



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra geotechniky**

Pevná jízdní dráha v tunelech

Ballastless track in tunnels

Bakalářská práce

Jiří Horčíčka

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby
Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Jan Pruška

Praha 2016



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Horčíčka

Jméno: Jiří

Osobní číslo: 370773

Zadávající katedra: Geotechniky

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Pevná jízdní dráha v tunelech

Název bakalářské práce anglicky: Ballastless track in tunnels

Pokyny pro vypracování:

Obecná řešerše o typech pevných jízdních drah (PJD), použití PJD v ČR, porovnání jednotlivých typů PJD, doporučení pro aplikaci PJD v ČR.

Seznam doporučené literatury:

firemní materiály výrobců, zdroje na ITA AITES, databáze EIZ

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Dr. Ing. Jan Pruška

Datum zadání bakalářské práce: 24.2.2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2016

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

24.2.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Dr. Ing. Janu Pruškovi za jeho odborné vedení při vypracování bakalářské práce a za jeho cenné rady, připomínky a poskytnutí materiálů k tématu bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Lidmilovi Ph.D. za poskytnutí literatury a konzultací a také panu Ing. Radku Bernatíkovi z generálního ředitelství Správy železniční dopravní cesty s.o. za jeho čas a poskytnuté podklady a výstupy z měření na testovacích úsecích pevné jízdní dráhy.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat prof. Ing. Jiřímu Bartákovvi, DrSc., který mě svými přednáškami motivoval k dalšímu studiu geotechniky a problematiky podzemních staveb.



Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Dr. Ing. Jana Prušky a v seznamu použité literatury jsem uvedl veškerou použitou literaturu a další jiné zdroje.

V Praze, dne 10. 5. 2016

Jiří Horčíčka



Abstarkt (CZ)

Během posledních let se neustále zvyšují nároky na konvenční železniční tratě se štěrkovým kolejovým ložem. Snaha dosáhnout vyšších maximálních rychlostí a zatížení na nápravu dala vzniknout konstrukci pevné jízdní dráhy. Tato práce popisuje většinu systémů konstrukcí pevné jízdní dráhy, které postupně vznikali po celém světě. Ty nejpoužívanější z nich podrobně popisuje a především srovnává jejich použití v tunelech. Ukazuje konkrétní řešení problematiky pevné jízdní dráhy v tunelech s přihlédnutím na řešení úseků přechodových oblastí. Má přinést rešerši dosavadních způsobů navrhování a zkušeností s konstrukcí pevné jízdní dráhy pro budoucí použití v České republice.

Klíčová slova: pevná jízdní dráha, pevná jízdní dráha v tunelu, vysokorychlostní tratě, perspektivy vysokorychlostních tratí v České republice

Abstarct (EN)

In the last years an increase in train speed and axle load around the world and other challenges in the conventional ballasted track system gave birth to ballastless railway track system. This study examined the various ballastless track systems that are being used today all around the world. The most significant systems are analyzed in detail and compared for use in tunnels. It shows specific solutions of construction of slab track in tunnels with solving of problems with transition sections. It should bring the survey of most common ways of design and compare the experience of slab track construction types for future use in the Czech republic.

Keywords: ballastless track, slab track, ballast less track in tunnels, high-speed tracks, perspectives of high-speed tracks in the Czech republic



Obsah

Použité symboly a zkratky	8
Vymezení pojmů	9
Úvod.....	10
1 Pevná jízdní dráha.....	12
1.1 Co je to pevná jízdní dráha.....	12
1.2 Základní rozdělení PJD	13
1.3 Konstrukční vrstvy PJD	15
1.3.1 Podloží.....	15
1.3.2 Ochranná vrstva (protimrazová vrstva FSS).....	17
1.3.3 Hydraulicky stabilizovaná vrstva HGT.....	18
1.3.4 Betonová nosná deska BTS.....	18
1.4 Srovnání PJD a klasické konstrukce.....	19
1.5 Výhody a nevýhody PJD a KK s přihlédnutím na použití v tunelu.....	22
1.5.1 Snadná údržba.....	23
1.5.2 Životnost	23
1.5.3 Nízká konstrukční výška a tíha.....	23
1.5.4 Vytížitelnost a spolehlivost.....	24
1.5.5 Opravy	24
1.5.6 Emise hluku a vibrací	24
1.5.7 Možnost využití koleje jako vozovky	25
1.5.8 Zajištění pružnosti koleje	25
1.5.9 Možnost většího převýšení koleje	26
1.5.10 Ovlivnění konsolidací podloží	26
1.5.11 Možnost „zelené trati“	26
1.6 Přechodová oblast.....	27
1.7 Historie PJD	29
2 Současný stav použití PJD	31
2.1 Současný stav ve světě.....	31
2.2 Současný stav v Evropě.....	32



2.3	Současný stav v České republice	33
2.3.1	Úsek PJD na trati Česká Třebová - Přerov.....	33
2.3.2	Úsek PJD v tunelu na trati Vsetín - hranice ČR/SR.....	34
2.3.3	Úsek PJD v tunelu na trati Rokycany - Plzeň	38
3	Popis vybraných systémů s přihlednutím na použití v tunelu	39
3.1	Rheda 2000	39
3.2	ÖBB-Porr.....	43
3.3	Porovnání pro použití v tunelu.....	47
4	Pevná jízdní dráha v tunelech - shrnutí.....	48
4.1	Výhody použití PJD v tunelu	48
4.2	Ekonomické srovnání PJD a KK pro použití v tunelu.....	50
4.3	Přechodová oblast.....	53
4.4	Konkrétní nově dokončené a právě realizované projekty	54
4.4.1	Tunel Turecký vrch - Slovensko	54
4.4.2	VRT Projekt 8 - Německo.....	54
4.4.3	Gotthardský úpatní tunel - Švýcarsko	55
5	Perspektivy PJD v tunelech v ČR	57
Závěr.....		60
	Literatura a podklady.....	62
	Seznam obrázků	64
	Seznam tabulek	65

Přílohy:

Příloha č. 1 - Výkres přechodové oblasti Střelenského tunelu [9]

Příloha č. 2 - Výkresy příčných řezů Střelenského tunelu [9]

Příloha č. 3 - Graf skutečného stavu PPK ve Střelenském tunelu [9]



Použité symboly a zkratky

A	plocha
b	šířka
BTS	betonová nosná vrstva
$C_{(ef)}$	soudržnost (efektivní)
E	Youngův modul pružnosti
E_{def}	modul přetvárnosti
FSS	ochranná vrstva proti mrazu
GPK	geometrická poloha koleje
HGT	hydraulicky stmelená vrstva
h	výška
I	moment setrvačnosti
KK	klasická konstrukce koleje se štěrkovým kolejovým ložem
LCC	náklady na živností cyklus stavby (life cycle costs)
NRTM	nová rakouská tunelovací metoda
PJD	pevná jízdní dráha
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty s.o.
TBM	tunnel boring machine (plnoprofilový tunelovací stroj)
TK	temeno kolejnice
VRT	vysokorychlostní trať
ŽSp	železniční spodek
ŽSv	železniční svršek
ν	Poissonovo číslo
τ	smykové napětí
$\Phi_{(ef)}$	úhel vnitřního tření (efektivní)



Vymezení pojmů

Na úvod definujeme několik pojmů, které se v práci vyskytují.

Pevná jízdní dráha (PJD) je tvořena konstrukcí železničního svršku bez kolejového lože a konstrukcí železničního spodku v souvislé délce zpravidla větší než 150 m, u které nosnou konstrukci tvoří a přenos sil ze zatížení provozem do podloží zajišťuje nosná deska PJD. Tento pojem se nevztahuje na konstrukce na mostech s přímo pojížděnou mostovkou a s mostnicemi. V angličtině **Slab track / Ballastles track**, v němčině **Feste Fahrbahn** a **Voie sur dalle** ve francouzštině [2]

Kolej s kolejovým ložem je konstrukce železničního svršku, která sestává z kolejového roštu uloženého v kolejovém, zpravidla štěrkovém loži (také klasická konstrukce železničního svršku dle TNŽ 01 0101-1). [2]

Přechodová oblast je taková oblast, ve které je vytvořen pozvolný přechod mezi konstrukcemi rozdílné tuhosti. [2]

Přechodová oblast tunelu je speciální typ přechodové oblasti železničního spodku. Jedná se o přechod zemního tělesa do tunelu a opačně. [2]



Úvod

Žijeme v moderní době a v moderní společnosti, kde je stále větší důraz kladen na globalizaci, rychlost komunikace, pohodlí obyvatel, menší dopady lidské činnosti na životní prostředí a udržitelnost rozvoje. Chceme vše rychleji, levněji a pohodlněji. Jednou z oblastí, kde jsou tyto snahy nejvíce evidentní je doprava. Doprava informací, zboží a osob, kterou jsme dnes schopni provádět mnoha způsoby a bez které si už náš život ani nedokážeme představit. O tom zda je ten, či onen způsob dopravy efektivnější, ekologičtější nebo pohodlnější se bude vždy vést diskuze a budou se vymýšlet nové technologie a možnosti, jak dopravu uskutečňovat. Jedním ze způsobů, který má a bude mít v budoucím rozvoji důležité místo, je ale bezesporu doprava železniční.

Železniční doprava prošla za svou historii obrovským vývojem a pokrokem. Neustále rostoucí ekonomika a konkurenční boj žene tento vývoj rychle dopředu. A právě technologie používané v železniční dopravě splňují většinu požadavků moderní společnosti. Většina nejvyspělejších zemí světa používá vysokorychlostní železniční spojení a stále důležitější je i nákladní doprava po železnici. Po Evropě začíná vznikat síť vysokorychlostních tratí nejen pro osobní přepravu a železnice začíná konkurovat například i letecké dopravě nejen cenou ale i časem, ekologickým dopadem na prostředí a komfortem cestujících. Takzvaná "železniční Hedvábná stezka" pro přepravu zboží mezi Evropu a Čínou začíná být efektivnější než lodní doprava a stále větší množství zboží je přepravováno po železnici. Aby mohly být uskutečněny tyto rostoucí nároky na železnici navrhují se nové technologie nejen v oblasti strojího průmyslu, ale také ve stavebních technologiích, především v konstrukcích samotné železniční tratě. Jedním z nejmodernějších přístupů ke stavbě železničních tratí je konstrukce pevné jízdní dráhy, kterou se zabývá tato práce.

