003): Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 20 s. Třídící znak 732028.

ČSN EN 14487-1 (2006): Stříkaný beton – Část 1: Definice, specifikace a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 36 s. Třídící znak 732431.

ČSN EN 197-1 ed. 2 (2012): Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví 36 s. Třídící znak 722101.

ČSN EN 206 + A1 (2018): Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 88 s. Třídící znak 732403.

ČTuK (2003): Zásady používání stříkaného betonu. Český tunelářský komitét ITA-AITES, Pracovní skupina ČTuK pro stříkaný beton, Praha.

ČTuK (2008): Stříkaný beton v podzemním stavitelství. Český tunelářský komitét ITA-AITES, Pracovní skupina ČTuK pro stříkaný beton, Praha.

DARBY, A., LEGGETT, M. (1997): Use of shotcrete as the permanent lining of tunnels in soft ground, Mott MacDonald Milne Award submission, (unpublished).

EFNARC (1996): European specification for sprayed concrete. Experts for Specialised Construction and Concrete Systems, Farnham, UK.

HILAR, M., THOMAS, A.; FALKNER, L. (2005): Nejnovější inovace v provádění ostění ze stříkaného betonu – metoda LaserShell. Český tunelářský komitét ITA-AITES, 14. ročník, č. 4, 11-19.

HORÁK, V. (2007): Podzemní stavby: Studijní opory pro programy s kombinovanou formou studia. FAST: VUT Brno, 126-138.

- HSE (1996): Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) tunnels: a review of sprayed concrete lined tunnels with particular reference to London clay. HSE Books, Sudbury, Suffolk.
- HSE (2000): The collapse of NATM tunnels at Heathrow Airport. HSE Books, Sudbury.
- ICE (1996): Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground. American Society of Civil Engineers, ICE design and practice guides, New York.
- MALMBERG, B. (1993): Shotcrete for rock support: Guidelines and recommendations – a compilation, Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- MAŠÍN, D., ROTT, J. (2013): Small strain stiffness anisotropy of natural sedimentary clays – review and a model, Charles University, Prague.
- MÜLLER, L., FECKER, E. (1978): Grundgedanken und Grundsätze zur ‘Neuen Österreichischen Tunnelbauweise’. Grundlagen und Anwendung der Felsmechanik. Felsmechanik Kolloquium Karlsruhe, Clausthal, 247-262.
- MYSLIVEC, A., EICHLER, J., JESENÁK, J. (1970): Mechanika zemin. SNTL/ALFA, Praha.
- NEVILLE, A. M. (1995): Properties of concrete, Addison Wesley Longman Ltd, Harlow.
- POWELL, D. B., CLAYTON, C. (2007): SCL tunnelling in stiff clays: recent experience and future needs. Keynote lectures: ITA-AITES World Tunnel Congress, Prague, 33-50.
- RABCEWICZ, L. v. (1969). Stability of tunnels under rock load. Water Power, July, 266-273.
- ROTT, J., MAŠÍN, D. (2012): Stiffness anisotropy of clays in the very small strain range (in Czech), Geotechnika, No. 4, 23-31.
- SCA (1999): Introduction to Sprayed Concrete. Sprayed Concrete Association, Aldershot, UK.
- STRUBREITER, A. (1998): Wirtschaftlichkeitsvergleich von verschiedenen Spritzbetonverfahren im Tunnelbau. Diplomarbeit, University of Innsbruck.
- ŠUCHA, V. (2001): Íly v geologických procesoch. Acta geologica Universitatis Comenianae, Monografická séria, Bratislava.

TERZIJSKI, I. (2005): Betonové Prvky: Základy navrhování konstrukcí, zatížení, materiály. FAST: VUT Brno, 27-41.

THOMAS, A. (2003): Numerical modelling of sprayed concrete lined (SCL) tunnels. Ph.D. thesis, University of Southampton.

THOMAS, A. (2009): Sprayed concrete lined tunnels: an introduction. Taylor & Francis, New York.

WEIGLOVÁ, K (2005): Mechanika zemin. Akademické nakladatelství, Brno.

ZÍTKO, T., POŠTĚK, M. (2019a): Návrh tunelů metodou SCL na stavbě Brno – Přerov. Časopis české tunelářské asociace ITA-AITES, 28. ročník, č. 4, Praha, 14-20.

ZÍTKO, T., POŠTĚK, M. (2019b): Návrh železničních tunelů v jílech. Sborník příspěvků: Železniční mosty a tunely, 24. ročník konference, 1. vydání, Praha, 58-64.