

Tunely stavby 513 Silničního okruhu kolem Prahy

Předpoklady projektu a první zkušenosti z realizace

Praha se stejně jako většina evropských metropolí dlouhodobě potýká s narůstající intenzitou dopravy a dopravním přetížením centra města. Tuto situaci má podstatně změnit silniční okruh, který je rozdělen do 11 staveb, označených čísly 510 až 520.

Úsek městského okruhu mezi Vestcem a Lahovicemi je označován jako stavba 513. Směrem od Lahovic, kde navazuje na stavbu 514, trasa překračuje mostním objektem řeku Vltavu a prudce stoupá ve dvou směrově rozdělených tunelových troubách od Komořan k Cholupicím.

V příportálových úsecích, kde nepříznivé geotechnické podmínky neumožňují ražbu tunelů, probíhá jejich výstavba v otevřených stavebních jámách. V úsecích se vhodnými geotechnickými poměry jsou tunely raženy pomocí nové rakouské tunelovací metody (NRTM).

Podélný sklon tunelů 4 % vyžaduje použít v jižní tunelové troubě, navržené pro stoupání, třípruhový profil s šířkou mezi obrubníky 11,75 m. V opačném směru, v severní tunelové troubě pro klesání, postačuje dvoupruhový profil s nouzovým pruhem šířky 1,5 m. Celková šířka vozovky, která mezi obrubníky dosahuje 9,75 m, hraje důležitou roli z hlediska výše investičních nákladů, neboť významně ovlivňuje nutnou plochu výrubu. Podle české normy ČSN 737507 je šířka vozovky mezi obrubníky natolik důležitým údajem, že určuje přímo kategorii tunelu.

Před zahájením prací obdržel zhotovitel stavby výsledky geotechnického průzkumu, jehož sou-

částí byly i informace získané při ražbě průzkumné geotechnické štoly, situované ve středu kaloty jižního třípruhového tunelu (obr. 3).

Stabilitu výrubu průzkumné štoly soudkovitého tvaru o ploše výrubu 25 m² zajišťuje primární ostění ze stříkaného betonu, vyztužené ocelovými sítěmi a výztužnými příhradovými rámy. V oblasti stavební jámy komořanského portálu byla štola ražena v píscích a stabilitu výrubu zajišťovaly předrážené ocelové pažiny (obr. 7). Štola o světlé výšce 5,5 m a šířce 4,5 m probíhá v celé délce jižního tunelu a umožňuje větrání i odvodnění podzemního díla během výstavby.

Geotechnické poměry lokality – prognóza a skutečnost

Zatímco v případě hloubených úseků tunelů hraje geotechnické poměry roli spíše z hlediska návrhu zajištění stability svahů stavebních jam a způsobu založení hloubených tunelů, u ražených

úseků tunelů představuje horninový masiv stavební materiál, který se spolu s ostěním významně podílí na celkové únosnosti systému ostění – hornina. Získání geotechnických parametrů je důležitým podkladem pro návrh technologického postupu výstavby i způsobu zajištění stability výrubu zejména během ražby.

Geotechnický průzkum v předchozích stupních projektové dokumentace zahrnoval vrtný průzkum, geofyzikální průzkum i geotechnická sledování, prováděná v průzkumné štole. Součástí geotechnického průzkumu tvořil i pokusný úsek průzkumné štoly, ražený v plném profilu kaloty budoucího třípruhového tunelu. Termín provádění průzkumné štoly však časově kolidoval s termínem dokončení zadávací dokumentace stavby. Získané výsledky zohledňovala zadávací dokumentace proto pouze částečně, a technologické třídy výrubu navržené v realizační dokumentaci tak zcela nekorrespondují se zadávací dokumentací.

Skalní horniny jsou ve větších hloubkách dokonale zpevněné, bez průlinové propustnosti. Pukliny jsou většinou těsně sepnuté nebo vyplněné. Pouze v mocnějších polohách drob či ordovických křemenců byl avizován pohyb podzemní vody. Vlivem průzkumné štoly došlo k částečnému odvodnění masivu a během výstavby tunelů se potvrdily průzkumem očekávané minimální přítoky podzemní vody do prostoru výrubu, které dosahovaly max. 2 l/s.