Železniční tratě s pevnou jízdní dráhou už jsou v provozu ve většině okolních zemí, a pokud chce Česká republika zůstat konkurenceschopná nejen z hlediska ekonomiky, ale i životní úrovně, bude muset podobné projekty začít realizovat také.



Konstrukce pevné jízdní dráhy už se vyvíjí více jak 40 let a za tu dobu po světě vzniklo na 34 systémů řešení této problematiky a velké množství jejich variací. Tato práce přináší rešerši a rozdělení základních přístupů ke konstrukci pevné jízdní dráhy, analyzuje jejich výhody a nevýhody a mapuje aktuální stav ve světě, Evropě i v České republice. Porovnává konstrukci pevné jízdní dráhy s klasickou konstrukcí kolejového lože a pokouší se ověřit předpokládané výhody pevné jízdní dráhy jako jsou minimální požadavky na údržbu a ekonomická návratnost při dlouhé životnosti podle zkušeností z již realizovaných projektů. Dále porovnává jednotlivé systémy při použití v tunelech. Tato přehledná rešerše může usnadnit rozhodování o použití pevné jízdní dráhy při budoucích projektech v České republice.



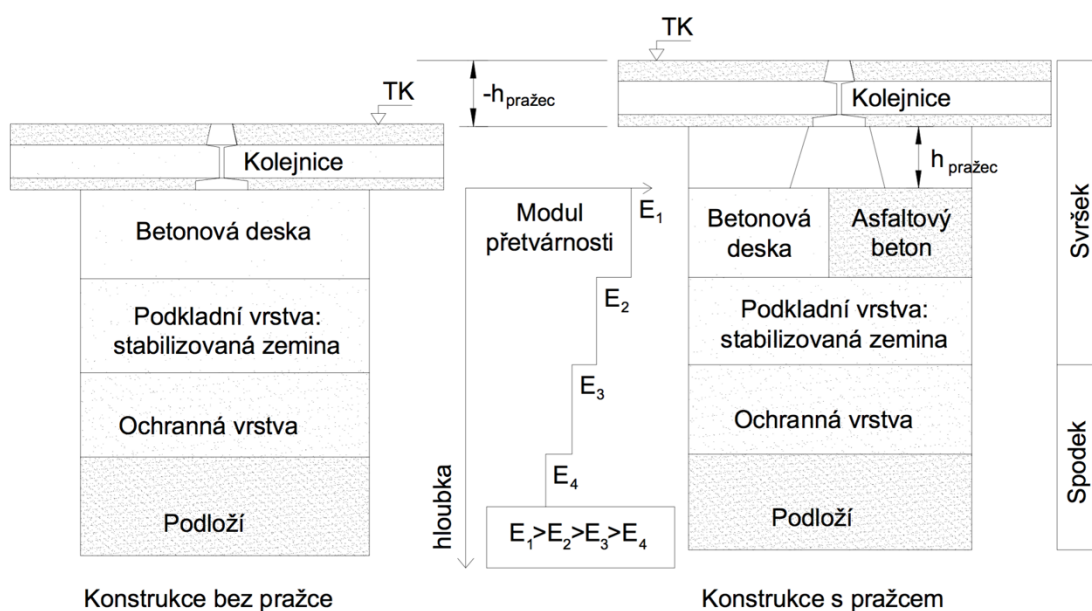
1 Pevná jízdní dráha

1.1 Co je to pevná jízdní dráha

Pevná jízdní dráha je typ konstrukce železničního svršku, kde je kolejové lože nahrazeno tuhou konstrukcí, například železobetonovou deskou. Kolejnice je připevněna přímo k betonové desce nebo k betonovému pražci, který je do betonové desky vetknut. Vzhledem k uspořádání je tuhost konstrukce prakticky konstantní. Rektifikace a pružnost upevnění je zajištěna pouze v uzlech upevnění. Výhodou pevné jízdní dráhy je, že je možné lépe tyto parametry splnit, protože tolerance materiálových vlastností jsou menší a jejich změny se v průběhu životnosti konstrukce téměř nemění. Konstrukce pevné jízdní dráhy je složena z několika konstrukčních vrstev (obr. 1), u nichž se předpokládá, že jejich modul pružnosti (přetvárnosti) směrem vzhůru roste podle vztahu.

$$E_1 > E_2 > E_3 > E_4.$$

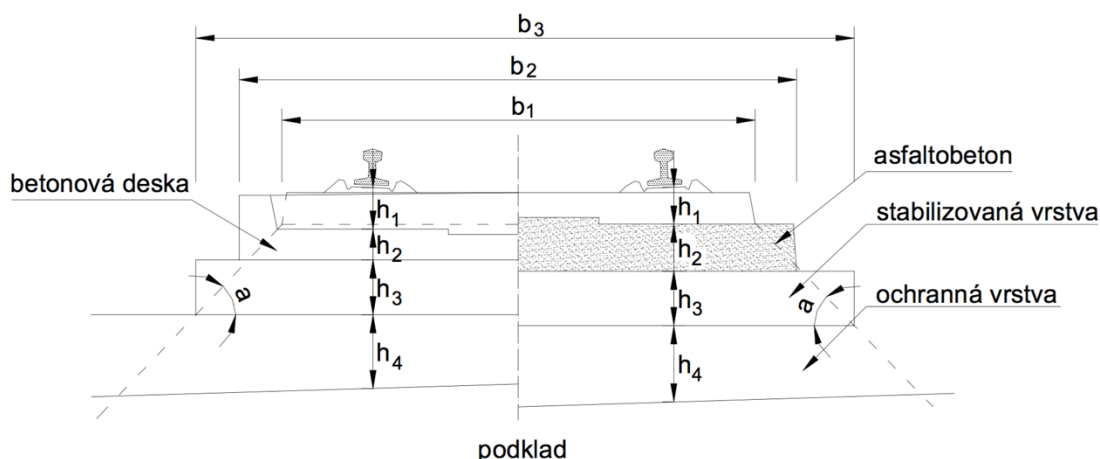
Celá konstrukce se většinou skládá z pěti základních vrstev, viz obr. 1. Jsou to zemní pláň, ochranné nenamrzavé konstrukční vrstvy, hydraulicky zpevněné konstrukční vrstvy z minerální směsi, železobetonové nebo asfaltové desky, (pražců), kolejnic.



Obr. 1: Profil konstrukce PJD bez pražců a s pražci [1]



Při přenosu zatížení bylo zjištěno, že roznášecí úhel se pohybuje kolem 45° (obr. 2). U pevné jízdní dráhy se šířka v úrovni pražců průměrně uvažuje 2,20 m. Každá nižší vrstva je z tohoto důvodu širší, šířka stabilizované vrstvy vychází při tloušťce vrstvy 30 cm asi 3,20 m.



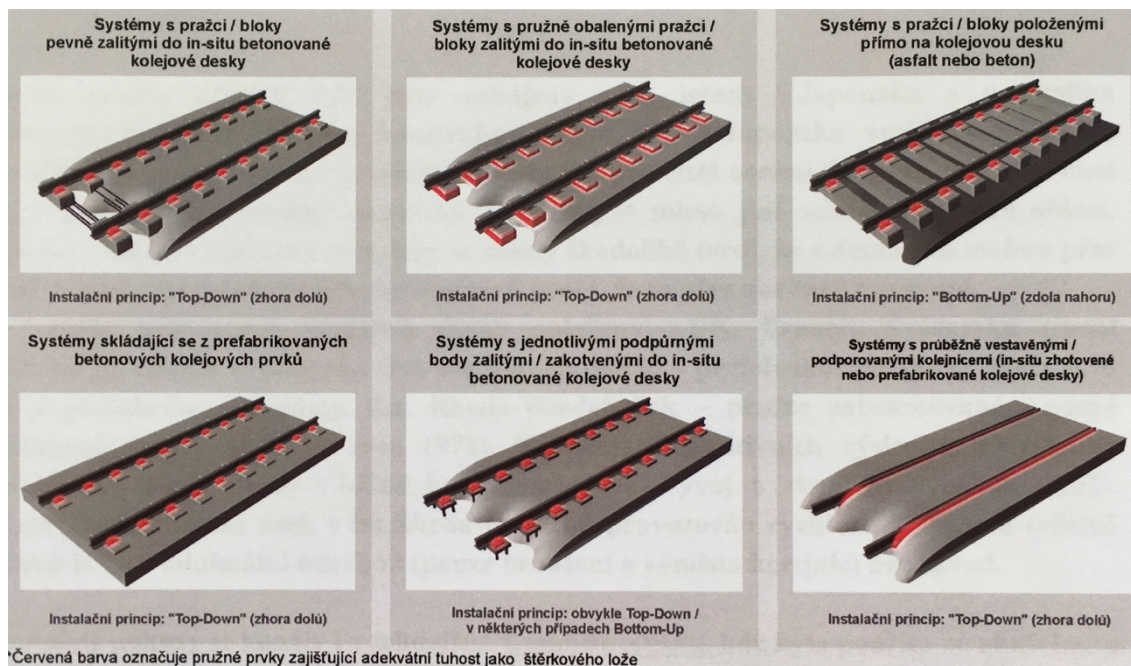
Obr. 2: Šířka pevné jízdní dráhy a roznášecí úhel [1]

1.2 Základní rozdělení PJD

Existuje mnoho typů a výrobců systémů pevných jízdních drah, které se neustále vyvíjejí. V následujícím přehledu je uvedena většina z dnes používaných typů. Podrobněji se bude práce zabývat pouze vybranými typy a pouze systémy s betonovou deskou.

