

STŘÍKANÝ BETON V PODZEMNÍM STAVITELSTVÍ



Český tunelářský komitét ITA-AITES
Pracovní skupina pro stříkaný beton

EDICE: DOKUMENTY ČESKÉHO TUNELÁŘSKÉHO KOMITÉTU ITA-AITES

Svazek 3: **Stříkaný beton v podzemním stavitelství**

Vydání 1.

Hlavní autor: Ing. Matouš Hilar, MSc., Ph.D., CEng., MICE (D2 Consult Prague s. r. o.)

Spoluautoři: Ing. Václav Braun (Subterra a. s.)
Ing. Alexandr Butovič Ph.D. (Satra s. r. o.)
Doc. Ing. Vladislav Horák, CSc. (VUT – FAST)
Ing. Pavel Polák (Metrostav a. s.)
Ing. Petr Svoboda (D2 Consult Prague s. r. o.)
Doc. Ing. Karel Trtík, CSc. (FSv ČVUT)

Odborná redakce: Prof. Ing. Jiří Barták, DrSc. (FSv ČVUT)

Autoři fotografií: Ing. Matouš Hilar, MSc., Ph.D., CEng., MICE (D2 Consult Prague s. r. o.)
Ing. Petr Svoboda (D2 Consult Prague s. r. o.)
Archivy firem ČTuK (obr. 1, 3, 23, 31 a 41)

Vydal: Český tunelářský komitét ITA-AITES pro vlastní potřebu v roce 2008

V edici „Dokumenty ČTuK ITA-AITES“ vydává Český tunelářský komitét texty zaměřené na problematiku podzemních staveb. Jedná se o dokumenty zpracované pracovními skupinami ČTuK nebo převzaté ze zahraničí, především od mezinárodní tunelářské asociace ITA-AITES a jejích pracovních skupin (Working Groups) nebo od zahraničních národních komitétů ITA-AITES. Dokumenty mají charakter informací nebo doporučení a vycházejí ze současné světové úrovně znalostí a zkušeností v oboru podzemního stavitelství.

V edici dosud vyšlo:

Svazek 1: **Bezpečnost práce při výstavbě tunelů**

Svazek 2: **Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR**

Svazek 3: **Stříkaný beton v podzemním stavitelství**

Vydané svazky lze obdržet do vyčerpání zásob od sekretariátu ČTuK na adrese:



Český tunelářský komitét ITA-AITES

Dělnická 12

170 00 Praha 7

e-mail: ita-aites@metrostav.cz

ISBN 978-80-254-1262-6

STŘÍKANÝ BETON V PODZEMNÍM STAVITELSTVÍ



Český tunelářský komitét ITA-AITES
Pracovní skupina pro stříkaný beton

1.	Úvod	4
2.	Základní pojmy	6
3.	Historie	9
4.	Složky betonové směsi	13
4.1.	Cement	14
4.2.	Kamenivo	14
4.3.	Voda	16
4.4.	Příspěvky	16
4.5.	Příměsi	17
4.6.	Vlákna	17
5.	Návrh směsi pro stříkaný beton	18
6.	Statické výpočty ostění ze stříkaného betonu	22
7.	Způsoby nástřiku betonu	25
7.1.	Suchý způsob nástřiku betonu	26
7.2.	Mokrý způsob nástřiku betonu	27
8.	Porovnání technologií nástřiku	28
9.	Realizace nástřiku	32
9.1.	Základní informace	33
9.2.	Zásady správného nástřiku	38
9.3.	Personální certifikace operátorů trysky	40
10.	Požadavky na stříkaný beton	42
10.1.	Typy stříkaného betonu dle jeho funkce	43
10.2.	Třídy pevnosti stříkaného betonu	44
10.3.	Obory pevnosti mladého stříkaného betonu	45
10.4.	Druhy stříkaného betonu dle jeho vlastností	47
10.5.	Další vlastnosti stříkaného betonu a jejich zkoušení	47
10.6.	Jakost stříkaného betonu	48
11.	Kontrola kvality stříkaného betonu	49
11.1.	Druhy zkoušek	50
11.2.	Zkušební metody	51
12.	Strojní vybavení pro stříkaný beton	57
12.1.	Stříkácké stroje pro ruční nástřik suchou cestou	58
12.2.	Čerpadla pro nástřik mokrou cestou	58
12.3.	Manipulátory	58
12.4.	Strojní sestavy pro stříkaný beton	60
13.	Bezpečnost práce	62
14.	Možnosti využití stříkaného betonu	64
	Reference	67

1. ÚVOD



1. ÚVOD

V současné době je pro ražbu tunelů v ČR využívána především Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM). Hlavní zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR jsou popsány v publikaci vydané Českým tunelářským komitétem ITA-AITES (ČTuK 2006).

Stříkaný beton je hlavním materiálem primárního ostění při ražbách NRTM. Nastříkaná betonová vrstva společně s dalšími výztužnými prvky je ve většině případů nezbytná pro zajištění stability nevystrojeného výrubu. Vhodné složení betonové směsi a kvalitní nástřík betonu na líc výrubu jsou zcela zásadním předpokladem pro úspěšnou ražbu NRTM.

Kromě ražeb pomocí NRTM je stříkaný beton využíván jako hlavní konstrukční materiál pro dočasné zajištění výrubu i při ražbách pomocí ostatních konvenčních metod, v některých případech je využíván také při mechanizovaných ražbách pomocí tunelovacích strojů (TBM). Stříkaný beton je v některých případech využíván i jako konstrukční materiál definitivního ostění, což obecně přináší podstatné zvýšení nároků na kvalitu a zejména životnost nastříkaného betonu. Tento materiál je možné využít i pro další účely (zajištění stability svahů a stěn, sanace, atd.).

Cílem této publikace je popis základních vlastností a požadovaných parametrů stříkaného betonu především v souvislosti s využitím při NRTM. Podrobnější technické specifikace pro přípravu, aplikaci a kontrolu stříkaného betonu lze najít ve směrnici Zásady pro používání stříkaného betonu. Obě publikace byly připraveny v rámci činnosti pracovní skupiny Českého tunelářského komitétu ITA-AITES pro stříkaný beton, která se podílí na práci světové pracovní skupiny WG12 (Shotcrete Use). Informace o činnosti české pracovní skupiny lze nalézt na webové adrese www.ita-aites.cz pod složkou „pracovní skupiny“.

2. ZÁKLADNÍ POJMY



2. ZÁKLADNÍ POJMY

Betonová směs – směs složená z pojiva, kameniva a dalších látek připravená pro nástřik (tj. směs před vstupem do komory před tryskou).

- **Suchá betonová směs** – směs neobsahující vodu a urychlující přísadu, která je připravena pro nástřik suchou cestou.
- **Mokrý betonová směs** – směs předem smíchaná s vodou, která neobsahuje urychlující přísadu a je připravena pro nástřik mokrou cestou.

Přísady a příměsi – materiály, které se přidávají do betonu za účelem ovlivnění jeho vlastností.

- **Přísady** – hmoty, které upravují vlastnosti betonu. Jsou přidávány v poměru k množství cementu (v malém množství).
- **Příměsi** – hmoty přidávané do betonu za účelem zlepšení některých vlastností (např. hutnosti nebo pevnosti). Hmoty jsou obvykle přidávány v poměru k množství cementu (ve zřetelně větším množství nežli je tomu v případě přísad).

Stříkaný beton – beton, který je ukládán na podklad pomocí proudu stlačeného vzduchu, čímž vytváří hutnou homogenní vrstvu. Stříkaný beton zpravidla obsahuje přísady ovlivňující zpracovatelnost použité směsi a přísady urychlující proces hydratace. Může také obsahovat příměsi, případně ocelová nebo syntetická vlákna.

- **Nezhuťněný čerstvý stříkaný beton** – betonová směs po opuštění trysky před dopadem na podklad.
- **Zhuťněný čerstvý stříkaný beton** – betonová směs po dopadu na podklad.
- **Mladý stříkaný beton** – beton stárí do 24 hodin od okamžiku nástřiku.
- **Nezralý stříkaný beton** – beton stárí do 28 dní od okamžiku nástřiku.
- **Zralý stříkaný beton** – beton stárí 28 dní a více od okamžiku nástřiku.

Pozn.: Stříkaný beton pro primární ostění musí plnit statickou funkci již několik hodin po nástřiku. Proto stupeň zralosti musí v tomto okamžiku odpovídat předpokládanému zatížení.

Operátor trysky (nastříkávač) – pracovník, který obsluhuje trysku. Trysku lze ovládat ručně nebo pomocí dálkově ovládaného manipulátoru.

Spad – část objemu nezhuťněného čerstvého stříkaného betonu, která se neudržela na podkladu. Složení spadu je jiné než složení nezhuťněného stříkaného betonu, spad obsahuje vyšší podíl hrubých zrn kameniva, případně vyšší podíl ocelových vláken. Proto je i složení čerstvého zhuťněného betonu odlišné od čerstvého betonu nezhuťněného. Množství spadu by mělo být minimalizováno.

Stříkací tryska – koncovka, kterou opouští betonová směs zařízení pro nástřik. Při suchém nástřiku se v trysce přidává zpravidla roztok vody s tekutou urychlující přísadou. Při mokřím nástřiku se v trysce přidává stlačený vzduch a tekutá přísada nutná pro urychlení hydratace směsi.

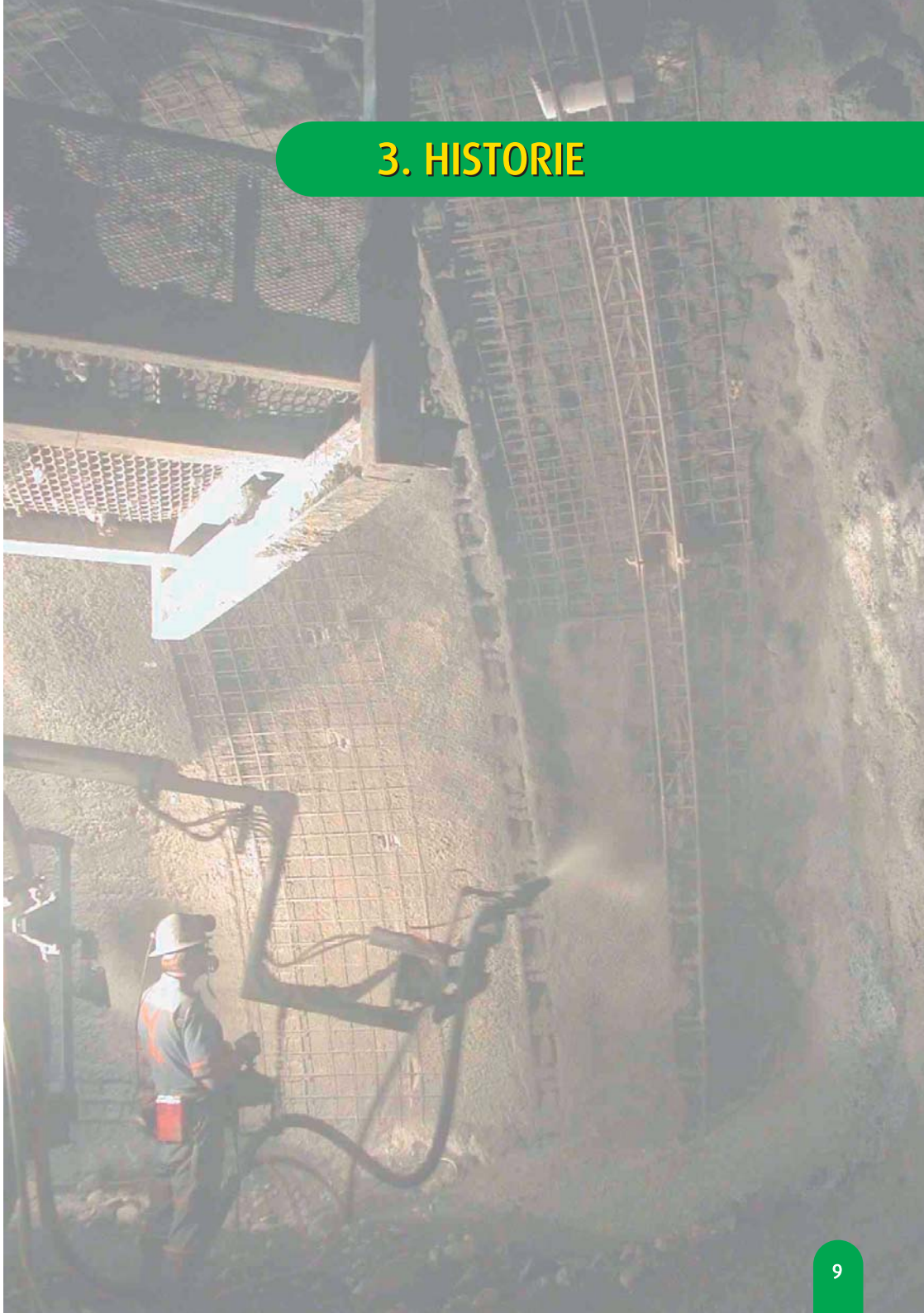
Mokrý způsob nástřiku (mokrý cesta) – technologie, při které se suchá betonová směs mísí s vodou před umístěním do čerpadla, kterým se následně ve stavu mokré betonové směsi dopravuje hadicemi do trysky. Stlačený vzduch a urychlující přísada jsou do směsi přidávány odděleně až v prostoru komory před tryskou.

Suchý způsob nástřiku (suchá cesta) – technologie, při které se voda do betonové směsi dostává až v prostoru komory před tryskou. Velmi často je součástí vody i urychlující přísada. Ze stříkacího stroje je suchá směs dopravována hadicemi proudem stlačeného vzduchu k trysce.

Zkoušky stříkaného betonu – souhrn testů, které ověřují kvalitu materiálu.

- **Průkazní zkoušky** – zkoušky, kterými se před začátkem výroby ověřuje složení nově vyráběného betonu, zda vyhovuje všem požadavkům na vlastnosti betonu.
- **Kontrolní zkoušky** (zkoušky pro hodnocení shody) – ověřují požadovanou kvalitu aplikovaného stříkaného betonu během stavby.

3. HISTORIE



3. HISTORIE

Počátek: Stříkaný beton je znám již od počátku 20. století. První zařízení pro nástřik suchých betonových směsí bylo sestrojeno v roce 1907 v USA. Firma Cement-Gun Company si následně nechala patentovat anglický název „Gunité“ (stříkaná malta). Původně používaná směs se skládala z jemného kameniva a měla vysoký obsah cementu. V současné době užívaný název „stříkaný beton“ je obecně používán pro každou směs zahrnující cement a kamenivo, která je nanášena nástřikem.