Hlavní systém diskontinuit tvoří vrstevní plochy. Jejich sklon měl podle prognózy v případě dovrchní ražby od Komořan směrem k Cholupicím zapadat do horninového masivu a příznivě ovlivňovat stabilitu čelby. Optimistický předpoklad se během ražby nepotvrdil a sklon systému diskontinuit se v průběhu ražby velmi často měnil (obr. 4). Grafická výplň puklin způsobovala lokální nestabilitu čelby i líce nezajištěného výrubu, což vyžadovalo před provedením záběru aplikaci stabilizačních opatření (zpravidla jehlování obvo-



Obr. 1: Situace: Stavba 513 s napojením na stavbu 514. Zvláště vyznačeny jsou tunely a hloubené portálové úseky.



Obr. 2: Portál Komořany



Obr. 3: Průzkumná štola situovaná ve středu kaloty jižního tunelu

du kaloty). I přes provedená opatření nebylo možné zcela zabránit lokálnímu vypadávání bloků horniny z obnaženého líce výrubu.

Celkově však vykazuje horninový masiv vysoký stupeň stability. Měřené deformace líce výrubu po provedení záběru rychle odeznívají a nepřekračují obvykle po vyražení plného profilu tunelu 10 mm. Maximální měřená deformace výrubu nepřesáhla při ploše tunelu téměř 140 m² hodnotu 30 mm.

Hloubené tunely Komořany

Stavební jáma níže položeného komořanského portálu dosahuje v nejhlubším místě hloubky 30 m a šířky 50 m. Délka hloubených tunelů přesahuje 170 m. Zajištění boků stavební jámy je prováděno z přirozeně svahovaného předvýkopu, z jehož dna jsou vrtány piloty a zápor, stabilizující spodní partie stěn jámy.

I když geotechnický průzkum avizoval bázi pokryvů mělce pode dnem stavební jámy, doplňující průzkum ukázal, že písčité sedimenty, naplavené v minulosti Vltavou, dosahují větších mocností a piloty ani zápor nelze ve větší části jámy vetknout do skalního podloží. Skutečnost, že se po celé výšce stavební jámy nachází pouze vrstva písčitých sedimentů (obr. 5), ovlivňovala dimenze pilot, zápor i způsob kotvení jámy. Spolu s omezenou šířkou dočasného záboru pozemků pro realizaci hloubených tunelů vedla změna geologických poměrů k úpravě způsobu zajištění stavební jámy. V rámci zpracování realizační dokumentace muselo dojít k prohloubení svisle pažených stěn na úkor svahované části, aby bylo možné v rámci vymezeného záboru pozemků dílo realizovat.

Horninový pilíř dosahuje na portále ražených tunelů mocnosti pouze 10 m, což klade zvýšené nároky na zajištění stability díla při zahájení ražby

severního i jižního tunelu (obr. 6). Odtěžování stavební jámy probíhá po etážích, které respektují technologii provádění pažení jámy, betonáže převážek a předpínání kotev. Ve stavební jámě se v profilu hloubeného jižního tunelu nachází průzkumná štola, jejíž ostění bylo nutno při odtěžování jámy bourat. Obnažené ostění štoly, tvořené předháněnými ocelovými pažinami a stříkaným betonem se síťí a příhradovými ramenáty, skýtá netypický pohled (obr. 7).

Hloubené tunely prováděné ve stavební jámě nekorespondují šířkovým uspořádáním s profilem navazujících ražených tunelů. Do hloubených tunelů zasahují připojovací a odbočovací pruhy přilehlých plánovaných křižovatek, což vede ke zvětšení jejich šířky o jeden jízdní pruh. Stísněné poměry před portálem tunelu neumožnily splnit bezpečnostní doporučení směrnice 2004/54/ES Evropského parlamentu a Rady o umístění připo-



Obr. 4: Sklon diskontinuit na čelbě kaloty jižního tunelu



Obr. 5: Vrstva uhlého písku ve stavební jámě Komořany

javacích pruhů v dostatečné vzdálenosti před portálem.