Z hlediska technologie rozlišujeme následující typy:

- PJD z monolitické desky se zabetonovanými příčnými pražci
- PJD z monolitické desky se zabetonovanými příčnými dvoublokovými pražci
- PJD s velkoplošnými pražci uloženými na betonové nebo asfaltové desce
- PJD z velkoplošných prefabrikovaných panelů
- PJD s dodatečným kotvením upevňovacích prvků do předem zhotovené betonové desky
- PJD s vestavnými, kontinuálně podepřenými kolejnicemi



Obr. 3: Základní rozdělení PJD z hlediska technologie provádění [16]

Tab. 1: Rozdělení konstrukčních typů a jejich výrobců

Pevná jízdní dráha						
Kolejnicové podpory					Kontinuální podepření kolejnice	
	S pražci nebo bloky		Bez pražců nebo bloků			
Charakteristika	Pražce nebo bloky vestavěné do desky	Pražce nebo bloky uložené na desce	Prefabrikované betonové desky	Monolitické betonové desky in-situ	Vestavěná kolejnice	Kontinuálně podepřená kolejnice s upevněním
Kolej	RHEDA ZÜBLIN HEITKAMP SBB STEDEF	ATD BTD GETRAC SATO WALTER	ÖBB PORR BÖGL SHINKANSEN	HOCHTIEF FFC BES BTE- BWG/WBG BTE-HILTI	EDILON ERS	COCON ORTEC SAAR GUMMI



1.3 Konstrukční vrstvy PJD

Použití pevné jízdní dráhy vyžaduje pečlivou přípravu, dokonalý geotechnický průzkum a rozsáhlá geodetická měření a sledování při stavbě. Konstrukční vrstvy musí být schopny přenášet zatížení, musí být dostatečně homogenní po délce a podloží nesmí vykazovat významná sednutí.

1.3.1 Podloží

Geotechnický průzkum pro PJD musí poskytnout inženýrskogeologické, hydrogeologické, hydrologické a geotechnické podklady pro potřeby projektování a realizace stavby PJD. Pro novostavby musí být vrty umístěny v ose budoucího zemního tělesa ve vzdálenostech max. 50 m. V úsecích s geologicky stejnými poměry může být vzdálenost vrtů zvětšena až na 100 m. Hloubka vrtů je minimálně 6,00 m pod úrovní terénu, v místech zářezu minimálně 6,00 m pod navrhovanou niveletou koleje. Geologické poměry musí být, zejména v územích náchylných ke vzniku poruch a deformací (území s tektonickými poruchami apod.), ověřeny do vzdálenosti 100 m od osy budoucího zemního tělesa, minimálně však do vzdálenosti 60 m od vnější hrany budoucího zemního tělesa vhodnými geotechnickými metodami.

Požadovaná míra zhutnění a únosnost jednotlivých vrstev tělesa železničního spodku je uvedena v tabulce 2. Předepsané hodnoty musí být splněny.[2]

Tab. 2: Minimální požadovaná únosnost a míra zhutnění [2]

Rychlost [km·h ⁻¹]	Základová spára a technologické vrstvy zemního tělesa		Zemní pláš		Konstrukční vrstvy/pláš tělesa ŽSp	
	Modul přetvárnosti E [MPa]	Zhutnění I _p /PS [- / %]	Modul přetvárnosti E ₀ [MPa]	Zhutnění I _p /PS [- / %]	Modul přetvárnosti E _e /E _{PL} [MPa]	Zhutnění I _p [-]
V ≤ 160	40	0,95/100	60	1,00/100	70/80	0,90
160 < V ≤ 200	60	0,98/100	80	1,00/100	90/100	0,95
V > 200	80	1,00/100	100	1,00/100	110/120	1,00



Těchto modulů přetvárnosti lze dosáhnout dostatečným zhutněním, stabilizací zemin, pomocí vibrovaných pilot nebo celkovou výměnou podloží za únosnější. Zemní těleso případně jeho podloží musí být homogenizováno do hloubky min. 2 m pod zemní pláň a může vykazovat pouze povolené rychlosti sedání, navíc musí být dostatečně zkonsolidované. Konstrukce železničního svršku PJD se nesmí zřizovat na zemním tělese, které nedosáhlo stupně konsolidace alespoň 95% z celkové konsolidace. Od dosažení stupně konsolidace 80% z celkové konsolidace se sleduje rychlost sedání zemního tělesa (měřeno na zemní pláni nebo na pláni ŽSp), která nesmí překročit hodnotu:

- 3 mm/měsíc u novostaveb,
- 2 mm/měsíc u stávajících tratí.

Je nutné sledovat celkovou rovnoměrnost poklesu zemní pláně v trase a v čase. Pokud není dosažena dostatečná konsolidace v požadovaném čase, používají se způsoby zvláštního zakládání, mezi které patří: šterkové piloty, geodrény, vakuování, konsolidační rýhy, dynamická konsolidace, injektáž, hloubková stabilizace, zmrazování, hloubkové odvodnění apod. U zemního tělesa, případně jeho podloží, tvořeného horninami nebo únosnými a propustnými zeminami, se na základě geotechnického průzkumu zvaží použití homogenizace do hloubky 2,0 m. [2]

Po dokončení pevné jízdní dráhy je přípustné pouze sedání konstrukce, které je způsobeno zatížením od dopravy a konsolidací podloží, a které může být vyrovnáno pomocí rektifikace upevňovadel. Požití pevné jízdní dráhy tedy může být omezeno nebo vyloučeno v následujících případech:

- v poddolovaném území
- v území s dlouhodobými pohyby podloží (s nestabilním podložím)
- v území s vysokou hladinou podzemní vody, tj. je-li trvale výše než 1,5 m pod temenem kolejnice
- v sesuvném území
- v území tvořeném mocnými organickými vrstvami (rašelina, bahnité náplavy, atd.)



- v území tvořeném prosedavými zeminami
- v území s vyskytujícími se tektonickými poruchami
- v inundačním území (při povodni nebo záplavě nesmí dojít k ohrožení stability svahu, podemletí zemního tělesa atd.) [2]

Pro kolej s pevnou jízdní dráhou je tedy třeba počítat s větším rozsahem úprav zeminy zemního tělesa v náspu i v zářezu a s potřebou snížení hladiny podzemní vody v daleko větším rozsahu než pro klasickou konstrukci se štěrkovým kolejovým ložem. To samozřejmě vede k větším materiálovým a pracovním nákladům.

1.3.2 Ochranná vrstva (protimrazová vrstva FSS)

Tato konstrukční vrstva slouží ke zvyšování únosnosti tělesa železničního spodku PJD, chrání zemní pláň před nepříznivými účinky mrazu a slouží k odvedení srážkové a kapilární vody do odvodňovacího zařízení. Dále slouží k odstupňování modulů přetvárnosti mezi stmelenými vrstvami a zemní plání a je tvořena nestmeleným nenamrzavým materiálem z štěrkopísku s propustností $k \geq 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ jako ochrana proti účinkům mrazu. Minimální tloušťka vrstvy s těmito parametry je 0,30 m. Tato vrstva také plní funkci odvedení vody z tělesa železničního spodku. Díky kapilárnímu působení brání pronikání vody do stmelených vrstev ležících nad FSS. Musí být tvořena materiálem s propustností $k \geq 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a provádí se v příčném sklonu 5% a její tloušťka je dalších minimálně 0,40 m. Pokud tyto parametry splňuje už samotná zemní pláň zřizuje se ochranná vrstva pouze 0,30 m. Pro zajištění ochrany zemní pláně před nepříznivými účinky mrazu musí být zajištěno, že hloubka h_{pr} musí být menší nebo rovna součtu tloušťek navrhovaných konstrukčních vrstev $h_{sp,i}$ (tloušťky konstrukčních vrstev musí být přepočteny na ekvivalentní tloušťku vrstvy ze štěrkopísku). Voda ze zemního tělesa a zemní pláně se odvádí příčně do stran, odkud musí být odvedena co nejdál dle místních podmínek. Pokud není možnost odvedení vody od zemního tělesa, jako například v tunelu, zřídí se odvodnění podélné. [2]

Předpis SŽDC přesně neuvádí požadovanou hodnotu modulu přetvárnosti na této vrstvě. V Německu je na vrstvě FSS předepsaný modul přetvárnosti



$E_{v2} \geq 120$ MPa u novostaveb a modul přetvárnosti $E_{v2} \geq 100$ MPa u rekonstrukcí. Pro ověření zda je modul dosažen v celé vrstvě rovnoměrně se používá plošná dynamická kontrola. [1]

Je třeba si uvědomit, že hodnoty měřeny metodikou DB AG nekorespondují s hodnotami měřenými metodikou používanou v ČR. Neexistuje ani žádný jednoduchý přepočet.

1.3.3 Hydraulicky stabilizovaná vrstva HGT

V konstrukci PJD se zpravidla používá tato stabilizovaná vrstva mezi ochrannou vrstvou a betonovou (asfaltovou) deskou. Tato vrstva slouží hlavně k roznosu dynamického zatížení do podloží a znovu k odstupňování modulů přetvárnosti mezi jednotlivými vrstvami. Používá se směs drceného kameniva, písku a jemné frakce spojené většinou portlandským cementem (cca 110 kg/m^3), která je pokládána in situ klasickým finišerem používaným v silničním stavitelství v jedné nebo více vrstvách, které jsou plně spojené. Vzhledem k návrhu roznášecího úhlu 45° vychází minimální šířka HGT 3,80m. Tloušťka vrstvy včetně FSS nemá být nižší než 0,70 m.

V tunelech se tato vrstva s výhodou nevytváří.

1.3.4 Betonová nosná deska BTS

Betonová nosná deska je vyztužena podélnou a příčnou výztuží se stupněm vyztužení 0,8 – 0,9 %, podélná výztuž se svařuje a je třeba ji v určitých vzdálenostech odizolovat. Tloušťka desky se odvíjí od použitého konstrukčního systému, většinou dosahuje cca 200 mm, minimálně však 180 mm. Používá se beton třídy C30/37. Deska je vytvářena in situ nebo pomocí prefabrikovaných dílů, které jsou dle typu konstrukce montovány na stavbě

Přesnost zhotovení nosné desky PJD musí zaručit splnění mezních stavebních odchylek geometrických parametrů koleje GPK a to bez uvažování využití regulací v upevnění. Přesnost zřízení betonové desky bývá většinou ± 2 mm. Toto



platí zejména u konstrukčních systémů PJD bez pražců, kde se v desce vytváří po 2 m dilatační spáry. Naříznutím desky se dosáhne kontrolovaného vzniku trhlin.