Mezníky vývoje: Zpočátku byla užívána pouze technologie nástřiku suchou cestou, použití technologie nástřiku mokrou cestou začalo až po 2. světové válce. Původně bylo stříkání suchých směsí převládající technologií, avšak v poslední době stále více převažuje nástřik mokrou cestou. Například ve Skandinávii došlo v sedmdesátých letech k úplnému přechodu z technologie nástřiku suchou cestou na technologii nástřiku mokrou cestou. Ve stejném časovém období začalo také docházet k přechodu od manuálního způsobu nástřiku (obr. 1) k automatickému stříkání pomocí manipulátorů (obr. 2). Od sedmdesátých let jsou také stále častěji přidávány do mokré směsi mikrosilika nebo vlákna. Dnes se provádí v celosvětovém měřítku přibližně 70 % všech stříkaných betonů technologií nástřiku mokrou cestou, v některých zemích však již nástřik mokrou cestou převažuje ještě výrazněji.



Obr. 1 Ruční způsob nástřiku



Obr. 2 Nástřik pomocí manipulátoru

Současný stav: Výrazný vývoj přirozeně prodělalo strojní vybavení pro realizaci nástřiku, stejně jako užívané přísady a příměsi či zkušební metody využívané pro ověření vlastností stříkaného betonu. Díky tomu se značně zvýšila kvalita výsledného produktu. Současná technologie již umožňuje vyrábět stříkané betony, jejichž výsledná pevnost v tlaku může přesahovat 80 MPa (Hilar a kol. 2006). Během vývoje bylo prokázáno, že je již možné vytvořit konstrukce ze stříkaného betonu, které splňují veškeré požadavky kladené na monolitický beton. Tento fakt umožnil využívat stříkaný beton i pro definitivní konstrukce s dlouhodobou životností.

Situace v ČR: Podle doložených zpráv byl v českých zemích použit stříkaný beton poprvé při sanaci cihelné klenby tunelu Krasíkov, která probíhala současně s přestavbou Třebovického tunelu v letech 1931–1932 (Stečinský 2003). Jako příklad rozsáhlejšího využití stříkaného betonu vyztuženého pomocí sítí a rámu lze uvést sanaci Sychrovského tunelu, která proběhla v letech 1969–1973 (obr. 3). NRTM začala být

v ČR využívána až po roce 1989, kdy v tuzemsku nastal značný rozmach výstavby podzemních staveb. Narůstající počet podzemních konstrukcí realizovaných pomocí NRTM přirozeně souvisel se značným nárůstem využití stříkaného betonu. Proto byly v roce 2003 pracovní skupinou ČTuK ITA-AITES pro stříkaný beton publikovány Zásady pro používání stříkaného betonu, které jsou v současné době praktickým nástrojem pro využívání stříkaného betonu v ČR.



Obr. 3 Sanace Sychrovského tunelu

Certifikace operátorů trysky: Na kvalitu výsledného produktu má vliv řada faktorů. Jedním z nejdůležitějších je způsob provedení nástřiku, což závisí zejména na dovednostech, znalostech a kázni operátora trysky. Proto je ve světě postupně zaváděna certifikace operátorů trysky, která formou praktických a teoretických testů ověřuje úroveň způsobilosti pracovníků. Od roku 2006 je zaváděna certifikace také v ČR.

4. SLOŽKY BETONOVÉ SMĚSI



4. SLOŽKY BETONOVÉ SMĚSI

4.1. Cement

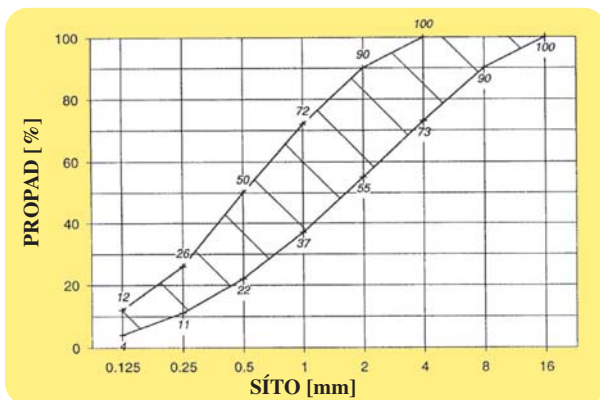
Cement slouží ve stříkaném betonu jako pojivo. Typ a množství použitého cementu má především vliv na pevnost a trvanlivost betonu. V ČR jsou pro stříkaný beton nejčastěji využívány portlandské cementy vyšších pevností (např. CEM I 42,5 R). Množství cementu je voleno obvykle mezi 370 až 430 kg na m³ betonu pro suchý proces a mezi 400 až 450 kg/m³ pro mokrý proces.

4.2. Kamenivo

Kamenivo slouží ve stříkaném betonu jako plnivo. Jako u všech speciálních druhů betonu je kvalita použitého kameniva betonu velmi důležitá. Z ekonomických důvodů je obecně nutné při návrhu receptury vycházet z dostupného kameniva, které je zatíženo minimalizovanými dopravními náklady. Při použití kameniva s velikostí zrn do 4 mm je produkt označován jako stříkaná cementová malta, při uplatnění frakcí kameniva nad 4 mm se používá název stříkaný beton. Dodržení křivky zrnitosti kameniva je velmi důležité, značný význam mají především obsah a vlastnosti jemných frakcí kameniva. Doporučené meze zrnitosti kameniva podle organizace EFNARC je uvedeno v tab. 1 a na obr. 4.

Tab. 1 Meze zrnitosti kameniva doporučené pro stříkaný beton

Síto	Minimum (%)	Maximum (%)
0,125	4	12
0,25	11	26
0,5	22	50
1	37	72
2	55	90
4	73	100
8	90	100
16	100	100



Obr. 4 Doporučené pásmo čáry zrnitosti kameniva pro stříkaný beton (EFNARC 1996)

4. Složky betonové směsi

Maximální velikost zrn: Podíl kameniva zrn nad 8 mm by neměl přesahovat 10 %. Větší zrna kameniva odpadají především při stříkání na tvrdé povrchy (počátek nástřiku) nebo vnikají do povrchové vrstvy již naneseného stříkaného betonu, kde způsobují poškození, které již není možné tímto materiálem vyplnit. Dále mohou větší zrna způsobit nežádoucí deformace či vibrace výztuže, ucpávání trysky a navíc jsou při odrazu nebezpečná pro přítomné pracovníky. Pro konstrukční stříkaný beton s ocelovou armaturou by velikost zrn neměla překračovat 10–12 mm.

Suchá směs: Pro suchou směs by mělo být používáno přírodní (nedrcené) kamenivo; drcené kamenivo způsobuje značné opotřebení stříkacího zařízení (hadice, tryska, těsnění). Důležitým aspektem suché směsi je přirozená vlhkost kameniva. Je-li směs příliš suchá, vzniká při stříkání příliš mnoho prachu. Je-li přirozená vlhkost příliš vysoká, může to vést k problémům (snížení průchodnosti a zacpávání stroje či hadic). Proto by se přirozená vlhkost směsi měla pohybovat mezi 3 až 5,5 %. Kromě směsi vyráběných přímo na místě či v blízké betonárně se stále více v posledních letech prosazuje používání předpřipravených suchých směsí dodávaných v pytlích nebo zásobnících. V takových případech musí být vlhkost kameniva prakticky nulová (kamenivo musí být tepelně vysušeno) vzhledem k dlouhodobému kontaktu kameniva s cementem a k možnému zahájení procesu hydratace.

Mokrý směs: Při mokřém stříkaném betonu je třeba sladit složení zrnitosti kameniva zejména s požadavky na čerpatelnost betonu. Příliš nízký podíl jemného kameniva vede k segregaci, špatné lubrikaci a k ucpávání zařízení. V případě stříkaného betonu s vlákny (obr. 5) je přebytek jemného kameniva důležitý pro čerpatelnost a dostatečné ztuhnutí. Vyšší podíl jemného kameniva též zlepšuje přilnavost stříkaného betonu k podkladu a umožňuje docílení vyšší hutnosti výsledného betonu v oblasti kontaktní spáry nově nanášené vrstvy a podkladu.



Obr. 5 Mokrý směs pro stříkaný beton s polypropylenovými vlákny

4.3. Voda

Poměr vody a cementu je jedním z nejdůležitějších faktorů pro konečnou kvalitu stříkaného betonu. Celkové množství vody, které je použito při technologii nástřiků suchou cestou, se skládá z vody přivedené k trysce a vlastní vlhkosti obsažené v kamenivu. Ve srovnání s technologií nástřiku mokrou cestou neexistuje u technologie nástřiků suchou cestou předem přesně daná hodnota poměru vody a cementu, protože množství přidávané vody je určováno obsluhou trysky. U příliš nízkého dávkování vody vzniká okamžitě nadměrná prašnost. V případě vysokého dávkování vody nedrží nástříkaný beton na svislém nebo převislém podkladu a stéká dolů. V případě správného dávkování kolísá vodní součinitel, tj. hodnota poměru vody a cementu, jen velmi málo a drží se pod 0,5. Zvětšení vodního součinitele nad 0,5 je technologicky vyloučeno s ohledem na stékání či opadávání nanesené směsi z ukloněných či převislých ploch. V extrémních případech je možné dosáhnout poměru vody a cementu až 0,4. Množství vody ve stříkaném betonu také může být účinně korigováno použitím některé z přísad upravujících zpracovatelnost čerstvého betonu.

4.4. Přísady

Urychlovače: Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí (urychlovače) jsou pro výrobu stříkaného betonu ve většině případů nezbytné. Tyto přísady zkracují dobu tuhnutí a tvrdnutí, což znamená rychlejší nárůst počáteční pevnosti. Proto mohou být prováděny nástřiky najednou v tloušťkách nad 10 cm a jednotlivé vrstvy mohou být nástříkány rychleji za sebou. U větších staveb přispívají urychlovače tuhnutí značnou měrou k zvýšení výkonů. V podzemním stavitelství je rychlý nárůst počáteční pevnosti stříkaného betonu základní podmínkou pro bezpečnou ražbu.

Přednostně jsou používány nealkalické urychlovače. Jejich použití oproti alkalickým urychlujícím přísadám poskytuje výhody pracovní-hygienické, ekologické i technologické. Navíc tyto urychlovače při obvyklém dávkování nevyvolávají výrazné snížení konečné pevnosti stříkaného betonu. Urychlující přísady musí být sladěny (ověření snášitelnosti) s používaným cementem z hlediska průběhu nárůstu pevnosti stříkaného betonu v tlaku a její hodnoty po 28 dnech (případně i dalších vlastností).

Urychlovače mohou být používány v práškové nebo tekuté formě. Práškové urychlovače jsou zpravidla přidávány do míchačky, ve které je připravována suchá směs kameniva a cementu před nasypáním do stříkacího stroje. Bohužel je poměrně často přidáván prášek urychlovače ručně, což znemožňuje jeho přesné dávkování. Tekuté urychlovače umožňují přesnější dávkování dávkovacím čerpadlem. Mají navíc i další přednosti, protože nezpůsobují vznik dráždivého prachu v ovzduší a nevzniká možnost předčasného tuhnutí.

V ČR se nejčastěji používají tekuté urychlovače přidávané v trysce. Urychlovače jsou dávkovány v závislosti na nastaveném výkonu čerpadla (mokrý způsob) nebo na výkonu použitého stříkacího stroje (suchý způsob). Pro dosažení potřebné kvality stříkaného betonu musí být urychlovač přidáván rovnoměrně. Množství urychlovače musí být nastavováno podle místních podmínek s ohledem na různé faktory (teplota směsi a vzduchu, zvodnění a sklon podkladu, tloušťka zhotovované vrstvy, stabilita výrubu, atd.). Doporučované hodnoty se obvykle pohybují mezi 5,5 a 8 % hmotnosti cementu.

Další přísady: Pro nástřik suchou cestou jsou někdy používány přísady pro snížení prašnosti, které se v praxi zatím příliš neosvědčily. Dále je možné použít vodní sklo, které zvyšuje vaznost a lepidlost stříkaného betonu. Použití vodního skla je možné jen ve výjimečných případech s ohledem na výrazné snížení konečné pevnosti betonu. Do stříkaného betonu aplikovaného mokřým způsobem lze při míchání betonové směsi přidávat plastifikační, ztekucující, zpovědující, případně i další vlastnosti upravující přísady. Účinnost přísad do stříkaného betonu a jejich vzájemnou snášenlivost (při více přísadách) je nutné prokázat ověřovacími laboratorními a případně i průkaznými zkouškami.

4.5. Příměsi

Mikrosilika: Mikrosilika je nejznámějším příkladem příměsí, používaných ve světě stále častěji do stříkaného betonu. Jedná se o jemnou látku s velkou plochou povrchu (20–35 m²/g) a s vysokým podílem SiO₂ (mezi 65 až 97 % hmotnosti – podle kvality výrobku). Použití mikrosiliky vede k výraznému zlepšení vlastností stříkaného betonu. Zejména se jedná o vyšší pevnost v tlaku a vyšší hutnost. Díky zvýšení soudržnosti a lepidlosti již ve stadiu namíchání betonové směsi mikrosilika umožňuje nástřik silnějších vrstev při srovnatelném množství urychlujících přísad. Při suchém způsobu nástřiku má mikrosilika ještě jeden zajímavý efekt. Při odpovídajícím způsobu přidání má použití mikrosiliky za následek snížení spadu až o 50 %. Mikrosilika může být dávkována buď jako suspenze, anebo v podobě práškové. Dávka pevných složek mikrosiliky se obvykle pohybuje od 2 do 8 % hmotnosti cementu.

Další příměsi: Dále je možné využít pro ovlivnění vlastností betonu polévatý popílek (jemnozrnčný anorganický pucofanový materiál, který je zachytávaný na elektrofiltrech). Popílek musí být bez jakýchkoli stop popelů (produktů procesu odsíření) a strusek. Také je někdy používána mletá vysokopeční struska (MGVS), což je jemně granulované latentní hydraulické pojivo. Případně lze použít i pigmenty pro volbu barevného odstínu.