Ostění hloubených tunelů tvoří železobetonová klenbová konstrukce plošně založená na masivní spodní klenbě. Pro betonáž bloků spodní klenby délky 12 m zajistil zhotovitel speciální pojízdné bednění (obr. 8). Založení na jemnozrnných píscích vedlo k debatám o způsobu úpravy a ochrany základové spáry. Nakonec zvítězil názor projektanta RDS spáru neupravovat hutněním nebo jiným zlepšením, ale z ponechané ochranné vrstvy zeminy tloušťky až 1 m s ústupem mechanismů upravit dno jámy do tvaru spodní klenby tunelu. Upravené dno jámy zhotovitel stabilizoval stříkaným betonem, na který následně provedl vrstvu podkladního betonu. Před stabilizací stříkaným betonem byl po upraveném dně jámy zakázán pohyb mechanismů i lidí, neboť okamžitě docházelo k nakypření jinak ulehleho a konsolidovaného písku. V případě poškození základové spáry byl nakypřený materiál opatrně vytěžen a nahrazen podkladním betonem. Práce probíhaly za zvýšeného dohledu zhotovitele i investora a každá základová spára byla před betonáží přebrána kompetentními zástupci vedení stavby (obr. 9).

Celková šířka nosné konstrukce jižního hloubeného tunelu přesahuje 21 m, severního pak 16 m. Minimální tloušťka ostění ve vrcholu klenby severního tunelu činí 600 mm. U jižního tunelu se vzhledem k rozpětí klenby a výšce zpětného zásypu zvětšuje na 800 mm, resp. v místě největší výšky nadloží až na 1000 mm. S ohledem na snižující se mocnost nadloží směrem k portálu tunelu a značnou délku hloubených tunelů je dimenzování ostění z ekonomických důvodů provedeno po úsecích, ve kterých dochází ke změně tloušťky ostění i stupně vyztužení. Oba hloubené tunely jsou proti průniku podzemní vody chráněny „deštníkovým systémem“ pláštové fóliové izolace, umístěné v oblasti klenby tunelu. Voda je po izolaci svedena do bočních tunelových drenáží a dále ke komořanskému portálu.

Hloubené tunely Cholutice

Prostorové poměry na cholupickém portále nejsou tak stísněné jako na komořanské straně a stavební jámy lze částečně provést svahováním severního svahu jámy v přirozeném sklonu 1,5 : 1 se zajištěním stability svahu tyčovými kotvami a vrstvou stříkaného betonu se sítí. Pouze na jižní straně jámy vyžadují místní poměry stěnu jámy zapažit záporovým pažením o světélce výšce 6 až 9 m. Práce na stavební jámě započaly vrtáním zápor a pilot v květnu 2007 s následnou betonáží ztužujícího hlavového trámu portálové stěny. Následovalo odtěžování stavební jámy po etapách a osazování a předepínání pramencových kotev v jednotlivých kotevních úrovních na portálové stěně a jižní záporové stěně.



Obr. 6: Horninový pilíř mezi tunely – pohled z demolované průzkumné štoly



Obr. 7: Hnané pažení po obnažení rubu štoly – portál Komořany

Rozpojování probíhalo bez použití thracích prací. Jedinou komplikací opět představovalo bourání primárního ostění průzkumné štoly (obr. 10).

Oba hloubené tunely navazují beze změny tvaru vnitřního líce ostění přímo na profil ražených tunelů. Pouze dimenze ostění se oproti raženým tunelům u hloubených tunelů zvětšuje ze 400 mm na 600 mm. Vzhledem ke zcela odlišným základovým poměrům je na rozdíl od komořanského portálu konstrukce ostění založena na patkách. Návrh na změnu založení podal zhotovitel, resp. zpracovatel RDS, na základě vyhodnocení geotechnických poměrů po vytěžení stavební jámy.

Specifika ražených úseků tunelů

Již při návrhu primárního ostění tunelu a technologického postupu ražby musí projektant zohled-

nit blokové schéma betonáže definitivního ostění. Dispoziční řešení tunelů vychází z délky bloku betonáže definitivního ostění 12 m.