U systémů PJD se zabetonovanými pražci se betonová deska zřizuje bez dilatačních spár, jedná se o desku s tzv. „řízeným vznikem trhlin“. Povoleny jsou příčné trhliny v desce ve vzdálenosti cca 0,5-2,0 m s maximální šířkou spáry 0,5 mm (při větší šířce trhliny je potřeba provést sanační opatření k zamezení vnikání srážkové vody) Betonová deska může být zatížena po dosažení minimální pevnosti v tlaku 12 MPa.

V tunelech je možné dle konkrétních podmínek zmenšit požadovanou tloušťku desky, což umožní zvýšení průjezdného profilu a úsporu materiálu.

Tab. 3: Souhrn kritérií pro jednotlivé vrstvy [2]

Vrstva	Nová trať	Rekonstrukce	Tloušťka
BTS	Beton: C30/37 vyztužení: 0,8-0,9% beton. průřezu osově souměrné		cca 200 mm
HGT	Nutnost a dimenzování vychází z návrhu		Cca 300 mm
FSS	$E_{v2} = 120 \text{ MPa}$	$E_{v2} = 110 \text{ MPa}$	Cca 300 mm
Zemní těleso	$E_{v2} = 60 \text{ MPa}$	$E_{v2} = 40 \text{ MPa}$	

1.4 Srovnání PJD a klasické konstrukce

V klasické konstrukci železničního svršku jsou kolejnice upevněny na dřevěné nebo betonové pražce. Pražce jsou uloženy v kolejovém štěrkovém loži, které zajišťuje přenos zatížení od vozidel do podloží a geometrickou polohu kolejnicových pásů. Tento koncept se v principu nezměnil od dob Viktoriánské Anglie, i přesto bylo praktickými zkouškami prokázáno, že klasický železniční svršek zajišťuje bezpečný provoz železničních vozidel pro rychlost jízdy až



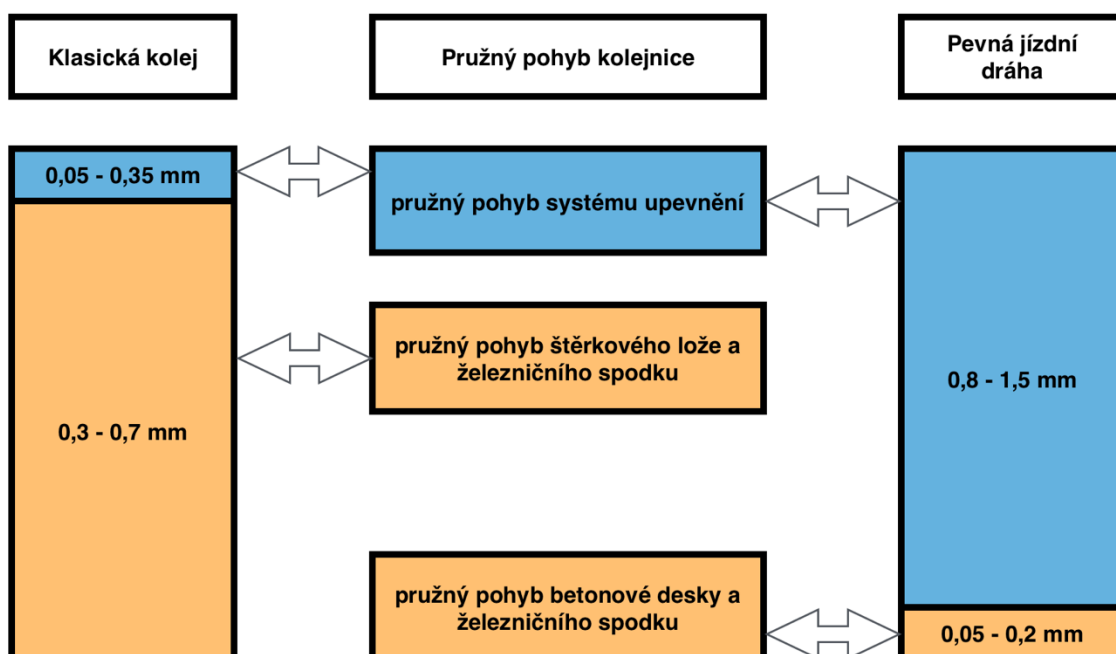
500 km·h⁻¹. [5] K základním nevýhodám klasické konstrukce s kolejovým ložem patří postupná degradace kolejového lože, způsobená opakovaným dynamickým namáháním od kolejové dopravy. Štěrk postupně ztrácí svou ostrohrannost, rozdrčené úlomky zhoršují zrnitost kolejového lože a snižují propustnost jeho nižší části. Pražcové podloží musí zajišťovat geometrickou polohu kolejnicových pásů i v nepříznivých klimatických podmínkách. Navíc ve štěrkovém loži musí vznikat pouze pružné deformace. Toho lze přirozeně v reálném provozu docílit jen častou a pravidelnou údržbou, podbíjením, čištěním, recyklací, případně výměnou pražcového podloží. Dnešní technologie už dovolují provádět tuto údržbu případně výměnu velice rychle a efektivně. I samotná výstavba klasické konstrukce železničního svršku je velice rychlá a levnější než stavba pevné jízdní dráhy.

V konstrukci pevné jízdní dráhy zajišťuje přenos zatížení do podloží a udržení geometrické polohy kolejnicových pásů tuhá železobetonová deska. To přináší značné výhody hlavně v údržbě, kdy se trať stává prakticky bezúdržbovou. Nedochozí zde k rozpadu geometrické polohy koleje a není třeba provádět podbíjení ani čištění kolejového lože. Nevýhodou je, že konstrukce pevné jízdní dráhy musí být vybudována naprosto přesně, protože dodatečná rektifikace výškové a směrové polohy koleje je na této konstrukci možná jen v omezené míře. Proto jsou používána speciálně upravená upevnění kolejnic, která jednak umožňují právě provedení určité drobné rektifikace polohy koleje a jednak svou konstrukcí nahrazují pružnost klasického kolejového lože. Pevná jízdní dráha tedy vyžaduje železniční spodek prakticky s nulovým sedáním (nejlépe tento požadavek splňují specifické úseky trati jako jsou tunely a mosty). Klasická kolej ve štěrkovém loži vyžaduje zemní těleso s maximálním sedáním 2 cm na délku 10 m, ale tyto požadavky jsou pro pevnou jízdní dráhu samozřejmě nevyhovující.

Srovnání podílů jednotlivých prvků koleje na celkové pružnosti ukazuje následující tabulka. Celková pružnost je přibližně stejná jak u klasické konstrukce, tak u pevné jízdní dráhy (liší se samozřejmě pro jednotlivé typy), ale jde jasně vidět, že u klasické konstrukce se na celkové svislé pružnosti podílí hlavně štěrkové lože a u PJD prakticky výhradně systém upevnění.



Tab. 4: Srovnání podílů na celkové pružnosti koleje u KK a PJD [1]



Problémem konstrukce pevné jízdní dráhy je její větší hlučnost, která se odstraňuje rovněž speciálními technickými úpravami v konstrukci upevnění nebo osazováním absorbérů na kolejnici. Další možností je zasypávání konstrukce či osazování speciálních protihlukových panelů. Hlavní nevýhodou jsou vyšší investiční náklady na výstavbu PJD, které se ale mohou vrátit delší životností koleje a malou potřebou údržby.



1.5 Výhody a nevýhody PJD a KK s přihlédnutím na použití v tunelu

Tab. 5: Srovnání výhod a nevýhod PJD a KK [1,2,3,4,5,6,7]

	PJD	Klasická konstrukce
Výhody	<ul style="list-style-type: none">- Údržba- Životnost- Nízká konstrukční výška- Nízká konstrukční tíha- Dobrá dostupnost a minimum výluk- Spolehlivost a vytižitelnost- Jednoduché drobné opravy PPK- Nižší hodnoty vibrací ve spodní stavbě- Možnost pojiždění záchrannými vozidly- Zajištění pružnosti koleje- Možnost většího převýšení koleje- Možnost použití brzdění vířivými proudy- Vyšší jízdní komfort- Možnost použití „zelené tratě“- Lepší estetický dojem	<ul style="list-style-type: none">- Nižší investiční náklady (nemusí platit pro tunely)- Levnější opravy- Efektivní a rychlá technologie oprav- Dlouholeté zkušenosti- Požadavky na konsolidaci podloží- Kratší doba výstavby- Nižší emise hluku- I přes výhody PJD lze úspěšně používat pro VRT (viz Francie)
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none">- Vyšší investiční náklady (nemusí platit pro tunely)- Vyšší emise hluku (není potřeba řešit u tunelů)- Nákladné větší opravy- Nepříznivé ovlivnění konsolidací zemního tělesa (neplatí pro tunely)- V případě vykolejení nákladné opravy- Přechodové oblasti- Delší doba výstavby- Delší doba rozsáhlejších oprav	<ul style="list-style-type: none">- Ztráta prostorové polohy koleje v podélném i příčném směru- Kratší životnost- Nutná častá údržba- Vyšší konstrukční výška- Vyšší konstrukční hmotnost- Degradace kolejového lože- Omezená hodnota příčného odporu = nižší nevyrovnané příčné zrychlení- Poškozování kolejnic a kol odlétajícími zrny kolejového lože- Zarůstání vegetací- Prašnost (nejen v tunelech)



Podrobné srovnání výhod a nevýhod PJD a klasické konstrukce s kolejovým ložem je rozepsáno v následujících bodech.

1.5.1 Snadná údržba

Systém pevné jízdní dráhy nepotřebuje, na rozdíl od klasické konstrukce železničního svršku, skoro žádnou údržbu. Díky pevnému uložení kolejnicových pásů v tuhé desce nepotřebuje kolej častou kontrolu a obnovu geometrické polohy v podobě podbíjení a zároveň není potřeba čistit, případně obnovovat šterkové lože, na které je potřeba kvalitní kamenivo. Údržba se eliminuje prakticky pouze na diagnostiku, broušení a případnou výměnu kolejnic.