4.6. Vlákna

Pro zlepšení vlastností stříkaného betonu mohou být použita ocelová nebo syntetická vlákna. Jejich hlavní přínos spočívá v omezení vzniku mikrotrhlin, snížení negativního efektu smršťování betonu a zvýšení odolnosti betonu např. vůči účinkům dynamického zatížení. Ocelová vlákna jsou buď přímá, nebo tvarovaná z drátu taženého za studena. Méně často se používají vlákna stříhaná z ocelového pásu. Nejčastěji se používají drátky o délce 25–35 mm. Drátky, které při dávkování mají tendenci k vytváření obtížně oddělitelných shluků (tzv. ježků), jsou pro použití ve stříkaném betonu nevhodné. Používání ocelových vláken při nástřiku suchou cestou není příliš obvyklé. Hlavním důvodem je především vysoký spad a nerovnoměrné rozptýlení drátků. Z nabídky syntetických vláken jsou nejčastěji používána vlákna polypropylenová, která významně zvyšují požární odolnost stříkaného betonu. Syntetická vlákna musí být dostatečně jemná, aby se rozmístila v betonu při použití běžných míchaček betonu a mohla být stříkána běžným stříkacím zařízením.

5. NÁVRH SMĚSI PRO STŘÍKANÝ BETON



5. NÁVRH SMĚSI PRO STŘÍKANÝ BETON

Specifikace předepsané směsi: Složení betonové směsi musí zaručit řadu vlastností betonu, ze kterých jsou nejdůležitější dosažení předepsaného průběhu pevnosti v tlaku bezprostředně po nástřiku (dle oboru) a po 28 dnech. Technické podmínky mohou specifikovat další požadavky jako:

- Zpracovatelnost a čerpatelnost
- Odolnost vůči účinkům agresivních (podzemních) vod
- Přílnavost k podkladu

Pro trvalé konstrukce lze dále specifikovat:

- Životnost
- Propustnost
- Schopnost přenášet zatížení po vzniku trhliny
- Dlouhodobou chemickou stabilitu
- Odolnost vůči chloridům

Předepsanou směs, která je podle zkušenosti vhodná pro plánované záměry, zajistí nebo navrhne zpravidla zhotovitel se souhlasem projektanta a předloží ji ke schválení zadavateli.

Specifikace předepsané směsi na 1 m^3 musí obsahovat následující údaje:

- Druh, třídu a množství cementu
- Druh a množství kameniva s dokladovanou čarou zrnitosti, vlhkostí a množstvím odplavitelných částic
- Druh a množství příměsí
- Množství vody – vodní součinitel (pouze u mokré směsi)
- Určení konzistence před aplikací (pouze u mokré směsi)
- Druh a množství přísad
- Druh a obsah vláken

Pro návrh betonové směsi je vhodné vycházet z objemové hmotnosti stříkaného betonu, která se pohybuje zpravidla v rozmezí 2150 až 2250 kg/m^3 (zjišťovaná například při kontrole na jádrových vývrtech). První návrh váhového složení směsi na 1 m^3 se proto doporučuje sestavovat ze složek, jejichž hmotnostní součet bez započtení hmotnosti vody a přísad je 2100 kg/m^3 .

Suchá směs s vysušeným kamenivem: Suchá směs se zpravidla míchá z vysušeného kameniva s rychlovažným cementem včetně eventuálního přidání příměsí a přísad v míchacím centru specializovaného výrobce. Maximální vnitřní vlhkost musí být menší než $0,2 \%$. Suchá směs se skladuje v uzavřených parotěsných originálních obalech a během přepravy se nesmí otevírat. Při dopravě suché směsi je třeba učinit případná opatření pro vyloučení segregace namíchané směsi během přepravy. Směs, která se rozsype při překládání, nebo se rozptýlí při činnosti stříkacího stroje, se nesmí použít.

Suchá směs s vlhkým kamenivem: Betonovou směs pro suchý způsob stříkání, ve které je použito zavlhklé kamenivo (kamenivo přirozené vlhkosti), lze zhotovit na betonárně nebo ve staveništní míchárně a je nutné ji bezprostředně dopravit k místu aplikace stříkaného betonu a neprodleně použít. Doba zpracovatelnosti směsi je značně závislá na druhu a dávkování pojiva, na obsahu vody v kamenivu, stejně jako na vnějších vlivech, zejména na teplotách směsi i okolního prostředí. Aby byla dosažena požadovaná kvalita stříkaného betonu, nesmí se přestoupit doba, ve které má být směs zpracována (zpravidla 1,5 hodiny od namíchání směsi). Proto musí být betonárna nebo míchací zařízení blízko od místa stříkání betonu. Vnitřní vlhkost veškerého kameniva ve směsi musí být v mezích 1,5–5,0 % (zpravidla od 2 do 4 %). Dodržování vlhkosti je důležité především při nižších výkonech stříkacích strojů, při kterých je vyšší nebezpečí ucpání dopravního vedení. Zpravidla je k tomu nutné zakrytí skládky kameniva proti vlivům počasí při skladování a namíchání směsi při dopravě. Při nižší vnitřní vlhkosti dochází k velkému vývinu prachu při stříkání. Směs, která se při manipulaci rozsype, nebo je rozfoukána stříkacím stojem, se nesmí znovu použít. Orientační složení suché betonové směsi je v tab. 2.

Tab. 2 Orientační složení betonové směsi pro nástřik 1 m³ suchou cestou

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

Mokrý směs: Technologie nástřiku mokrou cestou je technologií, která přináší výrazně lepší výsledky. Pro jejich dosažení je však nezbytné pracovat v prostředí s podstatně vyšší technologickou kázní. Výrobu i zpracování betonové směsi je třeba svěřit výrobcům s certifikací. Pro průkazní zkoušku i pro průběžné provádění stříkaného betonu musí být vyhotovovány dodací listy každé záměsi (uvedení množství cementu, frakcí kameniva, příměsí, přísad a vody). Údaje by měly být vyhodnoceny vůči předepsaným dávkám použitých komponentů (odchyly dávek). Současně by se měla zaznamenat teplota čerstvého betonu, údaje o době míchání a podle možnosti i statistické vyhodnocení výsledků. Při teplotách čerstvého betonu nad 20 °C může docházet k rychlejšímu zahájení procesu hydratace, v důsledku čehož může nastávat k ucpávání potrubí při čerpání. Doba zpracování by neměla překročit 1,5 hod. K prodloužení doby zpracovatelnosti je možné použít zpomalujících přísad různé účinnosti. Konzistence betonu potřebná pro mokré nástřiky závisí na druhu dopravy a na postupu nástřiku. Pro daný obsah cementu a daný vodní součinitel lze upravit konzistenci přidáním plastifikační nebo ztekucující přísady. Vyztužení stříkaného betonu vlákny se doporučuje provádět výhradně při mokrému způsobu stříkání. Tento druh vyztužení se navrhuje především na základě požadavku dosáhnout vlastností charakteristických pro stříkaný beton s vyztužením z vláken. Aby se dosáhlo potřebných vlastností, je nutné při různých typech

5. Návrh směsi pro stříkaný beton

vláken měnit jejich dávkování. Délka ocelových vláken by neměla přesáhnout 0,7 vnitřního průměru použitého potrubí nebo hadic, delší vlákna zvyšují riziko ucpávání. Orientační složení mokré betonové směsi je v tab. 3.

Tab. 3 Orientační složení betonové směsi pro nástřik 1 m³ mokrou cestou

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

6. STATICKÉ VÝPOČTY OSTĚNÍ ZE STŘÍKANÉHO BETONU



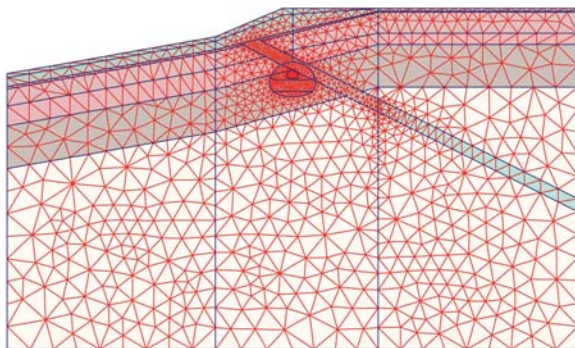
6. Statické výpočty ostění ze stříkaného betonu

Tunelové ostění ze stříkaného betonu je stavební konstrukcí, která je charakterizována některými skutečnostmi, které se u jiných stavebních konstrukcí vyskytují jen velmi vzácně. Těmito skutečnostmi jsou specifické zatížení, jeho proměnnost v čase, velmi časná vystavení konstrukce účinkům zatížení a v neposlední řadě i použití technologie nástřiku, kterou je tunelové ostění zhotoveno. Každá z těchto okolností má bezprostřední dopad na návrh a posouzení této konstrukce.

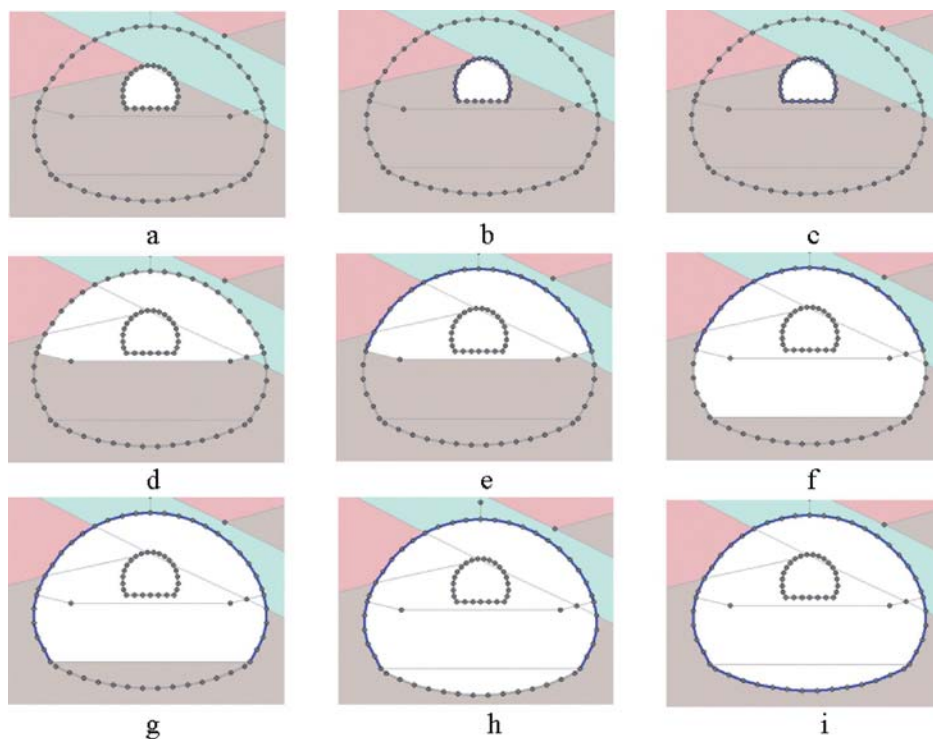
Konstrukce tunelového ostění je zatížena působením horninového masivu, který s konstrukcí bezprostředně sousedí. Horninový masiv se po velmi dlouhou dobu nacházel v ustáleném rovnovážném stavu napjatosti. Výstavba tunelu znamená narušení původního rovnovážného stavu, přeskupení napětí v horninovém masivu a vytvoření nového rovnovážného stavu mezi zatížením a reakcí ostění. Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM) využívá samonosných vlastností horninového masivu, ostění ze stříkaného betonu je zatíženo pouze částí tíhy nadloží, nad tunelem se vytvoří horninová klenba.

V současné době jsou výpočty primárního ostění ze stříkaného betonu zpravidla prováděny pomocí numerických metod pro výpočet kontinua (metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí, metoda hraničních prvků, metoda oddělených prvků). Z těchto metod je pro zmíněný účel většinou používána metoda konečných prvků (MKP). Vzhledem ke komplexnosti problému jsou statické výpočty primárního ostění ze stříkaného betonu značným zjednodušením skutečnosti. Proto je kromě kvalitních vstupních údajů velmi důležitá zkušenost statika (Thomas a kol. 2004).

Základní statické výpočty jsou zpravidla dvourozměrné (obr. 6). Pokles napjatosti horninového masivu v prostoru před čelbou a vytvoření horninové klenby nad tunelem je zpravidla simulováno pomocí tzv. relaxace: nevystrojený výrub je zatížen částí napjatosti horninového masivu, ostění je následně zatíženo zbytkem zatížení po přeskupení napjatosti v horninovém masivu. Do výpočtu je třeba zahrnout jednotlivé kroky výstavby, které mají vliv na napjatost horninového masivu (obr. 7). Tuhost primárního ostění v jednotlivých krocích by měla korespondovat s realitou.



Obr. 6 Ukázka sítě konečných prvků pro dvourozměrný výpočet



Obr. 7 Postupné kroky dvourozměrného výpočtu NRTM tunelu

Pro modelování ostění ze stříkaného betonu je zpravidla využíván lineárně pružný materiál, případně lze využít i jiné materiálové modely (Mohr-Coulomb, parabolické kritérium, atd.). Vliv výztuže na tuhost primárního ostění zpravidla při tvorbě numerického modelu zohledněn není. Při posouzení ostění ze stříkaného betonu v interakčním diagramu (porovnání vnitřních sil s kapacitou ostění) by měly být zahrnuty ocelové sítě, naopak ocelové příhradové rámy by do posouzení zahrnuty být neměly (nesplňují požadavky kladené na železobetonovou konstrukci).