V úsecích ražených tunelů poblíž obou portálů vyžadují geotechnické poměry rychlé uzavírání spodní klenby tunelu. V úsecích dále od portálu je použit příčný profil bez uzavření spodní klenby a horní klenba spočívá na patkách. Návrh technologických tříd výrubu tuto skutečnost zohledňuje. Úsek ražený v technologické třídě výrubu 5a, určené do nejhorších geotechnických podmínek, má délku určenou jako násobek délky bloku betonáže definitivního ostění, aby se v rámci jednoho bloku betonáže neměnil konstrukční typ a ostění nebylo založeno na patkách i spodní klenbě. Výrazně lepší než průzkumem původně očekávané geotechnické podmínky umožnily pro-

vádět ostění bez spodní klenby i v technologické třídě výrubu 5a. Spodní klenba je proto navržena pouze u prvních bloků betonáže ražených tunelů (obr. 11). V dalších úsecích již není spodní klenba použita a rozhraní mezi jednotlivými technologickými třídami výrubu není vázáno na spáry mezi bloky betonáže definitivního ostění. Další úpravy standardně navržených technologických tříd výrubu vyžaduje situování tunelových propojek, výklenků pro osazení skříní SOS, požárního hydrantu a výklenků na čištění boční tunelové drenáže.

Délka ražených úseků jižního a severního tunelu není totožná. Oba tunely leží ve směrových obloucích. Zatímco osa jižního tunelu tvoří rovnoběžku k ose hlavní trasy, osa severního tunelu se v prostoru komořanského portálu od osy hlavní trasy nejprve odklání, v dalším úseku probíhá rovnoběžně s hlavní trasou a před portálem Cholupice se opět k ose hlavní trasy přimyká. Tím je na většině délky ražených úseků tunelu zajištěna dostatečná vzdálenost obou tunelových trub, důležitá pro stabilitu horninového pilíře mezi tunely (obr. 12).

Rozdělení tunelu na bloky betonáže definitivního ostění stejné délky vede ke standardizaci konstrukčního řešení a ovlivňuje technické řešení dalších stavebních objektů i provozních souborů technologického vybavení tunelu. Kromě polohy propojek a výklenků ovlivňuje blokové schéma i polohu kanalizačních a kabelových šachet, spárořez vozovky, umístění svítidel nouzového osvětlení a chrániček pro kabely, vedené v definitivním ostění tunelu k jednotlivým zařízením technologického vybavení. Jako základní byl při návrhu blokového schématu zvolen, vzhledem k paralelnímu průběhu osy tunelu s osou hlavní trasy, jižní tunel. Délka raženého úseku tunelu je bezzbytku rozdělena na bloky délky 12 m. Bloky betonáže atypické délky se v jižním tunelu nevyskytují. Polohu únikových tunelových propojek určují požadavky na bezpečnost provozu a v tunelech se jich nachází celkem osm. Osa tunelové propojky odpovídá vždy ose bloku betonáže. Vhodnou úpravou polohy portálů, situováním tunelových propojek a vedením trasy jižního tunelu se podařilo vytvořit blokové schéma severního tunelu pouze s pěti atypickými bloky betonáže.

Základní pravidla pro zajištění stability výrubu a technologický postup výstavby definují technologické třídy výrubu. Projektant realizační dokumentace provedl analýzu znalostí o horninovém masivu v trase tunelů a následně upravil technologické třídy výrubu obou tunelů. Pravidla zadávací dokumentace takový postup umožňují. Realizační dokumentace obsahuje pro každý tunel v souladu se zadávací dokumentací tři technologické třídy výrubu, označované 3, 4 a 5a. Technologická třída výrubu 5a je určena do nejtěžších geotechnických podmínek a obsahuje i modifikaci pro ražbu pod



Obr. 8: Speciální bednění spodní klenby hloubených tunelů Komořany



Obr. 9: Upravená základová spára hloubených tunelů

ochranou mikropilotového deštníku od obou portálů. Další dvě třídy pak definují způsob zajištění stability výrubu a technologický postup výstavby v lepších geotechnických podmínkách.

Průzkumná štola

Pro ověření geotechnických podmínek byla v předstihu před ražbou tunelu vyražena v ose jižního tunelu průzkumná štola. Projektant štoly našel její optimální polohu v profilu kaloty. Počva štoly se nachází v úrovni 3,35 m nad úrovní nivelety tunelu a světlá výška dosahuje 5,5 m. Šířka štoly 4,5 m umožnila bezproblémový pohyb mechanismů, neumožnila však jejich vzájemné míjení při provozu ve štole. Proto jsou po cca 200 m jednostranným rozšířením profilu štoly do profilu kaloty budoucího tunelu vytvořeny výhybny. V jed-

nom úseku došlo v rámci geotechnického průzkumu k vyražení pokusného výrubu v plném profilu kaloty budoucího tunelu s počvou v úrovni počvy průzkumné štoly.