Nízké požadavky na údržbu sebou přináší i minimální nutnost pohybu pracovníků po trati, tudíž se zvyšuje i bezpečnost, na což je kladen důraz především v tunelech. Existují příklady úseků s pevnou jízdní dráhou, kde nebyla potřeba žádná větší oprava 25 let. [4]

1.5.2 Životnost

Klasická konstrukce železničního spodku je většinou navrhovaná na 15 let, poté je vyžadovaná rekonstrukce. Konstrukce pevné jízdní dráhy se navrhuje na životnost minimálně 60 let. Nedochozí k degradaci šterkového kolejového lože v důsledku drcení zrn a znečištění, případně pronikání jemnozrnných částí z podloží.

1.5.3 Nízká konstrukční výška a tíha

Většina systémů konstrukcí PJD vyžaduje výrazně nižší konstrukční výšku než jejich ekvivalent provedený klasickou konstrukcí železničního svršku. Toho se dá s výhodou využít na specifických úsecích tratě, především na mostech a v tunelech. Při vhodných geologických podmínkách může být tloušťka desky v tunelu pouze 0,15 m, což může výrazně zmenšit průřez tunelové trouby u nových tunelů, případně dovoluje zřídit elektrifikaci či zvýšit ložnou míru u tunelů stávajících. Zmenšení plochy teoretického výrubu samozřejmě přináší snížení nákladů na výstavbu tunelů.



1.5.4 Vytížitelnost a spolehlivost

Díky spolehlivosti a minimálním požadavkům na údržbu a obnovu tratí prováděných konstrukcí PJD se zároveň eliminují výluky na trati během nutných oprav a tím se zvyšuje vytížitelnost těchto traťových úseků. Veškerá nutná údržba je možná v omezených nočních přerušeních provozu.

1.5.5 Opravy

Relativně jednoduché úpravy polohy kolejnic lze provádět ve svislém i příčném směru v uzlech upevnění. V rozmezí cca ± 5 mm v příčném a ± 25 mm ve svislém směru (± 10 mm v příčném směru a -4mm až + 76 mm ve svislém směru při použití upevnění kolejnic Systému 300). [10] Při potřebě větších úprav GPK jsou opravy výrazně časově, finančně i technologicky náročnější než obdobné opravy v klasické konstrukci. To stejné platí pro opravy po vykolejení.

1.5.6 Emise hluku a vibrací

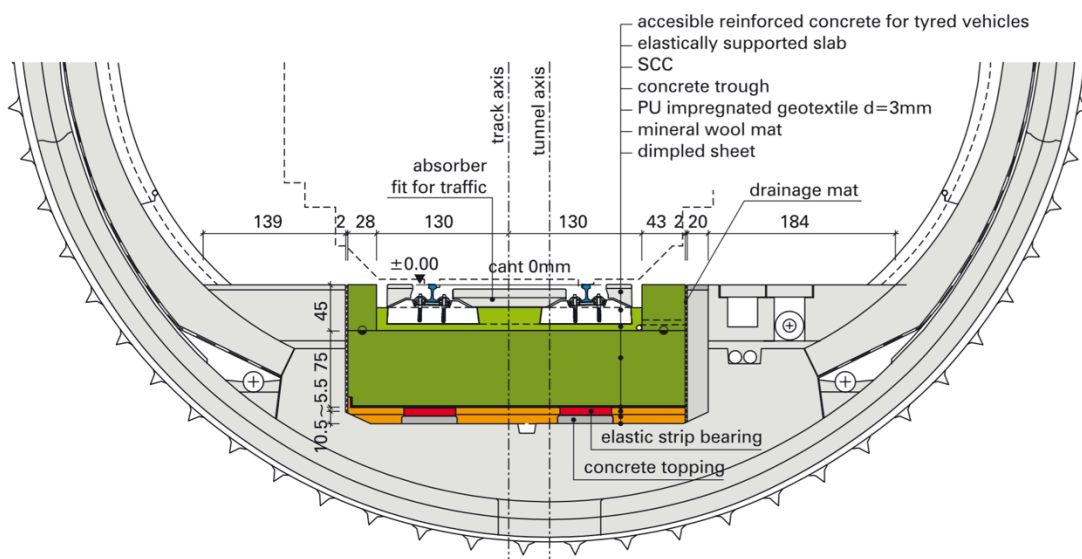
I přesto, že vzhledem k povrchu PJD má tato konstrukce větší emise hluku než klasická konstrukce, lze tento problém řešit různými opatřeními, například použitím protihlukových panelů. Naopak řešení přenosu vibrací do podloží je u PJD jednodušší z důvodu možnosti použití „mass spring“ systému (obr. 5).



Obr. 4: Kolejový absorbér hluku BRENS® [vl. fotoarchiv 29.4.2016]



Mass spring systém umožňuje „plovoucí“ uložení koleje a tím zamezuje přenosu vibrací do podloží. Existuje mnoho technologií a způsobu provedení této konstrukce.



Obr. 5: Mass spring systém v konstrukci ÖBB-Porr [8]

1.5.7 Možnost využití koleje jako vozovky

Možnost poježdění konstrukce koleje záchrannými silničními vozidly lze s výhodou využít hlavně v tunelech, kde je kladen velký důraz na interoperabilitu a možnosti přístupu do tunelu v případě havárií. V závislosti na použitém systému PJD dochází ke snížení nepříjemných vibrací při poježdění koleje vozidly. V tunelech je kolej zároveň pohodlnou únikovou cestou pro cestující.

1.5.8 Zajištění pružnosti koleje

Základním rozdílem PJD oproti klasické konstrukci je absence šterkového lože, kde se šterk velkou měrou podílí na celkové svislé pružnosti koleje. V konstrukci pevné jízdní dráhy je potřeba chybějící pružnost nahradit. Nejčastěji se tak děje pomocí vkládání pružných vrstev přímo do uzlu upevnění nebo přímo pod ložnou plochu pražců či nosných panelů. Pružnost koleje pevné jízdní dráhy je volena podobně jako u dobře udržované klasické koleje, tedy u vozidla se zatížením na nápravu 22,5 t je pružný pokles cca 1,5mm. Těmto pružným dílům je tedy věnována zvláštní pozornost a jejich výhodou ve srovnání s klasickou kolejí je, že tyto prvky mohou požadované parametry plnit zcela rovnoměrně po celé délce koleje a prakticky po celou dobu životnosti bez podstatné změny.



1.5.9 Možnost většího převýšení koleje

U klasické konstrukce je hodnota převýšení omezená na 150 mm na rozdíl od PJD, kde je přípustná hodnota převýšení vyšší. Navíc u KK je také nižší hodnota příčného odporu podmiňující max. nevyrovnané příčné zrychlení (Prud'homme) [5]. Díky možnosti použití většího převýšení koleje je možné využít vyšší návrhovou rychlost na stávajících tratích nebo použít menší poloměry oblouků při trasování nových tratí, což vede k úspoře nákladů.

1.5.10 Ovlivnění konsolidací podloží

Tato problematika byla podrobně popsána v kap. 1.3.1. Tato nevýhoda však většinou neplatí pro použití PJD v tunelech, kde tuhé dno tunelu přináší ideální podmínky pro zřízení PJD. (viz dále)

1.5.11 Možnost „zelené trati“

Z důvodu absence šterkového lože které je potřeba často udržovat, je možné kolej „zakrýt“. U PJD lze k tomuto účelu využít kolejové absorbéry hluku. Jejich využití je vhodné hlavně pro městské dráhy.



Obr. 6: Absorbér hluku BRENS® s umělou trávou [vl. fotoarchiv 29.4.2016]

1.6 Přejíhodová oblast

Jednou z nevýhod může být přechod z PJD na klasickou kolej ve štěrkovém loži, kde se stýkají dvě zcela odlišné konstrukce z hlediska sedání a tuhosti. Je tudíž potřeba zajistit, aby přechod mezi těmito konstrukcemi byl plynulý, nelze ho uskutečnit v jednom příčném řezu. Každý takovýto úsek trati je technologicky i finančně náročný. Na druhou stranu lze tohoto poznatku využít na tratích (většinou VRT), kde se nachází velké množství specifických úseků, jako jsou mosty a tunely, kde je s výhodou využita PJD (viz výše). Na těchto tratích je pak vhodné použití PJD v celé délce, kvůli eliminaci počtu těchto přechodových oblastí.



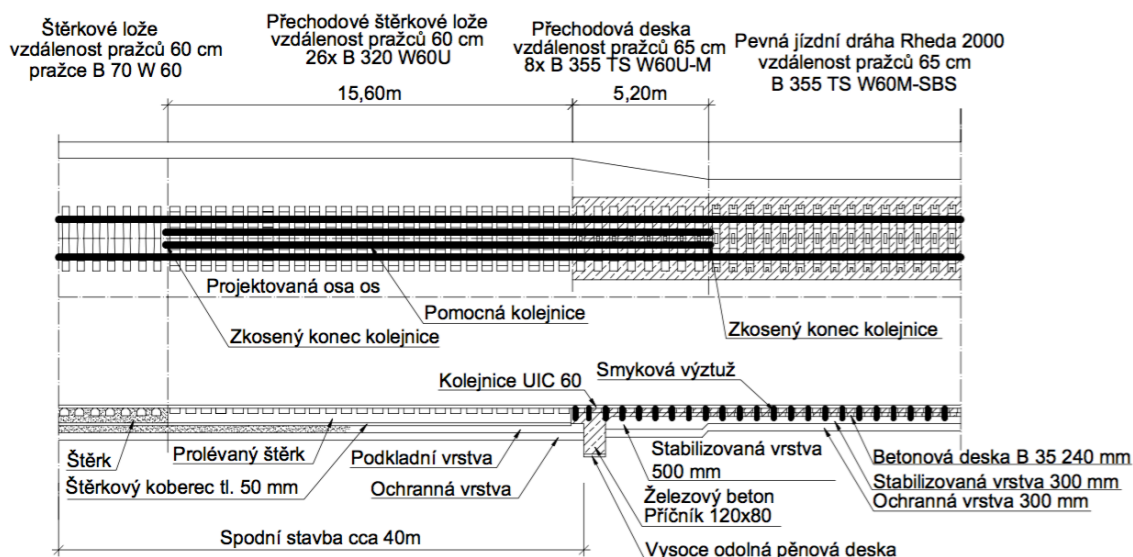
Obr. 7: Přechodová oblast na trati Č. Třebová – Přerov [vl. fotoarchiv 29.4.2016]

Mezi opatření, která zajistí plynulý přechod mezi konstrukcemi patří:

- Mění se tuhost pružných podložek v uzlech upevnění. Tuhost polozek se například pro kolej RHEDA 2000 mění následovně: 10 pražců 22,5 MPa, dalších 10 pražců 25 MPa, 10 pražců 30 MPa, 10 pražců 37 MPa, 10 pražců 45 MPa, 10 pražců 55 MPa a posledních 5 pražců 70 MPa.