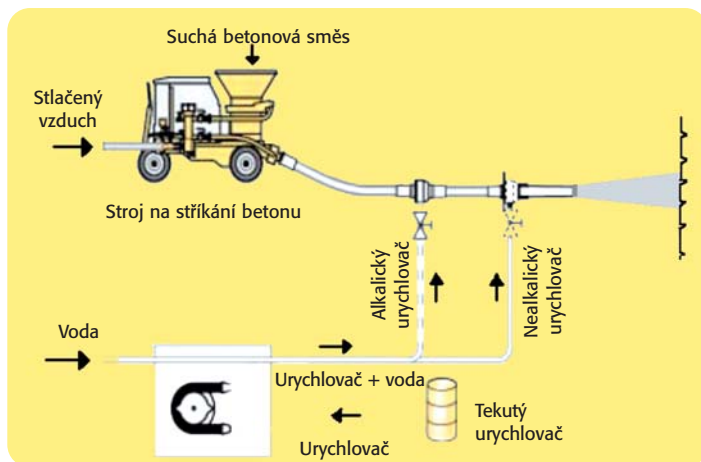
7. ZPŮSOBY NÁSTŘIKU BETONU



7. ZPŮSOBY NÁSTŘIKU BETONU

7.1. Suchý způsob nástřiku betonu

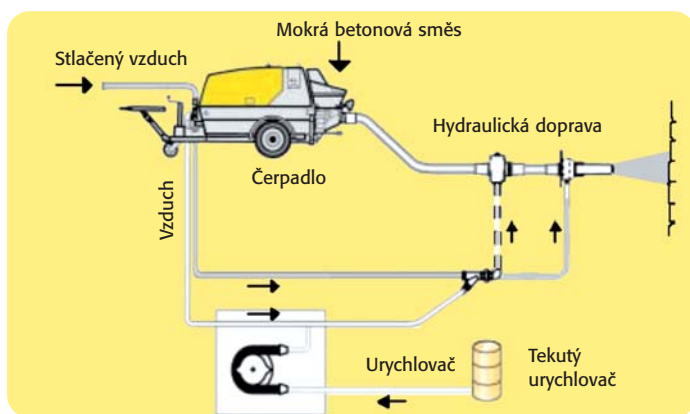
Betonová směs pro suchý způsob stříkání betonu se dopravuje stlačeným vzduchem (provzdušněným proudem) hadicí od stříkacího stroje k trysce, kde se mísí s vodou a nanáší se na podkladní plochu stříkáním (obr. 8). Směs pro suchý způsob nástřiku se dávkuje do proudu vzduchu zpravidla rotujícím válcem s komorami. Stříkací stroj musí zajistit rovnoměrný materiálový proud k trysce. Při provozu je třeba dbát na bezvadnou těsnost strojního zařízení (pro omezení vývinu prachu). Nespotřebované zbytky směsi a rozptýlené hmoty se musí průběžně odstraňovat. Stroj se musí řádně udržovat a čistit. Jako materiálové přírady slouží hadice nebo potrubí, které se mají vést přímo nebo oblouky co možno největších poloměrů. U spojů je třeba dbát na dokonalé těsnění. Materiálové přírady nemají mít pokud možno mezi stříkacím strojem a tryskou žádné změny průřezu. Tryska s přívodem vody musí být uspořádána tak, aby bylo zajištěno dobré promíchání vody se směsí a podle potřeby rovněž i urychlovače či jiných přísad. Voda se přivádí k trysce při dostačujícím tlaku vyšším než 4 bary hadicí nebo potrubím a její teplota by měla být v rozmezí od 8 do 50 °C. Dávkovací zařízení pro urychlující přísadu musí zajišťovat rovnoměrné přidávání stanoveného množství urychlovače, vztaženého k výkonu stříkacího stroje (tj. množství přepravované směsi) a tomu odpovídající hmotnosti zpracovaného cementu. Tekutý urychlovač se přidává kontinuálně do vody přiváděné k trysce dávkovacím čerpadlem. Dávkování se nastavuje na dávkovacím čerpadle. Pro zabezpečení rovnoměrného dávkování po dobu nasazení dávkovacího čerpadla na staveništi je třeba provádět pravidelnou údržbu, čištění a seřizování dávkovacího zařízení. Nasávání urychlovače ze zásobníku má být bez vzduchových bublin. Nasávání je třeba zabezpečit proti znečištění například sítkem. Před použitím urychlující přísady je vhodné zajistit její rovnoměrné promíchání. Stabilita tekutého urychlovače se uchová po dobu výrobcem udané využitelnosti, pokud se skladuje za teplot nad bodem mrazu.



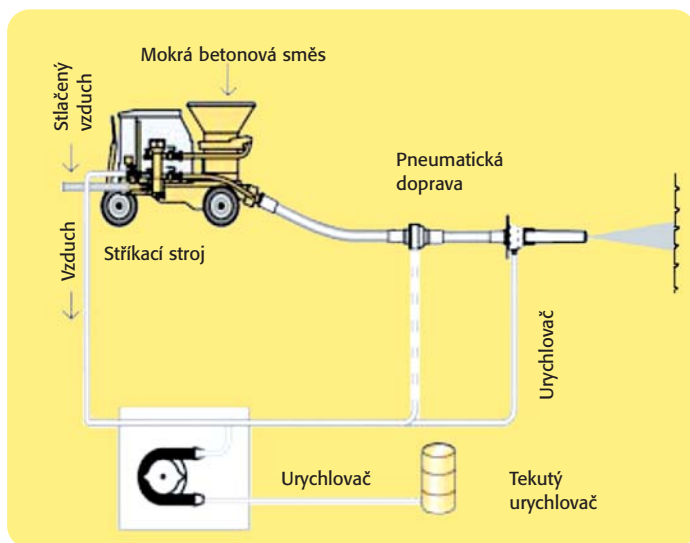
Obr. 8 Schéma suchého způsobu nástřiku betonu

7.2. Mokrý způsob nástřiku betonu

Mokrý způsob nástřiku se provádí buď hutným proudem (obr. 9) s pomocí upravených čerpadel na beton, které mají sníženou pulzaci při čerpání směsi, nebo řídkým (provzdušněným) proudem (obr. 10) ze stříkacího stroje, kde dopravním médiem je vzduch. Při použití čerpadla odpovídají materiálové přívody strojním potrubím používaným pro normální čerpaný beton. Přívody se vedou pokud možno přímo, počet spojů se minimalizuje. Při dopravě řídkým proudem v hadicích se smí používat pouze spojky silově přitlačené. Stříkací tryska musí být pro mokrý způsob nástřiku upravena. V případě použití čerpadel se v trysce přidává s urychlující přísadou také stlačený vzduch. Pro dávkování urychlující přísady (zpravidla ve formě suspenze) se přednostně užívají bezventilová dávkovací čerpadla (např. čerpadlo se stlačovanou hadicí).



Obr. 9 Schéma mokrého způsobu nástřiku betonu hutným proudem



Obr. 10 Schéma mokrého způsobu nástřiku betonu řídkým proudem

8. POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ NÁSTŘIKU

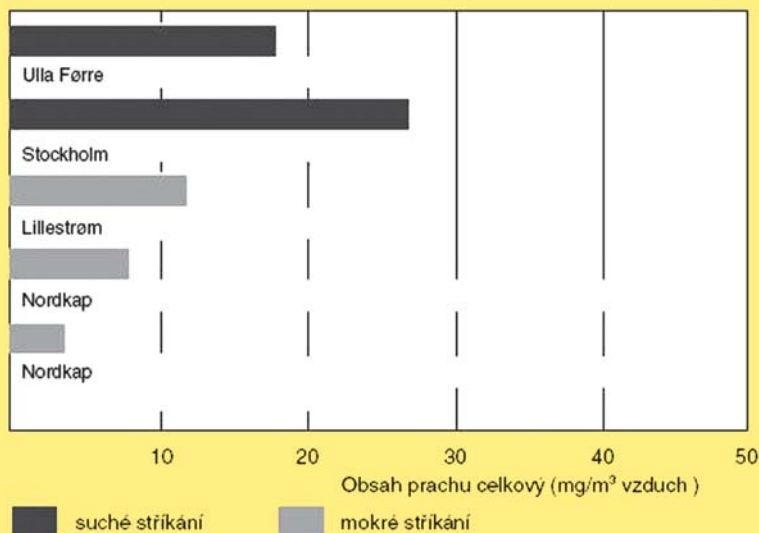


8. Porovnání technologií nástřiku

Zpracování: U technologie nástřiku mokrou cestou se používají směsi připravené v betonárně. Betonová směs pro nástřik je připravena stejným způsobem jako běžný monolitický beton. Poměr vody a cementu a tím i kvalitu směsi je možné zkontrolovat prakticky kdykoli. Konzistence může být upravována pomocí přísad. Proto je při nástřiku mokrou cestou jednodušší udržovat rovnoměrnou kvalitu. Připravená směs je z domíchávače lita do čerpadla a tlakem dopravována hadicí k trysce. Dříve byla používána šneková čerpadla, dnes již převládají čerpadla pístová.

Přednosti nástřiku mokrou cestou oproti nástřiku suchou cestou jsou následující:

- Kontrola dávkování vody (poměr vody a cementu je konstantní)
- Možnost dávkování tekutých přísad při míchání směsi
- Možnost rovnoměrného namíchání ocelových či syntetických vláken na betonárce
- Lepší přilnavost k povrchu
- Podstatně vyšší výkon nástřiku (což znamená zkrácení doby nástřiku)
- Lepší pracovní podmínky (viditelnost, dýchatelnost) vzhledem k nižší prašnosti (obr. 11)
- Možnost nástřiku silnějších vrstev (vzhledem k působení přísad)
- Nižší spad (ztráta je v rozmezí 5–15 %, u suché cesty v rozmezí 20–30 %)
- Vyšší pevnost v tlaku s velmi malým rozptylem výsledných hodnot



Obr. 11 Vliv způsobu nástřiku s různými urychlovači na prašnost (podle měření ze Skandinávie)

8. Porovnání technologií nástřiku

Nevýhody nástřiku mokrou cestou oproti nástřiku suchou cestou:

- Vyšší požadavky na kvalitu betonové směsi s ohledem na čerpatelnost a účinnost urychlovače
- Vyšší nároky na zpracování betonové směsi při přestávkách mezi dovozem jednotlivými domíchávači
- Menší dopravní vzdálenosti
- Vyšší náklady na přípravu a čištění zařízení
- Vyšší pořizovací náklady na aplikační zařízení
- Nižší mobilita
- Nižší účinnost při aplikaci na vlhké podklady
- Velmi obtížné zajištění možnosti déletrvajícího neplánovaného přerušení nástřiku, a tudíž vyšší nároky na organizaci práce a technologickou kázeň

Nástřik suchou cestou by se měl používat spíše výjimečně, především při malých objemech betonu (např. opravy) a ve speciálních případech (dlouhé dopravní vzdálenosti, časté přerušování práce, atd.).



Obr. 12 Nadměrná prašnost při nevhodném nastavení suchého způsobu nástřiku betonu

Pracovní podmínky: U technologie nástřiku suchou cestou je zejména hygienickým problémem vysoká prašnost, v některých případech se naměřené hodnoty obsahu prachových částic ve vzduchu pohybují daleko za přípustnými limity (obr. 12). Prašnost při mokřém nástřiku je výrazně nižší, což je velmi důležitý fakt z hlediska pracovních podmínek (podstatně lepší dýchatelost a viditelnost).

Kvalita: Jsou-li srovnávány výsledky dosažené technologiemi mokřého a suchého nástřiku, jsou výsledky dosažené při nástřiku za mokra lepší. Při snížení poměru vody k cementu a použití mikrosiliky lze v současnosti dosáhnout pevnosti stříkaného betonu v tlaku přesahující 80 MPa (Hilar a kol. 2005). Rovněž rozptyl dosažených výsledků je zřetelně příznivější (menší) než při nástřiku za sucha.

Cena: Obecně je průměrný denní výkon při mokřém způsobu nástřiku výrazně vyšší v porovnání se suchou cestou. Investiční náklady na nové stříkácí stroje pro nástřik mokrou cestou sice během vývoje velmi silně stouply, na druhou stranu klesla cena stříkaného betonu. Došlo ke zkrácení doby pro přípravu nástřiku. Díky současným mobilním stříkáčím strojům lze začít nástřik betonu několik minut po dopravení stříkáčeho zařízení na místo. Vzhledem k podstatnému zrychlení ražby tunelů narostla podstatně cena času realizace. Proto je snaha minimalizovat veškerý čas potřebný pro přípravu a vlastní nástřik betonu, což vede k upřednostňování mokřého způsobu nástřiku.

9. REALIZACE NÁSTŘIKU



9. REALIZACE NÁSTŘIKU

9.1. Základní informace

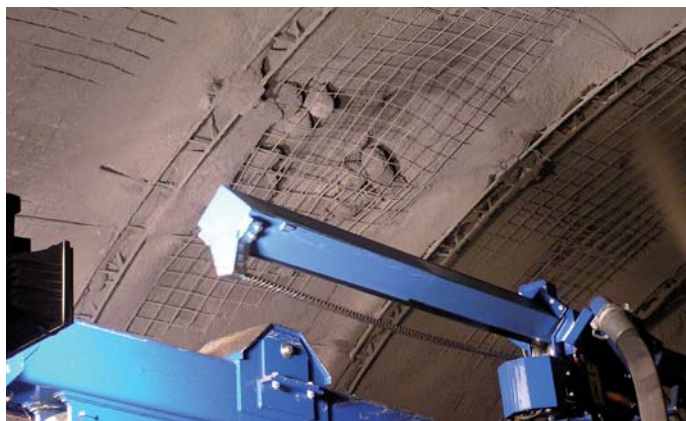
Požadavky: Pro provádění nástřiku musí být zpracován technologický postup podle konkrétních podmínek aplikace stříkaného betonu. Požaduje-li to objednatel, dokladuje se či provádí se pro zhotovení trvalých konstrukcí ze stříkaného betonu osobní certifikace operátora trysky (nastříkávače).

Úprava povrchu: Před započítím nástřiku se musí provést přípravné práce. Na nevystrojeném výrubu je třeba odstranit uvolněné a nekvalitní části horniny. Dále je třeba odvést větší průsaky vody pomocí drenážních kanálků, hadic nebo nopových fólií. Podle místních podmínek lze průsaky utěsnit pomocí pasty z rychle tuhnutího cementu nebo injektáží. Před nástřikem je v případě suchých a nasákavých hornin vhodné provést předvlhčení podkladu. Větší nadvýlomy ve výrubu či větší prohlubně musí být před standardním nanášením stříkaného betonu přednostně zastříkány.

Postup nástřiku: Nanášení je třeba provádět po vrstvách rovnoměrnými (rotačními) pohyby trysky, aniž by se přerušovala spojitost nanášení stříkaného betonu. Struktura betonu má být co nejhutnější, povrch uzavřený a má vykazovat pokud možno rovnoměrnou a plošně rovinnou skladbu (obr. 13). Při velkých tloušťkách stříkaného betonu (cca nad 150 mm) je nutno nanášet dvě nebo více vrstev, aby se zabránilo odpadávání čerstvého betonu vlastní hmotností (obr. 14). To platí zejména při nástřiku na klenbách a převislých plochách. Při delších časových přerušování nástřiku jednotlivých vrstev (více než 24 hodin) je potřebné při nárocích na vysokou přilnavost starou vrstvu stříkaného betonu očistit směsí tlakového vzduchu (obr. 15) a vody (obr. 16). Nástřik je nutné provádět odspodu nahoru, aby se vyloučilo zastříkávání napadaného spadu.



Obr. 13 Ukázka konstrukce po špatně provedeném nástřiku



*Obr. 14 Ukázka
odpadávání kusů
betonu při špatném
nástřiku*



*Obr. 15
Začišťování
odtěženého dna
tlakem vzduchu*



*Obr. 16
Začišťování
podkladu proudem
tlakové vody*

Vzdálenost a směr trysky: Vzhledem k přepravnímu výkonu a přepravní rychlosti proudu směsi (dané rychlostí a množstvím vzduchu) je třeba udržovat odstup stříkací trysky od podkladu ve vzdálenosti mezi 1,0 až 1,5 m (obr. 17). Úhel nástřiku, tj. úhel nasměrování trysky k ploše podkladu, musí být co nejkolmější (obr. 17). Zmenšení nebo překročení doporučeného odstupu trysky, stejně tak i šikmé odklonění trysky od podkladu, snižuje kvalitu zhutnění stříkaného betonu a zvyšuje spad.