Při návrhu technologických tříd výrubu jižního třípruhového tunelu zohlednil projektant realizační dokumentace polohu průzkumné štoly a pokusil se maximálně využít jejich rozměrů při úpravě tvaru příčného řezu tunelu. Limitujícím faktorem bylo výškové vedení trasy tunelu i celková plocha výrubu, ovlivňující rozsah prováděných prací a tím i výši investičních nákladů. Po dohodě se zhotovitelem s ohledem na nasazenou mechanizaci došlo ke zvětšení výšky kaloty z 5,7 m na 6,6 m za cenu prohloubení její počvy na úroveň 2,25 m nad niveletu tunelu, tj. o 1,1 m oproti počvě průzkumné štoly. Nadvýšený rub primárního

ostění tunelu odpovídal teoretickému líci primárního ostění štoly, aby bylo možno výztužné rámy a síť ostění tunelu umístit pod primární ostění štoly. Odchyšky a tolerance provádění primárního ostění štoly směrem do profilu však mnohdy vedly k nutnosti jeho demolic. Rovněž využití jednostranných výhyben jako součástí primárního ostění tunelu se ukázalo nereálné.

Pokusný výrub plného profilu kaloty se podařilo díky dobrým geotechnickým podmínkám v daném úseku zachovat a zakomponovat do primárního ostění tunelu. Průzkumná štola snížila objem výrubu kaloty při šířce výrubu v počvě kaloty 16,4 m a výšce kaloty 6,6 m z 85 m³ jen na cca 60 m³ na běžný metr tunelu. Plocha výrubu jádra dosahovala při výšce výrubu 3,56 m až 57 m³/bm. V technologické třídě výrubu 5a se spodní klenbou tvořil třetí část vertikálního členění profilu počvy o ploše 25 m². Plocha výrubu největšího profilu se spodní klenbou dosahuje po odečtení plochy výrubu průzkumné štoly více než 140 m², včetně průzkumné štoly pak 165 m². Plocha výrubu jižního tunelu bez spodní klenby dosahuje 113 m², resp. 138 m² včetně plochy průzkumné štoly.

Alternativní způsob zahájení ražby jižního tunelu

Komplikace s nedostatečnými zábory pozemků v oblasti obou stavebních jam oddalovaly termín zahájení jejich odtěžování a tím i zahájení ražby obou tunelů. Proto zpracovatel realizační dokumentace navrhl po dohodě se zhotovitelem alternativní způsob zahájení ražby jižního, třípruhového tunelu, který byl následně předložen objednateli k odsouhlasení. Návrh spočíval v rozšíření profilu průzkumné štoly na plný profil kaloty tunelu a zahájení ražby z vytvořeného nárazí uvnitř horninového masivu. Odtěžování rubaniny i doprava materiálu do podzemí probíhaly přes průzkumnou štolu. Jako optimální místo pro zahájení ražby byla využita první jednostranná výhybna štoly, situovaná cca 80 m za pilotovou stěnou komořanského portálu. Po rozšíření profilu výhybny následovala dovršní ražba směrem k cholupickému portálu. V realizační dokumentaci představoval alternativní návrh pouze variantní řešení technologického postupu prací. Technologické třídy výrubu i standardní technologické postupy výstavby zůstaly zachovány.

Ražba jižního tunelu byla zahájena dne 2. 4. 2007 rozšířením výhyby průzkumné štoly (obr. 13). Nedostatek prostoru omezoval zpočátku výkony a ražba probíhala v technologické třídě výrubu 5a s modifikací bez spodní klenby. Délka záběru v kalotě se pohybovala do 1 m. Primární ostění výhybny štoly zasahovalo do profilu tunelu a muselo být po



Obr. 10: Zbytek ostění průzkumné štoly a mikropilotový deštník – portál Cholupice



Obr. 11: Primární ostění se spodní klenbou – plocha výrubu 165 m²

jednotlivých záběrech odstraněno. Rychlost ražby se pohybovala do 1 m za den. Po vytvoření dostatečného manipulačního prostoru a zlepšení geotechnických podmínek ve větší vzdálenosti od portálu se výkony zvyšovaly až na dva záběry kaloty za den s průměrnou rychlostí ražby 4,2 až 5,4 m/den. I když celkově vykazoval horninový masiv vysokou stabilitu, docházelo při prodloužení délky záběru k nežádoucím nadvýrubům, způsobeným lokálním vypadáním bloků horniny po plochách diskontinuit, a to jak na líci výrubu, tak z čelby (obr. 14).