- Vložení ztužujících kolejnic délky 20 m (stejně kolejnice jako pojezděné), jsou upevněny ve středu koleje upevněním KS v délce 5m na PJD a v délce 15m v návazné koleji ve štěrkovém loži
- Použití speciálních pražců v návazné koleji ve štěrkovém loži.
- Spleení a stabilizace štěrkového lože prolitím pryskyřicí. Míra prolití se zvyšuje po délce přechodové oblasti směrem k PJD. Úsek je většinou rozdělený do tří částí, z nichž každá je stabilizovaná více. Příklad pro trať s návrhovou rychlostí 160 km/h je následující. V délce 12 m je štěrkové lože prolito pouze pod pražci, následně v délce dalších 12 m pod pražci a za hlavami pražců a konečně v délce dalších 15 m je štěrkové lože prolito pryskyřicí v celém profilu. Tento proces stabilizace se doporučuje až po stabilizaci koleje a prvním podbíjení.
- Prodloužení konstrukčních vrstev HGT a FSS v délce aspoň 10m pod klasickou konstrukci koleje.
- Zřízení přechodové desky případně koncového bloku PJD



Obr. 8: Přechodová oblast systému Rheda 2000 [9]



1.7 Historie PJD

První zkušební úseky s pevnou jízdní dráhou byly budovány v 60. letech v Japonsku a také v několika evropských státech. V Japonsku systém vycházel z použití pevné jízdní dráhy pouze na vysokorychlostních tratích Shinkansen pro osobní přepravu a také z nutnosti řešit seismickou aktivitu v oblasti. V Evropě byly první zkušební úseky budovány ve Švýcarsku (tunel Bötzingen) a v Německu (stanice Dachau Karlsfeld a stanice Rheda). Zkušební úsek ve stanici Rheda, kde byla pevná jízdní dráha osazena v roce 1972 je dodnes provozován rychlostí 200km/h včetně vlaků ICE s minimální údržbou bez závad (bylo zde provedeno pouze broušení a výměna kolejnic). V důsledku pozitivních zkušeností s pevnou jízdní dráhou v běžné koleji pokračoval vývoj a zkoušení výhybek na tomto typu konstrukce.

Pokusy probíhaly také v Československu, kdy na zkušebních úsecích byly použité skořepinové a pražcové desky. Skořepinová deska délky 12,5 m a šířky 2,0 m byla tvořena dvěma podélnými prahy tloušťky 120 mm, které byly spojeny vetknutou skořepinovou deskou proměnného průřezu s nejmenší tloušťkou 50 mm uprostřed. Desky byly kladeny na výškově upravené kolejové lože a byly podélně předpjaty celkem 144 dvojicemi patentového drátu. Oba povrchy desky byly dále vyztuženy konstrukční výztuží tvořenou svařenou sítí a konce desek v oblasti kotvení byly zesíleny přídatnou výztuží. Tento typ konstrukce byl dimenzován na rychlost 130 km/h při hmotnosti na nápravu 24 t. Skořepiny se kladly za sebou na sraz s dilatační spárou 10-20mm do které se vtlačovaly tlustostěnné pryžové hadice, aby bylo zabráněno vnikání srážkové vody do kolejového lože. Pražcová deska odpovídala současné představě pevné jízdní dráhy ještě méně. Jednalo se o soustavu pražců uloženou těsně vedle sebe do šterkového lože. Pražce byly 2,5m dlouhé a 0,552m široké. Z dnešního pohledu nešlo o konstrukci pevné jízdní dráhy ani z hlediska úpravy GPK, která byla prováděna podbíjením speciálními stroji. Navíc neexistoval vhodný způsob upevnění kolejnic, používalo se standardní upevnění s tuhými svěrkami a podkladnicemi.

V Evropě bylo největším průkopníkem v zavádění PJD Německo, kde byly



první úvahy o trati s minimální údržbou a vysokou spolehlivostí zahájeny již v roce 1959. Po zpracování studie byl v roce 1972 realizován zmíněný úsek ve stanici Rheda, který je dosud v provozu. Od 90. let se pevná jízdní dráha používá na většině nových projektů vysokorychlostních tratí. V tunelu poprvé na trati Hannover – Würzburg v jednom tubusu a dále na zemním tělese na trati Mannheim – Stuttgart. Tyto úseky jsou dosud používány rychlostí 250 km/h s provozním zatížením asi 22 mil. hrt/rok. Následoval další rozvoj a použití PJD při stavbě nových i při modernizaci stávajících tratí. [6]

V roce 1996 byl dokonce zbudován zkušební úsek 7 typů pevné jízdní dráhy na trati Mannheim – Karlsruhe přezdívaný „olympiáda PJD“ kde jsou sledovány nároky na údržbu, vývoj GPK a další. Do dnešního dne vzniklo cca 34 typů konstrukcí PJD, které se od sebe více či méně liší. Obecně lze říci, že se vývoj pevné jízdní dráhy vždy spojoval s VRT v místech kde se neuvažovalo pouze s lehkou osobní dopravou (viz Francie TGV), ale i se smíšeným provozem s rychlou nákladní dopravou, kde se výrazněji projevují výhody PJD.[6]



2 Současný stav použití PJD

V současnosti se PJD používá jako standardní konstrukce trati v mnoha zemích Evropy i Asie především na vysokorychlostních tratích, v tunelech železniční sítě a na tratích metra a městských drah. Ve většině zemí již existuje několik schválených typů konstrukce pevné jízdní dráhy. Většinou jsou inspirovány německými zkušenostmi, samozřejmě mimo Japonsko, které používá svůj vlastní systém Shinkansen.

2.1 Současný stav ve světě

Na celém světě bylo k 1. 4. 2015 v provozu 29 792 km vysokorychlostních tratí z nichž je cca 23 000 km budováno systémy PJD. Největší boom v posledních letech zažívá PJD v Číně, kde je v provozu cca 14 000 km tratí s PJD a dalších 9 000 km je ve výstavbě nebo ve fázi plánování. Mezi největší čínské projekty patří páteřní 2 230 km dlouhá trať čínské VRT sítě mezi Pekingem a Hongkongem s návrhovou rychlostí až 350 km/h. Celou trasu vlaky urazí za neuvěřitelných 8 hodin. Jsou zde použity především systémy PJD Rheda 2000 a Bögl. [3]



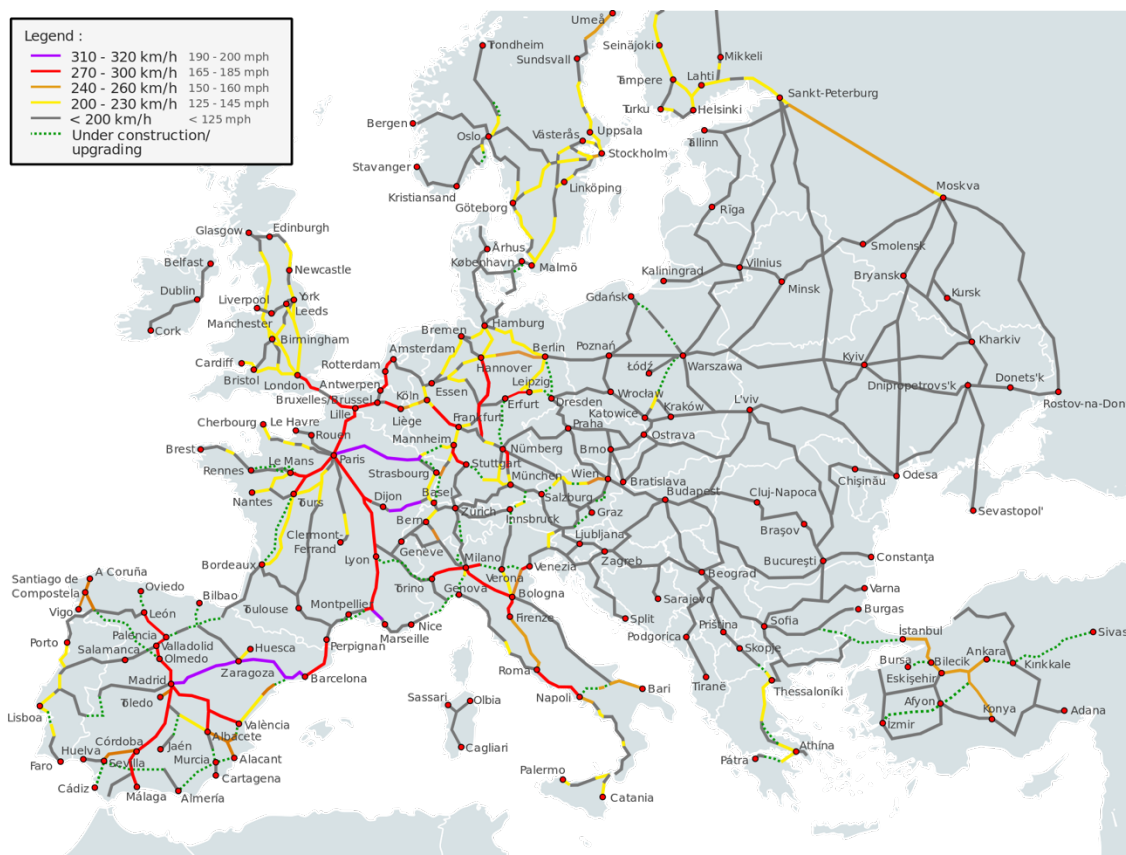
Obr. 9: Mapa s vyznačením použití, či plánování VRT stav k 12/ 2015 [3]