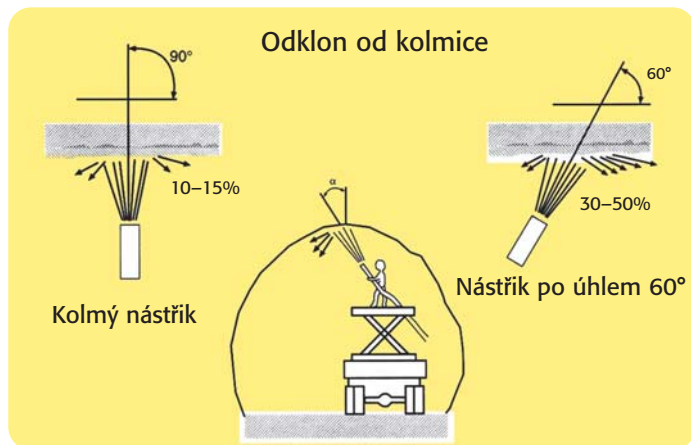


Obr. 17 Směr nástřiku a vzdálenost trysky

Dávkování cementu: Průkaznými zkouškami stanovené správné dávkování cementu a urychlující přísady se může mírně přizpůsobit místním podmínkám. To může být vyvoláno například polohou a stavem podkladu nástřiku, vlivem meziročního kolísání teploty, vlhkosti, vlivem výronů vody a vlivem změny geologických podmínek.

Spad: Vliv na množství spadu mají skladba směsi (velikost a tvar zrn kameniva, dávkování cementu a přísady), výstupní rychlost proudu z trysky, množství vzduchu (poměr vzduchu k betonové hmotě), tloušťka vrstvy nanášeného stříkaného betonu, vlastnosti podkladu a způsob vedení stříkací trysky (obr. 18). Nespotřebované zbytky směsi při delších přerušeních práce a spad se nesmějí pro stříkaný beton používat.

Výztuž: Výztuž a zabudovávané ocelové prvky musí být dostatečně upevněny tak, aby při nástřiku nedocházelo k jejich kmitání. Při zastříkávání výztuže i systémových ocelových prvků (jako ocelových příhradových oblouků, ocelových profilů, styčných plechů, trubek apod.) nelze vyloučit vznik stínů ve stříkaném betonu. Odborným vedením trysky lze však tyto stíny podstatně omezit. Zvláštní pozornost je nutné věnovat předepsanému přesahu výztužných sítí, které je nutné (s ohledem na zmenšení vzniku stínů za překrytými sítěmi o zmenšeném rastru) osazovat v zákrytu. Pokud se má



Obr. 18 Vliv úhlu nástřiku na množství spadu

provést výztuž ve dvou a více vrstvách (např. vnější a vnitřní výztužná síť), smí se druhá vrstva výztuže osadit teprve tehdy, když je první vrstva zastříkána (obr. 19).



Obr. 19 Ocelové sítě před provedením nástřiku

Teplota: Nízké teploty podkladních ploch nástřiku (např. zmrzlá hornina, zemina nebo led) vyžadují zvětšení tloušťky stříkaného betonu (minimálně o 3 cm). Zpracování stříkaného betonu při teplotách vzduchu a podkladu nižších než +5 °C vyžaduje doplňující opatření. Minimální teplota betonové směsi se za těchto podmínek doporučuje +15 °C. Jako účinná opatření se hodí ohřívání přídavné vody až do maxima 50 °C (na betonárně či vody před tryskou) nebo zahřívání kameniva případně i směsi. Ochrana proti mrazu je nutná do doby, než stříkaný beton dosáhne pevnosti v tlaku 5 MPa.

Ošetření: Ošetření betonu po nastřikání je potřebné, pouze pokud jsou požadovány zvláštní vlastnosti (např. stříkaný beton pro trvalé konstrukční účely, pro opravy a zesilování konstrukcí, stříkaný beton v tenkých vrstvách), nebo v případě zvláštních okolností (silné vysušování). V takových případech se stříkaný beton musí ošetřovat způsobem, který zajišťuje nepřerušovanou hydrataci cementu v době jeho tuhnutí a tvrdnutí. V případě potřeby se obvykle povrchy stříkaného betonu udržují vlhké nepřímo s pomocí dostatečně máčeného krytu nebo se postříkují ošetřovacím prostředkem. Ošetřovací přípravky, které poškozují přilnavost, se nesmí používat v případě, že se nanáší další vrstva stříkaného betonu.

Nástřik pomocí manipulátoru: Nanášení betonu mokřým způsobem se provádí zpravidla pomocí dálkově řízeného stříkacího ramene (manipulátoru), protože v důsledku velké hmotnosti hutného proudu dopravovaného čerstvého betonu a těžkého stříkacího vybavení ruční obsluha řízení trysky není možná. Mechanická ramena umožňují při použití větších průměrů přívodů a strojů s vysokým výkonem také vyšší produktivitu stříkání, zejména pokud jsou připraveny dostatečně velké souvislé plochy pro nástřik. Odstup trysky a směr trysky jakož i rychlost přísunu směsi mohou být optimalizovány nastříkávácem pro jakýkoli případ použití. Operátor trysky se



Obr. 20 Pozice operátora trysky při využití manipulátoru

pohybuje stranou od nástřikávané plochy (obr. 20) a tím i mimo přímý prostor odráženého spadu a vlivu prachu. Zaujímá místo podle typu stroje v řídicím stanovišti manipulátoru nebo se volně pohybuje s řídicím modulem po pracovišti. Tím je pro operátora zaručena vyšší pracovní hygiena a bezpečnost. Dálkové ovládání (obr. 21) zajišťuje vyšší bezpečnost obsluhy zvláště v nestabilních horninových podmínkách. Příliš velký odstup operátora (tj. horší dohled na plochu nástřiku) a vysoký výkon při nástřiku mohou vést k plošně zvlněnému povrchu a výrazněji nerovnoměrné tloušťce stříkaného betonu.



Obr. 21 Dálkové ovládání manipulátoru

9.2 Zásady správného nástřiku

Ocelová výztužná síť by měla být připravena pro nástřik tak, aby bylo zamezeno jejím vibracím, ve správné poloze, se správným překrytím stykovaných sítí. Ústí trysky by mělo být ve vzdálenosti 1,0 až 1,5 m od plochy podkladu. Směr nástřiku by měl být kolmý na plochu podkladu při zachování krouživého pohybu trysky. Nastavení rychlosti vzduchu vystupujícího z trysky by mělo umožňovat provádění nástřiku na doporučenou vzdálenost. U suchého způsobu nástřiku by nastavení množství vzduchu vystupujícího z trysky mělo být v relaci s množstvím dopravované směsi, vlhkostí

betonové směsi a také s délkou vedení hadic (seřízení spodního vzduchu na stříkacím stroji). Při provádění nástřiku suchým způsobem by mělo být nastavení ovládacího ventilu vodního roztoku s urychlující přísadou takové, aby beton vykazoval matný lesk (bez vodního filmu na povrchu, ale také bez velkého spadu). Nástřik by měl být zahájen zastříkáním patních částí na délku záběru do výšky minimálně 0,5 m (stabilizace polohy zaměřených ráků). Následně by měly být vyplněny největší nadvýlomy v klenbě (obr. 22). Další nástřik pokračuje ve standardním postupu odspoda vzhůru. Při nástřiku je nutné dodržení symetrie nanášení po obvodě profilu (s minimálním členěním – např. levý bok, pravý bok, levá kosá, pravá kosá, levá klenba, pravá klenba).



Obr. 22 Vyplňování nadvýlomů stříkaným betonem

Stříkaný beton u ukloněných (nepřevíslých) a svislých ploch (boky výrubu) by měl být nanášen postupně odspoda nahoru na potřebnou tloušťku (maximálně však v tloušťce 20 cm najednou). Stříkaný beton u převíslých ploch (kosé) a klenb by měl být nanášen nejdříve na nově osazený výztužný rám, následně by měly být mezi sousedními ráky tvořeny klenbičky o maximální tloušťce vrstvy 10 cm. V partiích s hustou výztuží by měla být vedena tryska bez rotace se střídavým mírným bočním náklonem pro eliminaci vzniku dutin za výztuží. Při nástřiku zpravidla druhé (poslední) vrstvy

primárního ostění by měl být kladen důraz na zajištění hladkého povrchu vhodného pro osazení mezilehlé izolace. Při nástřiku vrstev primárního ostění manipulátorem mokrou cestou se používá nejvyšší nastavený výkon stroje 10 m³/hod. Na boky výrubu je vhodné stříkat s vyšším výkonem cca 16 až 20 m³/hod. a s nižším dávkováním urychlující přísady. Do klenby se doporučuje snížení výkonu stroje na rozmezí 10 až 15 m³/hod. a zvýšení dávkování urychlující přísady. Úpravy v dávkování jsou možné jen v takovém rozpětí, jež je povoleno či vymezeno ověřovacími zkouškami, které v celém rozsahu prokázají splnění všech specifikovaných vlastností stříkaného betonu (pevnost betonu v tlaku, nárůst pevnosti mladého betonu, atd.).

Při nástřiku by měl být sledován stav vystupujícího nástřikávaného kužele betonové směsi. Při jakékoli nepravidelnosti, nerovnoměrném zvlhčování suché směsi či při projevech pouze částečného zapracování urychlovače ve spektru kužele směsi by měl být ukončen nástřik a měla by být zkontrolována čistota směřovacích kanálků v trysce (případně i průchodnost všech dalších zásobovacích hadic vedoucích k trysce). Vedení dopravních hadic pro betonovou směs k trysce by mělo být pokud možno přímé, ohyby by měly mít co největší poloměr. Přírodní hadice by měly být těsné a neměly by vykazovat úniky. Podrobnější pokyny pro operátora trysky lze nalézt v literatuře (např. Polák, Mika 2004).

9.3 Personální certifikace operátorů trysky

Důvody: Hutnost a homogenita stříkaného betonu jsou kromě správného návrhu receptury namíchané směsi závislé zejména na způsobu a postupu nanášení na podklad či na předchozí vrstvu stříkaného betonu (obr. 23). Tato fáze, kdy ukládání a hutnění směsi se děje v jediném nevratném okamžiku při dopadu betonu vysokou rychlostí na podklad, je zásadně ovlivněna lidským faktorem, tj. řízením a rozhodováním operátora trysky – nástřikáče. Vzhledem k tomu, že úplná náhrada člověka plně automatizovaným nanášením stříkaného betonu se nedá v nejbližší budoucnosti předpokládat, je zvyšování teoretické i praktické kvalifikace operátora trysky cestou, jak se k dosažení a udržení projektované kvality konstrukce ze stříkaného betonu co nejvíce přiblížit. Zajištění kvality nástřiku je především důležité pro konstrukce ze stříkaného betonu, které jsou trvalé (sekundární ostění ze stříkaného betonu, jednoplášťová ostění ze stříkaného betonu). Nutnost zajištění požadované životnosti trvalých konstrukcí vede k značnému zvýšení nároků na kvalitu stříkaného betonu.

Certifikace: Certifikace operátorů trysky sestává z teoretické přípravy a praktického ověření dovedností a znalostí pracovníků provádějících nástřik betonu. Během přípravy jsou pracovníci školeni formou přednášek, případně i praktických ukázek a instruktáží. Následně jsou dovednosti a znalosti pracovníků ověřeny. Při testování pracovníků je především kladen důraz na praktické dovednosti (dodržování zásad, zručnost, spolupráce s obsluhou čerpadla či stříkacího stroje, množství spadu, kvalita výsledného produktu, atd.). Praktická kvalifikace bývá ověřována nástřikem na výrub (stěny, strop) a nástřikem do zkušebních forem. V některých případech jsou ověřovány



Obr. 23 Vliv způsobu nástřiku na kvalitu ostění (betony zhotoveny ze stejné betonové směsi za stejných podmínek různými operátory trysky)

i teoretické znalosti o stříkaném betonu (složení, vliv jednotlivých složek, způsoby nástřiku, druhy zkoušek, obsluha a údržba strojního zařízení, atd.).

Situace v zahraničí: V současné době je certifikace používána v USA (program ACI/ASA). Jedná se však pouze o certifikaci pro suchý způsob nástřiku. V Evropě jsou využívány lokálně různé programy (např. program britské firmy Morgan=Est: certifikace pro nástřik jednovrstevných ostění tunelů realizovaných metodou LaserShell /Hilar a kol. 2005/; program Veidekke; program norské betonářské společnosti, atd.). Skupina EFNARC (Evropská federace výrobců a uživatelů speciálních produktů pro konstrukce) připravuje certifikaci operátorů trysky pro nástřik pomocí manipulátoru mokrou cestou, která by měla sjednotit certifikace v Evropě. Dokumentace pro certifikaci EFNARC je nyní již dokončena (135 stran). Očekává se, že program EFNARC bude v budoucnu přijat národními i mezinárodními organizacemi.

Situace v ČR: Iniciátorem zavádění personální certifikace operátorů trysky v ČR je pracovní skupina pro stříkaný beton při ČTuK ITA-AITES. Pracovní skupina pro stříkaný beton připravila podklady pro ověření praktických i teoretických znalostí operátorů trysky. Program certifikace byl připraven v souladu s potřebami podzemního stavitelství v ČR. Teoretické zkoušky se skládají z teorie provádění SB a z otázek souvisejících s obsluhou a údržbou strojního zařízení. Maximální výše ohodnocení z teoretické zkoušky je 40 bodů. Praktická zkouška se skládá z nástřiku do zkušební formy a z předvedení nástřiku primárního ostění tunelu. Maximální výše ohodnocení z praktické zkoušky je 60 bodů. Uchazeč vyhoví, pokud získá v součtu více než 70 bodů (ze 100 možných) a přitom z praktického provádění více než 40 bodů. První cyklus zkoušek proběhl v ČR v roce 2006.