Po proražení jižního tunelu dne 18. 3. 2008 lze konstatovat, že i přes jistá omezení, způsobená stísněným prostorem průzkumné štoly jako dopravní komunikace, umožnilo alternativní řešení zahájit ražbu tunelu před dořešením problémů v oblasti tunelových portálů a před odtěžením stavebních jam. Během dovršní ražby tunelu do

komořanského portálu došlo k vytěžení stavební jámy Cholupice na úroveň kaloty tunelů, navrtání mikropilotových deštníků, betonáží ochranných železobetonových věnců a přípravě portálu pro zahájení úpadní ražby. Odtěžování obou stavebních jam probíhalo po etapách s ochranným cílím po obvodu průzkumné štoly. Po vytěžení jam bylo nutné provést demolicí štoly a zahájit standardní ražbu od portálu, jak bylo původně plánováno.

Závěr

Dovršní ražba jižního tunelu alternativním způsobem s využitím průzkumné štoly jako dopravní cesty minimalizovala časový skluz na počátku harmonogramu. Před vytěžením stavebních jam tak bylo vyraženo bezmála 700 m jižního tunelu v kalotě a 400 m v jádře. Pozitivní přístup zástup-

ců investora i zhotovitele přispěl k překonání počátečních problémů a zahájení významné stavby tunelů stavby 513 silničního okruhu kolem Prahy. Ukončením ražeb obou tunelů skončila první etapa výstavby tunelů.

V současné době jsou vybetonovány a zpětně zasypány hloubené tunely Komořany, probíhá betonáž definitivního ostění ražených úseků obou tunelů. Paralelně s těmito činnostmi již běží betonáže kabelovodů, chodníků a dalších konstrukcí vnitřního vybavení tunelů tak, aby nic nebránilo zahájení provozu v roce 2010. Společně s otevřením úseku 513 dojde v příštím roce k zahájení provozu i na stavbách 512 a 514. Na obchvatu Prahy tak budou propojeny dálnice D1 a D5, čímž by mělo dojít k tolik očekávanému odlehčení stávajících komunikací.

Při stavbě tunelů Komořany se poprvé v České republice uplatňuje originální způsob oceňování ražby a způsobu zajištění stability výrubu, který umožňuje využití výhod NRTM a operativní změnu způsobu zajištění stability výrubu na základě skutečně zastižených geotechnických podmínek. Iniciátorem nového pojetí zadávacích podmínek zcela v duchu zásad NRTM je firma D2 Consult, která plně využívá svých dlouholetých zahraničních zkušeností z tunelářsky vyspělých zemí Evropy a která během realizace prováděla poradenskou činnost pro investora stavby, kterým je Ředitelství silnic a dálnic České republiky.

Investor: Ředitelství silnic a dálnic ČR;
Realizační dokumentace: IKP Consulting Engineers, s. r. o.;
Technická pomoc ŘSD ČR: D2 Consult Prague, s. r. o.;
Geomonitoring: Mott MacDonald;
Zpracovatel DSP/DZS: Pragoprojet, a. s.;
Realizace: Sdružení Vestec-Lahovice, vzniklé z firem SKANSKA-DS, a. s., SKANSKA-BS, a. s., a ALPINE MAYREDER Bau, GmbH;
Práce spec. zakládání: Zakládání staveb, a. s.;
Skanska CZ – Závod Speciální zakládání.

LIBOR MAŘÍK

foto autor a Libor Štěřba (2)

Článek vyšel též v časopise Zakládání 3/2008.

Ing. Libor Mařík (*1961)
vystudoval Stavební fakultu ČVUT,
obor konstrukce a dopravní stavby
se závěrečnou specializací na geotechniku.
Od roku 1992 pracuje ve firmě IKP
Consulting Engineers, v současné době
ve funkci vedoucího oddělení geotechniky
a podzemních staveb.



Obr. 12: Minimální vzdálenost tunelů u propojky č. 1



Obr. 13: Rozšiřování štoly v místě výhybny – zahájení ražby



Obr. 14: Nestabilita čelby při nepříznivém sklonu puklin