Tradiční zemí vysokorychlostních tratí je samozřejmě také Japonsko, kde je v provozu 3044 km PJD systému Schinkansen. Jedná se o prefabrikované panely o rozměrech 4,95 m x 2,34 m tloušťky 16 cm v tunelech a na mostech a 19 cm na zemním tělese. K podkladnímu betonu jsou panely upevněny pomocí válcových čepů umístěných po krajích panelů. Další země, kde byly použity především německé technologie PJD jsou Tchaj-wan, Jižní Korea a velký rozvoj PJD nastává také v Indii. [3]

2.2 Současný stav v Evropě

Evropskou zemí, kde se nejvíce používá PJD je jednoznačně Německo, jak už bylo popsáno výše. Do konce roku 2015 bylo v Německu v provozu na 1300 km tratí s PJD.[6] Schválenými systémy PJD s betonovou deskou jsou Rheda 2000, Züblin, ÖBB Porr a Bögl, nejvíce používaný je Bögl a Rheda 2000. Německý předpis doporučuje použití PJD u všech rekonstrukcí i novostaveb tunelů delších jak 500 m a na všech tratích s návrhovou rychlostí větší než 200 km/h eventuálně na tratích s vysokým provozním zatížením.



Obr. 10: Mapa evropské železniční sítě s vyznačením VRT stav k 12/ 2015 [3]



V současnosti je v Německu těsně před dokončením Projekt 8 vysokorychlostního spojení mezi Norimberkem a Berlínem. Trať, která vede podél západní hranice s ČR přes Erfurt a Lipsko má zkrátit cestovní čas mezi Norimberkem a Berlínem z 6 hodin na 3 hodiny a má výrazně doplnit německou VRT síť. Trať prochází členitým terénem Durinského lesa a nachází se na ní na 22 tuneľů. [18] Další zemí, kde probíhá rozvoj VRT s PJD je Španělsko. Systém Rheda 2000 je použit například v dvoukolejném 28 km dlouhém tunelu Guadarrama na trati Madrid - Valladolid. PJD byla použita také na traťových úsecích, především v tunelech a na mostech v Rakousku (hlavně systém ÖBB PORR), v Itálii na úseku Udine - Tarvisio, ve Švýcarsku v Gotthardském úpatním tunelu, ve Velké Británii v Eurotunelu (systém Sonnevile), v Nizozemsku, Belgii i na Slovensku. Předpisy pro použití PJD zatím řeší jednotlivé evropské státy samy, častokrát se nejvíce inspirují německým předpisem (viz Slovensko), ale už vzniká i EN norma, jejíž první dvě části ze čtyř by měly být projednávány v připomínkovém řízení už během roku 2016. [17]

2.3 Současný stav v České republice

V České republice jsou nyní v provozu 2 úseky pevné jízdní dráhy, každý prováděn jiným systémem. Ani jeden úsek není delší než 500 m a oba jsou realizovány jako úseky zkušební. Další úsek je ve výstavbě v Ejpovickém tunelu na III. koridoru. Použití PJD v České republice řeší předpis SŽDC S9.

2.3.1 Úsek PJD na trati Česká Třebová - Přerov

První úsek je realizován na trati Česká Třebová - Přerov mezi obcemi Třebovice v Čechách - Rudoltice na km 9,530 - 10,030, tedy o celkové délce 500 m. Je zde použit konstrukční systém Rheda 2000 s příčnými dvoublokovými pražci. Konstrukce typu Rheda 2000 je popsána v kapitole 3. Podélný sklon je 9,5 ‰. PJD se nachází z části v přímé trati a z části v oblouku o poloměru 1 800 m.

Pevná jízdní dráha byla vybudována na samostatném zemním tělese, částečně v zářezu a částečně v násypu. Jádro zemního tělesa jednokolejné trati bylo konsolidované a bylo nutné ho oboustranně rozšířit pro dvoukolejnou že-



lezniční trať. Pro stavbu železničního spodku byla použita sendvičová konstrukce, uložená na vyztužené základové spáře. Pevná jízdní dráha je realizována na obou traťových kolejích a výstavba probíhala v letech 2004-2005. Použitý systém Rheda 2000 byl realizovaný z domácích materiálových zdrojů a výroba pražců probíhala v ŽPSV a.s. Úsek je v provozu s traťovou rychlostí 160 km/h.



Obr. 11: Nynější stav [vlastní fotoarchiv 29.4.2016]

2.3.2 Úsek PJD v tunelu na trati Vsetín - hranice ČR/SR

Druhý úsek je realizován na trati Vsetín - státní hranice ČR/SR mezi obcí Horní Lideč a státní hranicí na km 23,169 - 23,575 o celkové délce 406 m. Pevná jízdní dráha se nachází v tunelu a předportáli a je realizována na obou traťových kolejích a také ve slovenské části tunelu. Celý úsek se nachází v přímé trati. Stavba probíhala v letech 2011 až 2013.

Je zde použit konstrukční systém pevné jízdní dráhy ÖBB-Porr. Jedná se o první realizaci tohoto systému v ČR, takže je úsek také vedený jako testovací a je ve fázi provozního ověřování a tedy dlouhodobého sledování a vyhodnocování ze



strany SŽDC. Konstrukce typu ÖBB-Porr je popsána v kapitole 3. Pevná jízdní dráha zde byla s výhodou použita kvůli stísněným podmínkám prostorového uspořádání tunelu. Tunel byl v minulosti pouze sanován a tudíž jeho průjezdný profil zůstal zachován. Původně se v tunelu nacházely dřevěné pražce ve štěrkovém loži, které už bylo v havarijním stavu a jedinou možností jak dodržet předepsaný průjezdný profil bylo použití PJD. Rozdílná konstrukční výška PJD a KK je dobře vidět na obrázku č. 12 a 14 z průběhu stavby. Minimální tloušťka štěrkového lože nedovolovala použít klasickou konstrukci.

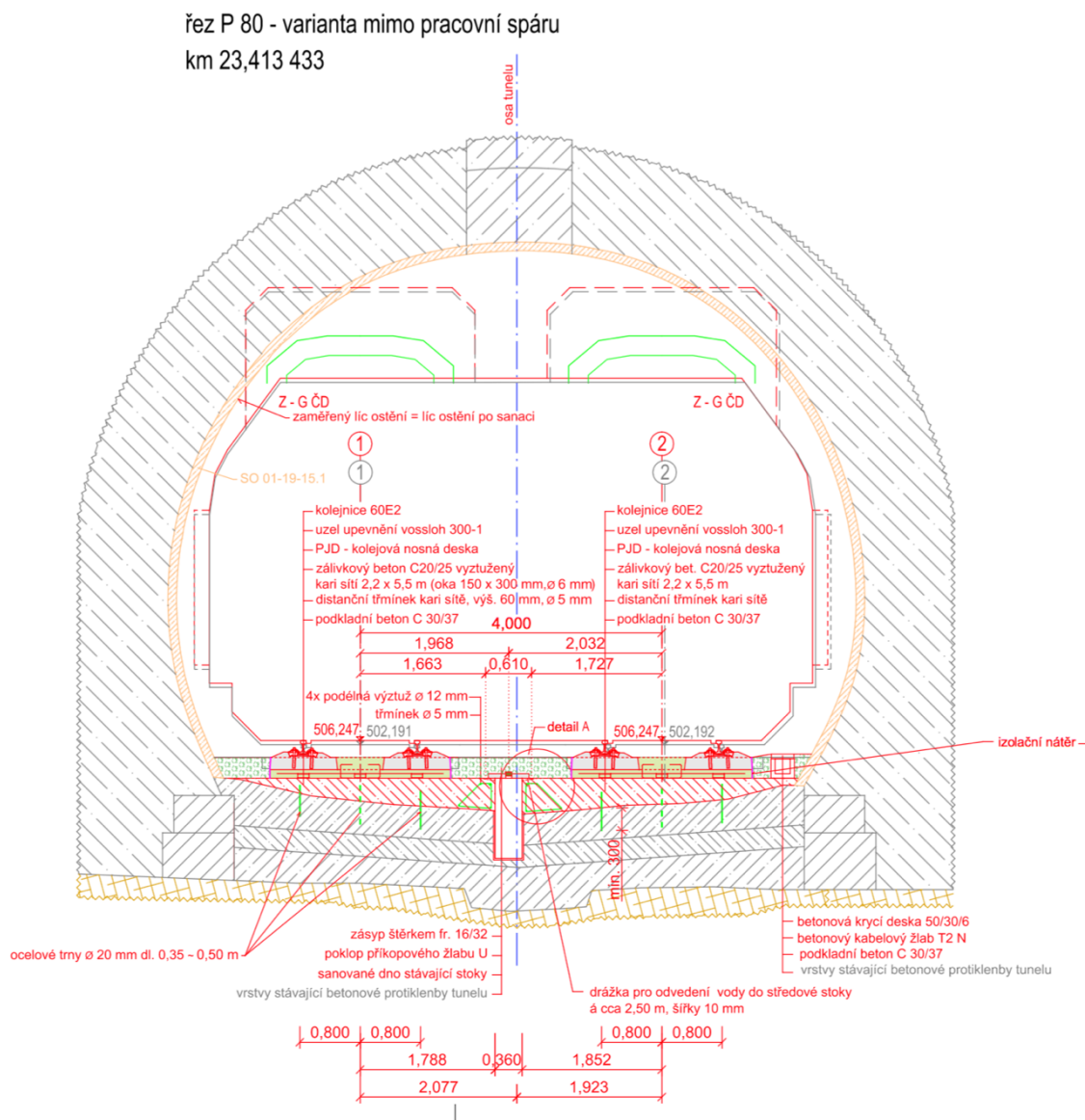


Obr. 12: Pohled na PJD ve Střelenském tunelu při výstavbě [14]

Přechodová oblast je tvořena speciálními přechodovými deskami, které mají poloviční délku oproti standardním deskám tj. 2 650 x 2 400 mm. Přechodové desky obsahují 4 páry integrovaných kolejových podpor typu Vossloh 300-1 v osové vzdálenosti 650 mm. Navíc oproti standardním deskám jsou zde 3 páry integrovaných podkladnic, které slouží k osazení ztužujících kolejnic. Pražce v přechodové oblasti v části se štěrkovým ložem byly použity shodně se systémem Rheda 2000 v Třebovicích, tedy typ B 320. Pro zajištění plynulého nárůstu tuhosti jsou použity pružné podložky pod patu kolejnice s různou hodnotou tuhosti. Dále je v přechodové oblasti štěrkové lože stmeleno dvousložkovou pryskyřicí MC - Ballastbond 70. Stmelení se provádí ve dvou fázích. První je provedena při realizaci



prací po rozprostření a zhutnění štěrkové vrstvy, kdy je niveleta lože snížena o 80 mm tak, aby bylo umožněno podbití a zároveň, aby nebyla zasažena stmelená vrstva. Druhá fáze následuje po roce provozu, kdy dojde ke stmelení v mezipražcových prostorech a za hlavami pražců. Podélný řez i situace přechodové oblasti Střelenského tunelu je v příloze č. 1.