10. POŽADAVKY NA STŘÍKANÝ BETON



10. POŽADAVKY NA STŘÍKANÝ BETON

10.1. Typy stříkaného betonu podle jeho funkce

Kvalitativní vlastnosti stříkaného betonu jsou definovány pomocí tříd stříkaného betonu a dalších vlastností. Požadované vlastnosti se specifikují v projektové dokumentaci popisem v technické zprávě a příslušným vyznačením v prováděcích výkresech. Různé typy stříkaného betonu zohledňují účel použití stříkaného betonu i jeho úlohu v konstrukci. Pro jednotlivé typy stříkaného betonu jsou rozdílné požadavky na počáteční pevnost, homogenitu, hutnost stříkaného betonu a z ní odvozené další vlastnosti (např. zvýšená vodotěsnost, mrazuvdornost, atd.). Podle výsledné kvality stříkaného betonu se odlišují i požadavky na jeho zkoušení.

Stříkaný beton bez konstrukční funkce (SB I): Tento typ stříkaného betonu slouží především jako výplňový materiál (obr. 24). Lze ho použít pro úpravy vnitřního líce ostění (např. jako vyrovnávací vrstvu pod fóliovou izolací), pro výplně dutin v horninovém masivu (puklin, nadvýmů) nebo pro uzavření povrchu horniny (např. ochránění povrchu horniny proti vzdušné vlhkosti). Zpravidla se udávají pouze minimální požadavky na kvalitativní vlastnosti tohoto betonu.



Obr. 24 Nástřik betonu SB I pro vyrovnání povrchu pod izolací

Stříkaný beton s konstrukční funkcí (SB II): Úloha tohoto typu stříkaného betonu spočívá všeobecně ve funkci zabezpečovací a podpůrné. Používá se zejména pro primární ostění podzemních staveb ražených pomocí NRTM (obr. 25), pro stabilizaci čelby ražených staveb, ale i pro zajištění stěn stavebních jam nebo přírodních svahů. U tohoto stříkaného betonu je třeba určit požadavky na nárůst pevnosti mladého a nezralého betonu. Vývoj pevnosti je vymezen oborem J1 až J3, kdy je třeba uvážit stupeň přetížení v příslušném stáří stříkaného betonu a při použití alkalických urychlovačů také vliv na

snížení konečné pevnosti. Konstrukce a způsob realizace musí být navrhovány tak, aby byla zajištěna co možná nejhutnější struktura stříkaného betonu. Místní nehomogennost tohoto typu stříkaného betonu (např. dutiny za příhradovými rámy) je možné vhodným nástřikem minimalizovat, nicméně je nelze zcela vyloučit.



*Obr. 25 SB II
využitý pro
primární ostění*

Stříkaný beton se zvláštní konstrukční funkcí (SB III): Tento stříkaný beton má trvalou statickou funkci, např. v případě sekundárního ostění ze stříkaného betonu nebo v případě jednovrstvého ostění (obr. 26). Kromě třídy stříkaného betonu je třeba specifikovat další zvláštní požadavky. Při určování oboru (J1, J2 nebo J3) je třeba uvážit stupeň přitížení v příslušném stáří stříkaného betonu. Požadavky na pevnost je tedy třeba přizpůsobit časovému průběhu zatěžování. Pro tento stříkaný beton se požadují zpravidla zvláštní nároky na hutnou a homogenní skladbu stříkaného betonu zvláště s ohledem na jeho trvanlivost. Proto je pro tuto funkci velmi často využíván stříkaný beton vyztužený ocelovými vlákny bez sítí a příhradových rámců, aby bylo riziko vzniku dutin minimalizováno. Je nutné používat nealkalické urychlovače tuhnutí. Bezprostřední nástřik tohoto betonu na plochy se silným přítokem vody nelze provádět, přítoky vody je třeba minimalizovat (např. předběžný těsnící nástřik, odvedení vody drenážemi atd.). Dále je třeba důsledně ověřovat kvalitu betonu prováděním veškerých předepsaných zkoušek v odpovídající četnosti.

10.2. Třídy pevnosti stříkaného betonu

Stříkaný beton se zařazuje do pevnostních tříd analogicky jako monolitický beton. Pro klasifikaci je použita charakteristická pevnost betonu v tlaku. Třída pevnosti se zpravidla vztahuje ke stáří 28 dní, nicméně je možné požadovat zkoušení mladého betonu (beton do 24 hodin po aplikaci) nebo nezralého betonu stáří 3 nebo 7 dní.



*Obr. 26 SB III
využitý pro trvalé
jednoplášťové ostění*

Pevnosti uvedené za značkou stříkaného betonu (SB), by měly být převáděny na hodnotu krychelné pevnosti a měly by být stanoveny v souladu s třídami pevnosti betonu dle normy ČSN EN 206-1. Ke třídám pevnosti je možné stanovit požadavky na pevnost v určitém čase (stáří). Hodnoty uvedené v tab. 4 jsou průměrné hodnoty minimálně ze 3 vzorků zkušenských po 28 dnech.

Tab. 4 Třídy pevnosti stříkaného betonu

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

10.3. Obory pevnosti mladého stříkaného betonu

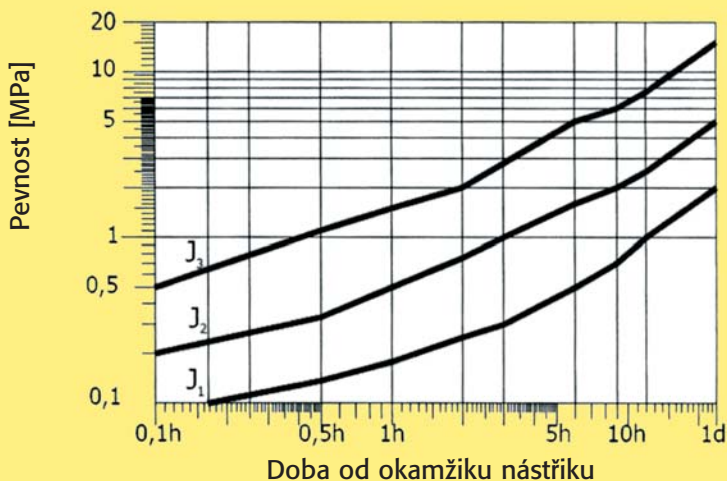
Mladý stříkaný beton je stříkaný beton do stáří 24 hodin po nástřiku. Z hlediska nárůstu pevnosti a požadavků na pevnost se dělí mladý beton do oborů J1, J2, J3 (tab. 5, obr. 27). Nárůst pevnosti v prvních minutách po nástřiku má velký vliv na množství spadu, zejména při nástřiku vrstvy větší tloušťky najednou či nástřiku na převislé podkladní plochy. Naopak při příliš rychlém nárůstu pevnosti stříkaný beton bezprostředně po nanesení na stěnu ztvrdne a hrubší částice v proudu následujícího stříkaného betonu se již nemohou uložít a odrazí se. Při silném přítoku vody nebo při nestabilním podkladu je vyšší pevnost v prvních minutách potřebná, je však nutno počítat krátkodobě se zvýšenou prašností a vyšším odrazem spadu. Nárůst pevnosti mladého betonu do hodnoty 1 MPa se

10. Požadavky na stříkaný beton

zjišťuje penetrační jehlou. Doby měření a postup zkoušení je třeba přizpůsobit nárůstu pevnosti aplikovaného stříkaného betonu. Zpravidla se prokazuje průběh od 6 minut do 6 hodin a pevnost po 24 hodinách. Průkaz pevnosti po 9 a 12 hodinách je potřebný jen ve zvláštních případech (např. u mělkých tunelů při bezprostředním zatížení celým nadložím).

Tab. 5 Předepsané pevnosti v tlaku mladého stříkaného betonu pro jednotlivé obory (MPa)

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



Obr. 27 Obory nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu v tlaku

Stříkaný beton oboru J1 (hodnoty mezi čárami J1 a J2 na obr. 27) se hodí pro nástřik v tenkých vrstvách na suchý podklad bez zvláštních statických požadavků v prvních hodinách po nástřiku. Je výhodný pro malou prašnost a malý spad.

Stříkaný beton oboru J2 (hodnoty mezi čárami J2 a J3) je vhodný, pokud má být beton nanesen co nejrychleji v silných vrstvách (i nad hlavou), při přítocích podzemní vody a při následném působení bezprostředně navazujících pracovních kroků (např. u ražených staveb realizace kotevních vrtů, zahánění pažin, jehlování, trhací práce atd.). Tento obor je vyžadován také při rychlém nárůstu zatížení hordinovým tlakem nebo při působení přitížení.

10. Požadavky na stříkaný beton

Stříkaný beton oboru J3 (hodnoty nad čarou J3) se má používat pouze ve zvláštních případech (např. v silně porušené hornině, při silném přítoku vody) vzhledem ke zvýšenému vývinu prachu a zvýšenému spadu. Vysoké počáteční pevnosti vedou při použití alkalických urychlujících přísad ke značnému poklesu konečné pevnosti oproti nulovému betonu (tj. betonu bez urychlovače), proto je nutné v tomto oboru používat výhradně urychlovače nealkalické.

Zmíněné aspekty je třeba zvážit při stanovování třídy pevnosti. V důsledku silného ovlivňování pevnosti v dalším nárůstu pevnosti se má předepisovat v oboru J2 použití alkalických urychlovačů jen ve zvláštních případech. Při nealkalických urychlovačích nenastává pro obory J1 až J3 žádné podstatné snížení konečné pevnosti.

10.4. Druhy stříkaného betonu podle jeho vlastností

Druh stříkaného betonu je stanoven souborem jeho kvalitativních vlastností, které jsou specifikovány v projektové dokumentaci a musí být prokázány. Pro označení lze užívat zkratky podle tab. 6. Dalšími kvalitativními vlastnostmi jsou například pevnost v tlaku stříkaného betonu v průběhu 1 až 28 dnů, pevnost v příčném tahu, smyková pevnost, modul přetvárnosti, modul pružnosti (s časovým průběhem) a přilnavost stříkaného betonu k podkladu.

Tab. 6 Nejčastější příklady druhů stříkaného betonu

Účel	Označení betonu
SB pro primární ostění tunelu	SB 25 / typ II / obor J2
SB podkladní vrstvy pod fóliovou izolaci	SB 15 / typ I / zrno max. 4 mm
SB pro menší opravy betonových konstrukcí v podzemí	SB 30 / typ III / zrno max. 4 mm
SB pro jednoplášťová a sekundární ostění	SB 30 / typ III / obor J2

10.5. Další vlastnosti stříkaného betonu a jejich zkoušení

Odolnost proti průsaku vody: Požadavky na odolnost proti průsaku vody (vodonepropustnost) stříkaného betonu jsou uplatňovány s ohledem na polohu hladiny vody, dle rozměrů konstrukce a dle její statické funkce. Průkaz odolnosti vůči průsaku vody se prokazuje na pevném vyztuženém odvrtném jádru ze stříkaného betonu a posuzuje se podle norem platných pro standardní monolitický beton. Je-li požadována odolnost stříkaného betonu proti průsaku vody, nesmí maximální hodnota penetrace vody překročit 50 mm. Alternativně lze vodotěsnost stanovit měřením propustnosti působením vody. Stříkaný beton je považován za vodotěsný, jestliže součinitel propustnosti je menší než 10–12 m/s. Požadavek na plnou vodonepropustnost stříkaného betonu konstrukcí s dočasnou statickou funkcí (např. primární ostění podzemních staveb) je nevhodný z hlediska nutnosti dimenzování konstrukce na plný hydrostatický tlak podzemní vody a z toho plynoucí výrazné navýšení ceny stavby. Dále je možné stanovit požadavky na plynonepropustnost; požadované vlastnosti pak musí být potvrzeny při průkazných zkouškách.

Mrazuvzdornost: U stříkaného betonu, vystaveného vlivu mrznutí a rozmrzávání při mírném nasycení vodou bez soli (tj. XF1) zpravidla není třeba provádět kontrolní zkoušky. Stříkaný beton vystavený agresivnějšímu prostředí (tj. XF2, XF3, XF4) musí splňovat požadavky na mrazuvzdornost a odolnost proti odlupování povrchu, která se zkouší bez slané vody nebo se slanou vodou (dle klasifikace expoziční).

Odolnost proti chemické agresivitě: Takový stříkaný beton musí mít především zvýšenou vodonepropustnost. Při chemické agresivitě je třeba hloubku prosáknutí při zkoušce vodonepropustnosti snížit na 30 mm. Při zvýšené agresivitě je navíc třeba použít vhodné cementy (např. síranovzdorný cement) a případně i přísady. Při silných kyselých přítocích je nutné použít kyselinovzdorné kamenivo (např. křemité). Výjimečné jsou případy kyselé agresivity, při kterých agresivní podzemní voda neproudí kolem konstrukce ze stříkaného betonu vůbec nebo jen málo. Pak je možné užít vápencové nebo dolomitické kamenivo, které agresivní účinky vody neutralizuje.

Tuhost: Tuhost stříkaného betonu je buď stanovena pomocí třídy zbytkové pevnosti (z trátkové zkoušky), nebo je hodnocena třídou absorpce energie (z deskové zkoušky). Výsledky těchto zkoušek nejsou porovnatelné.

Modul pružnosti: Jestliže modul pružnosti zásadně ovlivňuje projektem dané vlastnosti nebo požadované chování konstrukce, musí být stanoven zkouškami in situ a porovnán s modulem použitým pro návrh konstrukce. Jsou-li vzneseny nějaké požadavky na tepelné rozpínání nebo smršťování stříkaného betonu, měly by být specifikovány v projektové dokumentaci.

Přilnavost: Minimální požadovaná přilnavost se obvykle uvádí v hodnotách od 0,1 do 1 MPa. Jestliže hornina nezajišťuje žádnou přilnavost ani po řádném očištění, přilnavost se neuvádí.

10.6. Jakost stříkaného betonu

Kvalitativní parametry stříkaného betonu a systém výroby musí být pravidelně prověřovány a porovnávány s požadovanou jakostí. Aby toho bylo dosaženo, musí být vyrobená betonová směs i z ní aplikovaný stříkaný beton zařazeny do systému jakosti zhotovitele či jeho podzhotovitelů. Stříkaný beton nemusí být certifikován, vztahuje se však na něj provedení zkoušek výrobku, posouzení shody s technickou specifikací a splnění dalších ustanovení. Cílem je rovněž splnění technicko-kvalitativních podmínek (TKP) a případně i zvláštních technicko-kvalitativních podmínek (ZTKP) pro konkrétní stavbu objednatel. K tomu se použije plán jakosti stavby, technologický předpis výroby či metody a předem vypracovaný kontrolní a zkušební plán (KZP) zhotovitele. KZP musí specifikovat kontrolní činnost během výstavby, která zajistí s nejvyšší možnou pravděpodobností dosažení zadaných vlastností stříkaného betonu a z něho vybudované konstrukce. Pro každou stavbu může být přístup k řešení problematiky jiný, a proto je možné v rámci certifikovaného systému kvality zhotovitele postupovat se souhlasem objednatel případ od případu podle zpracovaného a projednaného technologického postupu.

11. KONTROLA KVALITY STŘÍKANÉHO BETONU



11. KONTROLA KVALITY STŘÍKANÉHO BETONU

11.1. Druhy zkoušek

Pro kontrolu kvality stříkaného betonu jsou nutné zkoušky výchozích složek, namíchaných směsí, zařízení i vlastního stříkaného betonu. Četnost kvalitativních zkoušek se řídí zpravidla dle závažnosti aplikace stříkaného betonu, dle požadavků na jeho trvanlivost, dle denních výkonů i místních podmínek. Tyto faktory, včetně TKP a ZTKP pro konkrétní stavbu, by měly být specifikovány v realizační dokumentaci. Doporučuje se, aby třídy četnosti zkoušek byly rovněž v souladu s typem betonu dle jeho funkce (SB I až SB III). Kvalita stříkaného betonu a jeho složek se prokazuje průkaznými a kontrolními zkouškami. Zkoušky musí provádět nezávislá akreditovaná laboratoř se zkušenostmi v oblasti stříkaného betonu.

Zkoušky složek: Jednotlivé složky pro provádění stříkaného betonu (cement, kamenivo, přísady a příměsi) musí být kontrolovány a certifikovány výrobcem. Vlastnosti cementu a kameniva (odplavitelné částice, čára zrnitosti, vlhkost) je třeba pravidelně ověřovat pomocí kontrolních zkoušek během výroby betonové směsi. Ostatní složky je možné kontrolovat před a v průběhu stavby dle potřeby (vodu, plastifikátory, atd.).

Zkoušení betonové směsi: V případě nástřiku suchou cestou kontroluje výrobce teplotu směsi, obsah cementu a podíl frakcí kameniva. V případě mokré směsi musí navíc výrobce zkontrolovat vodní součinitel, dávkování plastifikátoru a provést zkoušku rozlítím či sednutím (obr. 28). Pro míchané betonové směsi dovážené z certifikované betonárny jsou navíc prováděny zkoušky plynoucí z kontroly jakosti výrobce.



*Obr. 28
Provádění
zkoušky
rozlítí*

Průkazní zkoušky: Průkazní zkoušky musí provádět akreditovaná laboratoř. Výchozím bodem pro jejich provedení je zadání průkazních zkoušek organizací provádějící SB, ve kterém musí být zohledněny všechny projektem požadované jakostní parametry a zhotovitelem specifikovány potřebné technologické vlastnosti stříkaného betonu včetně podmínek jeho aplikace. Nejdříve se při průkazní zkoušce prověřuje dávkování navrhovaného složení betonové směsi na betonárně či ve staveništní výrobně. Při zkoušce stříkáním nanášeného betonu je nutné prokázat projektem vyžadované vlastnosti mladého i zralého stříkaného betonu. Průkazní zkoušky základních vlastností stříkaného betonu ověřují nárůst pevnosti betonu a pevnost betonu v tlaku. Při této zkoušce jsou dále stanovovány další související parametry: teplota čerstvého betonu, dávkování urychlovače, objemová hmotnost a u mokrého způsobu konzistence základní směsi. Průkazní zkoušky ostatních vlastností (mrazuvzdornosti, síranovzdornosti, modulu pružnosti, pevnosti v tahu ohybem, odolnosti proti průsaku vody nebo vyluhovatelnosti) je třeba provádět v případě, že jsou tyto vlastnosti stanoveny v realizační dokumentaci stavby (RDS) nebo v požadavcích objednatele (DZS, TKP, ZTKP, TP). Průkazní zkoušku stříkaného betonu z navržených složek je nutné provést na staveništi s konečným zařízením za stejných či obdobných podmínek (zejména teplotních), za kterých se bude stříkaný beton aplikovat. Pro porovnání je třeba se stejným složením odzkoušet i porovnávací (nulový) beton bez urychlovače pro zjištění poklesu pevnosti.

Kontrolní zkoušky: Zkouškami během stavby se dokladuje, že stříkaný beton byl vyroben tak, že při standardním postupu provádění lze na zkušebních tělesech dosáhnout požadovaných vlastností v určené době po nástřiku. Minimální rozsah kontrolních zkoušek se pro konstrukční stříkaný beton zpravidla omezuje na vyšetření náběhu pevnosti mladého betonu, dále pak zjištění pevnosti a objemové hmotnosti na vývrtech po 28 dnech. Vyšetření skutečně dosažené pevnosti stříkaného betonu se provádí přednostně na jádrech o průměru 100 mm, odvrtných z nastříkaného betonu (obr. 29). Odebírání vrtných jader se doporučuje provádět těsně před laboratorní zkouškou (pro odběr by beton měl mít pevnost nejméně 10 MPa). Běžně se v rámci kontrolních zkoušek provádějí zkoušky mladého stříkaného betonu penetrační jehlou a přístrojem Hilti–Tester 4 (obr. 30). Zkoušky nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu se provádějí zpravidla pro zaručení přenášení silových účinků z masivu na ostění, případně pro zabezpečení hospodárného a bezpečného nástřiku vrstvy betonu nad hlavou či na převislých plochách výrubu. Četnost kontrolních zkoušek vyplývá z předepsaných tříd četnosti (jednou za měsíc až jednou za dobu stavby). Četnost kontrolních zkoušek stanovuje realizační dokumentace stavby s přihlédnutím k charakteru a funkci konstrukce i celkové kubatury aplikovaného stříkaného betonu.

11.2. Zkušební metody

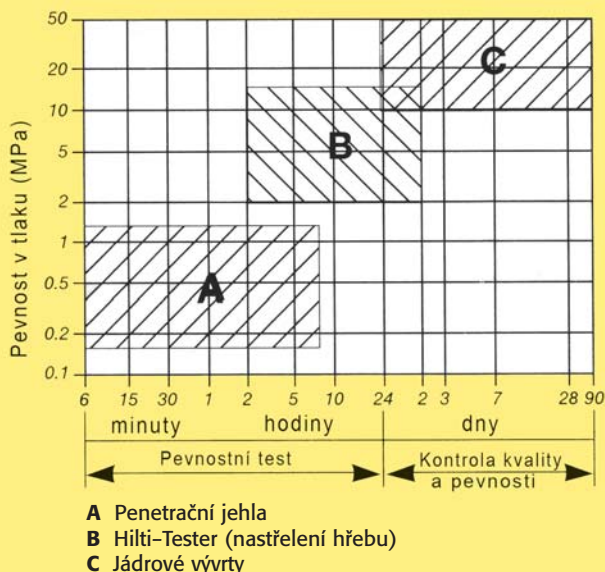
Níže jsou popsány pouze vybrané zkušební metody používaných výchozích hmot či stříkaného betonu. Pro odebírání vzorků výchozích hmot a přezkoušení jejich materiálových vlastností platí zkušebními běžně používané postupy dle norem; zkoušky materiálových vlastností cementu, kameniva a vody jsou stejné jako pro složky betonové směsi monolitického betonu. Proto jsou uvedeny pouze zkoušky, které nejsou běžně používány pro monolitický beton.



*Obr. 29
Jádrový
vývrt ze
stříkaného
drátkobetonu*

Zkoušky rychlosti reakce cementu a urychlovače: Pro laboratorní vyšetření rychlosti reakce cementu a urychlující přísady se používá Vicatův přístroj. Tento způsob slouží pro zjištění začátku, průběhu a konce tuhnutí cementové kaše po přidání urychlující přísady. Doba se počítá od okamžiku přidání vody, respektive u mokrého způsobu nástřiku od okamžiku přidání urychlující přísady. Za začátek tuhnutí se označuje doba, po které jehla přístroje zůstane viset zabořena v kaši 3–5 mm nad deskou přístroje. Průběh tuhnutí je charakterizován hodnotami hloubky vpichu odečtenými v intervalech 30 (60) vteřin. Za konec tuhnutí se značí poslední vpich, kdy jehla ještě pronikla do cementové kaše maximálně 2 mm. Podstatné jsou zejména hodnoty průběhu a konce tuhnutí, které se zjišťují laboratorně v rámci průkazní zkoušky. Pokud se zkouška reagentů opakuje při kontrolních zkouškách, neměl by se od těchto hodnot odchýlit konec tuhnutí o více než 60 sekund.

Zkušební tělesa stříkaného betonu: Zkušební tělesa referenčního stříkaného betonu slouží ke zkoušení vhodného cementu nebo kombinace cementu s urychlovačem z hlediska nárůstu pevnosti, mrazuvzdornosti, vodonepropustnosti, síranovzdornosti a vyluhovatelnosti. Pro zkoušení síranovzdornosti a vyluhovatelnosti se používá maximální přípustná dávka urychlovače (udáno výrobcem). Referenční stříkaný beton se nástříká do zkušební formy (hloubka 150 mm, rozměry 500 mm x 500 mm pro ruční nástřík, rozměry 1000 mm x 1000 mm pro strojní nástřík) ukloněné pod úhlem cca 60°. Formy s nástříkem se skladují ve vlhku až do odvrtání zkušebních těles (nejpozději 5 dnů po nástříkání). Zkušební tělesa pro zjištění mrazuvzdornosti se po odvrtání až do zkoušky skladují pod vodou. Zkušební tělesa pro zjištění odolnosti proti průsaku vody, modulu pružnosti a síranovzdornosti se skladují pod vodou až do 3 dnů před zkouškou, potom až do zkoušky se nechají schnout na vzduchu. Zkušební tělesa pro zjištění pevnosti se skladují do desátého dne pod vodou a potom na vzduchu.



Obr. 30 Orientální rozsah použití základních metod kontroly pevnosti stříkaného betonu

Zkoušky porovnávacího (nulového) betonu: Porovnávací (nulový) beton složený z betonové směsi stejného složení, avšak bez urychlovače tuhnutí, se nastříká instalovaným zařízením pro stříkaný beton do zkušebních forem. Následně je odzkoušena pevnost betonu v tlaku po 28 dnech. Zkouška slouží pro zjištění poměru poklesu pevnosti betonu způsobeného přidáním urychlovače v trysce. Při kontrolních zkouškách se následně musí dosáhnout pevnosti porovnávacího betonu, která odpovídá pevnostní třídě, zvýšené o pokles pevnosti vlivem urychlující přísady. Pokud při nástřiku nulového betonu s nealkalickým urychlovačem nelze dosáhnout vyhovujícího ztuhnutí, tak je třeba použít vhodný plastifikátor betonu. Stříkané betony z předvyrobené vysušené směsi není možné srovnávat s nulovým betonem bez urychlující přísady.

Zkoušení penetrační jehlou: Při zkoušení nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu penetrační jehlou (obr. 31) se měří síla, která je potřebná pro zatlačení jehly (průměr 3 mm a hrot s úhlem 60°) do stříkaného betonu na hloubku 15 mm. Pro měření se používá Proctorův penetrometr, který umožňuje stanovovat pevnost v tlaku od 0,2 do 1,0 MPa. Měření se provádí v časových intervalech 6, 15, 30 minut, 1, 2 a případně 3 hodiny po zastríkáání. Výsledky se porovnají s průběhem čáry vymezující spodní hranici porovnávaného oboru (nejčastěji J2).

Zkoušení přístrojem Hilti-Tester 4: Zkoušení metodou Hilti-Tester 4 dovoluje měřit pevnost betonu v tlaku na libovolném místě bez předchozí přípravy. Parametrem pro výpočet pevnosti stříkaného betonu v tlaku je poměr vytahovací síly ke hloubce

11. Kontrola kvality stříkaného betonu

nastřelení hřebu opatřeného hlavou se závitem. Jako zaháněcí zařízení se používá nastřelovací pistole HILTI DX 450 L (obr. 32). Vytahovací síla se zjistí pomocí vytahovacího zkušebního přístroje HILTI-Tester 4. Síla potřebná k vytažení se měří bezprostředně po nastřelení předem stanoveného počtu hřebů. Tento postup je velmi vhodný pro rychlá kontrolní měření. Cíleným rozdělením míst měření po ploše stříkaného betonu lze získat kritické hodnoty pevnosti stříkaného betonu z hlediska jeho stáří a technologie provádění. Zkoušky s pomocí nastřelovací pistole Hilti DX 450 L se zelenými nábojkami a měřicího přístroje Tester 4 se provádějí v případech, kdy je třeba vyhodnocovat nárůst pevnosti stříkaného betonu v rozsahu od 2 do 15 MPa. Metoda může být používána zejména pro mladé stříkané betony stáří od 2 do 24 hodin. Zkoušky průběhu nabývání pevnosti jsou zpravidla prováděny v čase 3, 6, 12 a 24 hodin po nástřiku. Při náběhu pevností dle oborů tuhnutí a tvrdnutí J1, v některých případech i J2, je možné provádět měření i později (až 48 hodin po nástřiku).



*Obr. 31
Penetrační
jehla*

Zkoušení odvrtných jader: Jako zkušební tělesa pro zkoušky stříkaného betonu slouží odvrtná jádra, která se odebírají z nastříkaného betonu (obr. 33) in situ (případně ze zkušebních forem). Podle způsobu ošetření se mohou vzorky (vývrty) používat pro zkoušky průkazní či kontrolní. Zkušební tělesa je třeba odebírat na různých místech přezkušovaného úseku ostění (strop, boky, dno). Zkušební tělesa pro průkazní a kontrolní zkoušky se musí odvrtnat ne dříve než dosáhnou předpokládanou pevnost v tlaku 10 MPa, nejpozději však do 5 dnů po nanesení stříkaného betonu. Vzorky se skladují částečně na vzduchu a částečně ve vodě v závislosti na zkoušené veličině (pevnost v tlaku, vodonepropustnost, mrazuvzdornost, modul pružnosti atd.).

11. Kontrola kvality stříkaného betonu

Zkouška přetvárnosti (desková): Zkouška slouží ke zjišťování přetvárných vlastností stříkaného betonu vyztuženého rozptýlenými ocelovými vlákny. Zkouška průhybu desky je metoda určující přetvárnost stříkaného betonu jako závislost průhybu na působící síle (deformační křivka), respektive průhybu na vynaložené energii (křivka přetvárné energie). Zkušební těleso se připraví z betonu nastříkaného do zkušební formy (60 x 60 x 10 cm). Zkušební těleso se osadí na ocelový rám tak, že je uloženo po celém obvodu. Zatížení se vyvozuje ve středu desky na ploše 10 x 10 cm zkušebním lisem s řízenou deformací o rychlosti přetváření 1,5 mm/min. až do průhybu 25 mm. Kontinuálně se zaznamenává síla potřebná pro deformaci jako funkce průhybu. Z křivky závislosti deformace na zatížení se odvodí druhá křivka, udávající absorbovanou energii jako funkci deformace desky. Požadavky na tuhost jsou dány stanovenou absorpcí energie při daném průhybu. Stříkaný beton s vlákny by měl vykázat schopnost převzetí přetvárné energie alespoň 500 joulů při průhybu 25 mm. Standardní zkouška se provádí ve stáří stříkaného betonu 28 dní.

Ověřování dávkování tekutého urychlovače: Dávkování urychlující přísady je podstatné pro dobu zahájení náběhu tuhnutí, nárůst pevnosti i pro konečnou pevnost stříkaného betonu. Tekutý urychlovač lze dávkovat při suchém způsobu ze sudů či kontejnerů v příslušném poměru do záměsové vody. Při přidávání tekuté urychlující přísady pomocí dávkovacího zařízení přímo do vody přiváděné k trysce je třeba dbát na stálý tlak v rozvodu vody. Dávkovací zařízení musí zaručovat rovnoměrné přidávání předem stanoveného množství urychlovače. Dávkování přísady se kontroluje převážně nádoby s urychlující přísadou před a po nástřiku. Pokud je připojeno průtočné měřidlo, může být zaznamenávána spotřeba urychlovače průběžně v příslušné době. Průtokoměr je třeba nakalibrovat při průkazní zkoušce. Při kontrolních zkouškách a před každým započítáním stříkání musí být zkontrolovány nastavené hodnoty na dávkovacím zařízení, které mohou být různé pro konkrétní aplikaci stříkaného betonu (např. pro nástřik boků, klenby či spodní klenby primárního ostění tunelu či štoly).



*Obr. 32 Souprava
HILTI DX 450 L*



*Obr. 33
Odebírání
jádrového
vývrtu
z ostění*

Zjišťování spadu: Množství spadu je velmi důležitou položkou, která zásadně rozhoduje o hospodárnosti provádění stříkaného betonu. Množství spadu je ovlivněno řadou faktorů, z nichž nejpodstatnější jsou kolmost nástřiku k podkladu, vzdálenost ústí trysky od podkladu a rychlost vyletujících částic betonové směsi. Nejvhodnějším způsobem pro zjištění spadu je zpravidla vystříkat alespoň 1 m³ směsi, která bude navážena na betonárně a doložena písemným protokolem o hmotnosti jednotlivých komponent. Po vystříkání se musí zjistit také hmotnostní úbytek urychlující přísady a u suchého způsobu stříkání i hmotnost spotřebované vody. Náročnou avšak přesnou metodou je zachytit spad na plachtu položenou před nástřikem, který je třeba odvážit např. s pomocí odběrné nádoby stejnoměrně plněné, u níž se při prvním naplnění zjistí hmotnost obsahu.

12. STROJNÍ VYBAVENÍ PRO STŘÍKANÝ BETON

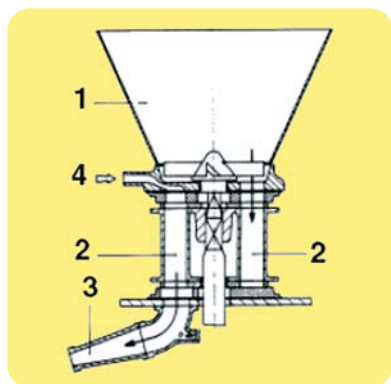


12. STROJNÍ VYBAVENÍ PRO STŘÍKANÝ BETON

Strojní vybavení pro stříkaný beton prodělává neustálý inovační proces. V současné době je na trhu k dispozici široké spektrum strojního vybavení, které pokrývá všechny možnosti použití stříkaného betonu (tj. pro malé či vysoké objemy betonu, pro nástřik mokrou či suchou cestou, pro nástřik ruční či pomocí manipulátoru atd.). Dále jsou zmíněny pouze základní typy vybavení.

12.1. Stříkací stroje pro ruční nástřik suchou cestou

Použití stříkacích strojů pracujících na rotačním principu rotoru je dnes nejrozšířenější (obr. 34 a 35). Suchá směs se plní do násypky (1). Gravitačně padá směs do komor rotoru (2), které se otáčením rotoru střídavě otvírají. Zatímco se plní jedna komora, vytlačuje se směs ve druhé (plné) komoře proudem stlačeného vzduchu (P) tlakem 3–4 bary výstupním otvorem (3) do dopravního potrubí a k trysce, kde je přidána záměsová voda. Nejdůležitější předností tohoto typu stříkacích strojů je jednoduchá obsluha, odolnost a flexibilita. Podle typu rotoru, průměru násypky a dopravního výkonu se pohybují hodnoty výkonu těchto strojů od cca 0,5 m³/hod. až do 10 m³/hod.



Obr. 34 Schéma rotačního stříkacího stroje pro technologii nástřiku suchou cestou (1 – násypka, 2 – komory rotoru, 3 – výstup, 4 – proud stlačeného vzduchu)

12.2. Čerpadla pro nástřik mokrou cestou

Pro nástřik mokrou cestou jsou používána čerpadla se dvěma písty (obr. 36). Především je snaha o dopravu směsi od čerpadla k trysce bez pulzace, aby byl umožněn rovnoměrný nástřik.

12.3. Manipulátory

Manipulátory (obr. 37) se hodí tam, kde se zpracovávají velké objemy stříkaného betonu (především u dopravních tunelů). Díky mechanizovanému a automatizovanému vybavení je možné za optimálních podmínek nanášet velká množství stříkaného betonu – suchého nebo mokrého – bez únavy obsluhy trysky (ruční nástřik je obecně fyzicky značně náročný). Navíc nástřik pomocí manipulátoru zvyšuje bezpečnost a obecně zlepšuje pracovní podmínky.



*Obr. 35
Stříkací stroj
pro nástřik
suchou
cestou*



*Obr. 36
Čerpadlo
pro nástřik
mokrou
cestou*

Manipulátor má obvykle následující části:

- Stříkací lafeta s tryskou
- Nosné rameno
- Dálkové ovládání
- Pohonná jednotka
- Otočná věž (popř. nástavná konzola pro různé varianty nastavy)

12. Strojní vybavení pro stříkaný beton

Stříkácí lafeta umožňuje veškeré pohyby trysky potřebné pro nástřik, její délka se pohybuje mezi 2 a 3 m. Stříkácí lafeta je upevněna na nosném rameni, které se pohybuje na všechny strany. Řízení se provádí přenosným dálkovým ovládáním. Některé pohyby lze automatizovat (např. kruhové pohyby stříkácí trysky). Stříkácí hlava je obvykle poháněna nezávislými hydraulickými motory, takže ji lze stále držet v optimálním úhlu vzhledem k povrchu. Tryska se může pohybovat o 360° ve směru i proti směru hodinových ručiček. Lafeta by měla být situována paralelně k ose tunelu. Dálkové ovládání je opatřeno kabelem (dlouhým cca 20 m), takže obsluha může provádět nástřik z bezpečného stanoviště.



*Obr. 37
Manipulátor
pro malé
profily (štoly
a propojky)*

12.4. Strojní sestavy pro stříkaný beton

Strojní sestavy pro stříkaný beton (obr. 38) jsou integrované systémy pro nástřik betonu. Všechna zařízení a přístroje potřebné pro hospodárné používání stříkaného betonu jsou v těchto strojích zabudovány. Strojní sestavy pro stříkaný beton se skládají z následujících částí:

- Podvozek se čtyřmi koly, řízením a výsuvnými stabilizátory
- Manipulátor
- Čerpadlo (stříkácí stroj)
- Dávkování urychlovače
- Navíjecí buben včetně kabelu pro napájení elektrinou
- Elektro-hydraulický systém pro napájení proudem
- Nádrže na urychlovač a na vodu
- Kompresor na vzduch
- Centrální řídicí systém (vnitřní)

12. Strojní vybavení pro stříkaný beton

- Dálkové ovládání trysky
- Vysokotlaký vodní čistič
- Osvětlení staveniště



*Obr. 38
Strojní
sestava pro
stříkaný
beton*

13. BEZPEČNOST PRÁCE



13. BEZPEČNOST PRÁCE

Minimalizace negativních důsledků na životní prostředí a zlepšení bezpečnosti a ochrany zdraví pracovníků hrají velmi důležitou roli při návrhu technologie stříkaného betonu. Stříkané betony s nealkalickými přísadami jsou jak z hlediska ochrany životního prostředí, tak s ohledem na ochranu bezpečnosti zdraví pracovníků jednoznačně upřednostňovány. Maximální prašnost na pracovišti nesmí překračovat maximální povolenou koncentraci prachových částic. Provádění stříkaných betonů by mělo odpovídat všem bezpečnostním předpisům platným v místě použití. Z hlediska bezpečnosti práce a ochrany zdraví je třeba, aby na pracovišti se stříkaným betonem byla osádka chráněna proti účinkům prašnosti, odrazu či spadu i proti účinkům cementů, příměsí a přísad na pokožku i sliznice (obr. 39). Proto musí obsluha používat osobní ochranné pomůcky – respirátor, ochranné rukavice, ochranný štít nebo brýle, ochranu pokožky vhodným oděvem (zvláště proti vysoké alkalitě cementů a některých přísad s možností vzniku kožních podráždění až popálenin). Proto je nutné, aby byly používány jen certifikované vstupní materiály, které mají kromě ověřených vlastností zpracovány technické a bezpečnostní listy, s jejichž ustanoveními musí být pracovníci zhotovitele prokazatelně seznámeni tak, aby bezpečnostní zásady v nich obsažené mohli při nanášení stříkaného betonu dodržovat.



*Obr. 39
Ochranné
pomůcky
umožňující
vysokou
bezpečnost
práce*

14. MOŽNOSTI VYUŽITÍ STRÍKANÉHO BETONU



14. MOŽNOSTI VYUŽITÍ STŘÍKANÉHO BETONU

Stříkaný beton, jako betonová hmota vytvořená při procesu nástřiku, může být využíván na rozdíl od monolitického betonu bez potřeby oboustranného bednění. Tím je určována zejména jeho přednost při aplikaci na svislou či převislou podkladovou plochu, na složité přechodové tvary mezi různými průřezy podzemních staveb nebo obecně při vytváření nepravidelných tvarů konstrukcí podle záměru architektů či při napodobeninách přírodních skalních útvarů.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, využití stříkaného betonu je dominantní u podzemních staveb. Vzhledem ke svému účelu je tato publikace zaměřena na použití stříkaného betonu jako součásti primárního ostění tunelů, štol či šachet při ražbách pomocí NRTM. Další možnosti využití stříkaného betonu jsou následující:

- Primární ostění tunelů při ražbách TBM (plnoprofilové tunelovací stroje) či při ražbách pomocí metody obvodového vrubu
- Ostění tunelů před portálem
- Definitivní ostění podzemních staveb (kolektory, elektrárny, zásobníky, sklady, vojenské objekty, nemocnice, léčebny, atd.)
- Sanace existujících podzemních konstrukcí a jeskyní
- Zárubní, opěrné zdi a konstrukce zajišťující sesuvná území či nestabilní svahy
- Stavební objekty osobité architektury či jejich části
- Tvarově náročné střešní konstrukce
- Nepravidelné plavecké bazény a akvária
- Kanály pro vedení vody
- Umělé kameny, skalní útvary, lezecké stěny (obr. 40)
- Rampy a parky pro kolečkové brusle či skateboard (obr. 41)



Obr. 40
Lezecká stěna vytvořená ze stříkaného betonu

14. Možnosti využití stříkaného betonu

- Ochrana líce sypaných přehrad
- Ochrana konstrukcí proti ohni
- Sanace betonových konstrukcí (mosty, chladicí věže, skeletové konstrukce)



Obr. 41 Výstavba skateboardového parku s využitím stříkaného betonu

REFERENCE

Odborné články a knihy:

Hilar, M.; Thomas, A.; Falkner, L. (2005): Nejnovější inovace v provádění ostění ze stříkaného betonu – metoda LaserShell. Tunel 4/2005.

Melbye, T.; Dimmock, R.; Garshol, K. (2006): Sprayed Concrete for Rock Support. Zurich, 1994 (publikace UGC International, division of BASF).

Polák, P.; Mika, V. (2004): Stříkaný beton při výstavbě dopravních tunelů. Tunel 3/2004.

Pracovní skupina ČTuK pro konvenční tunelování (2006): Zásady a principy NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR. Praha (elektronická verze je dostupná na www.ita-aites.cz).

Pracovní skupina ČTuK pro stříkaný beton (2003): Zásady pro používání stříkaného betonu. Praha (elektronická verze je dostupná na www.ita-aites.cz).

Pracovní skupina ČTuK pro stříkaný beton (2006): Příručka o zásadách aplikace stříkaného betonu. Praha.

Stečinský, B. (2003): Železniční tunely v České republice. Tunel 4/2003.

Thomas, A.; Powell, D.; Hilar, M. (2004): Úloha numerického modelování při projektování tunelů. Tunel 1/2004.

Specifikace EFNARC:

EFNARC (1996), European Specification for Sprayed Concrete, Farnham, United Kingdom

EFNARC (1999), European Specification For Sprayed Concrete-Execution Of Spraying, (revised version of Section 8), Farnham, United Kingdom

EFNARC (1999), European Specification For Sprayed Concrete-Guidelines For Specifiers And Contractors, Farnham (UK), United Kingdom

EFNARC (2002), European Specification For Sprayed Concrete-Checklist For Specifiers And Contractors, Farnham, United Kingdom

Normy:

ČSN EN 14487-1 (73 2431) Stříkaný beton – Část 1: Definice, specifikace, shoda

ČSN EN 14487-2 (73 2131) Stříkaný beton – Část 2: Provádění

ČSN EN 14488-1 (73 1304) Zkoušení stříkaného betonu – Část 1: Odběr vzorků – čerstvého a ztvrdlého betonu

ČSN EN 14488-2 (73 1304) Zkoušení stříkaného betonu – Část 2: Pevnost v tlaku mladého stříkaného betonu

ČSN EN 14488-3 (73 1304) Zkoušení stříkaného betonu – Část 3: Ohybová únosnost (při vzniku trhliny, mezní a zbytková) vláknobetonových trámčových zkušebních těles

ČSN EN 14488-6 (73 1304) Zkoušení stříkaného betonu – Část 6: Tloušťka betonu na podkladu

ČSN EN 14488-7 (73 1304) Zkoušení stříkaného betonu – Část 7: Obsah vláken ve vláknobetonu