Obr. 13: Vzorový příčný řez Střelenským tunelem [9]

Další příčné řezy a část projektové dokumentace se nachází v příloze č. 2. Na trati probíhá pravidelné sledování stavu koleje a měření projektované polohy koleje. Výstup z měření z roku 2012 se nachází v příloze č. 3.



Obr. 14: Pokládání panelů ÖBB-Porr ve Střelenském tunelu [9]

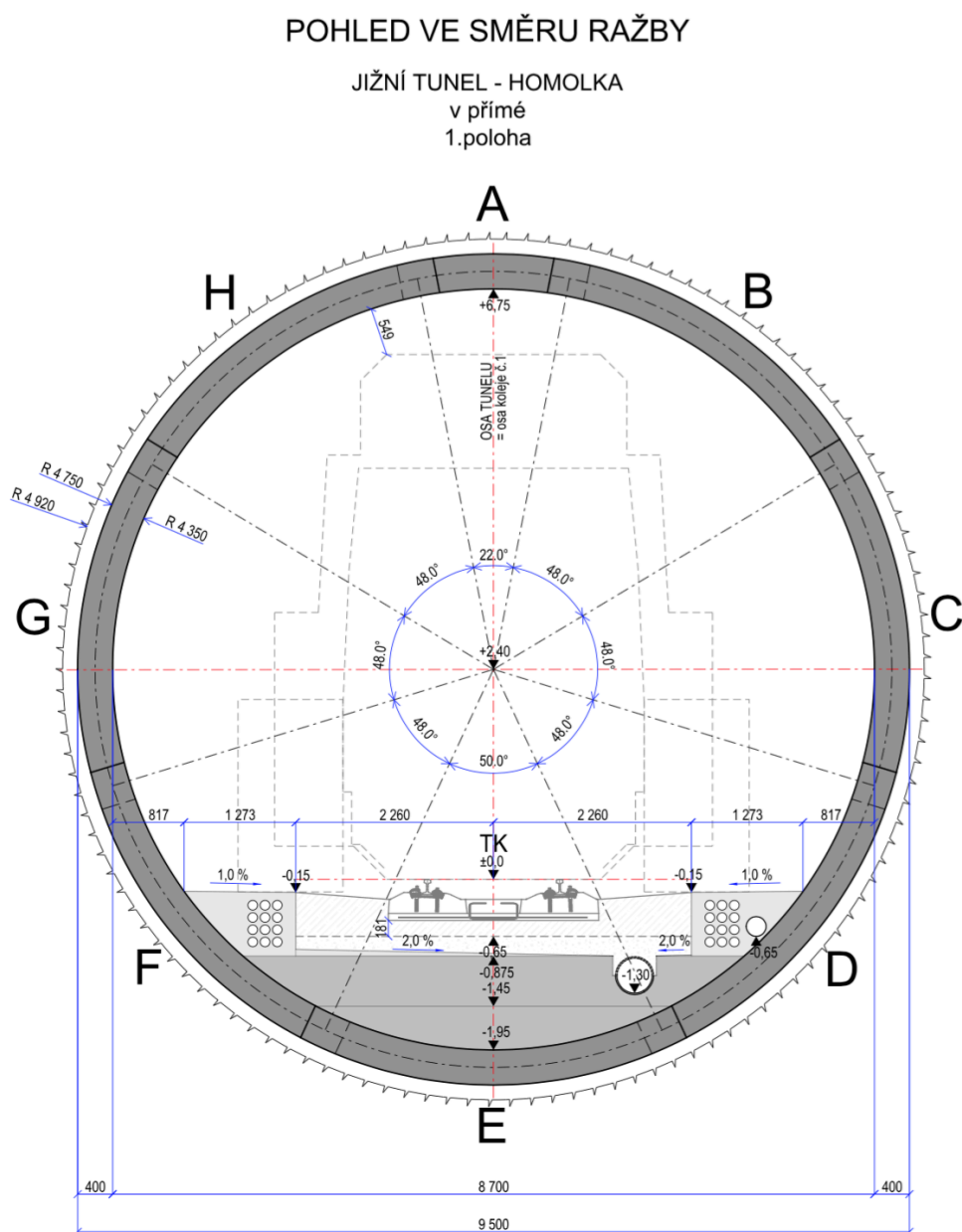


Obr. 15: Stav po dokončení PJD ve Střelenském tunelu [9]



2.3.3 Úsek PJD v tunelu na trati Rokycany - Plzeň

Zatím nejdelší úsek PJD v České republice je právě ve výstavbě při modernizaci trati III. koridoru Rokycany - Plzeň v Ejpovických tunelech Homolka a Chlum. Trať povede dvěma jednokolejnými tubusy o délce 4150 m. Technické parametry modernizované trati byly voleny s ohledem na budoucí využití tunelového úseku pro VRT. Ražba tunelu započala v roce 2015 a je prováděna razícím štítem od firmy Herrenknecht o průměru 9,89 m. Součástí projektu je zbudování PJD v celé délce tunelu a přechodových oblastí. Bude použit systém prefabrikovaných panelů ÖBB Porr, které se stejně jako u předešlých testovacích úseků, vyrábí v ŽPSV a.s.



Obr. 16: Vzorový příčný řez tunelu Homolka [9]

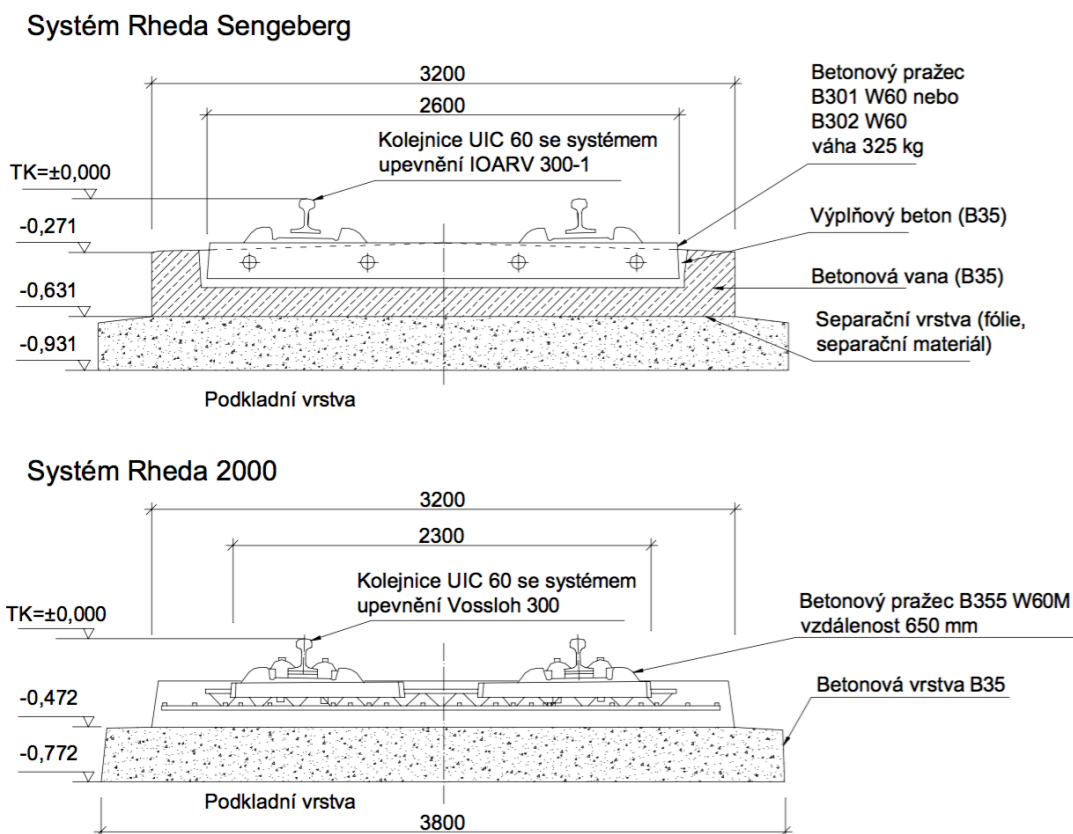


3 Popis vybraných systémů s přihlédnutím na použití v tunelu

Pro podrobný popis konkrétních systémů konstrukce PJD jsou vybrány nejpoužívanější typy. Jako zástupce technologie použití pražců uložených do monolitické betonové desky je vybrán systém Rheda 2000, kterému je podobný také často používaný systém Züblin. A jako zástupce prefabrikovaných panelů je vybrán systém ÖBB-Porr, kterému je podobný systém Bögl. I přesto, že je systém Bögl ve světě rozšířenější jsou záměrně vybrány systémy Rheda a Porr, které už jsou v České republice v provozu a je u nich tedy největší pravděpodobnost, že budou použity i v budoucnu a případně budou schváleny předpisem SŽDC.

3.1 Rheda 2000

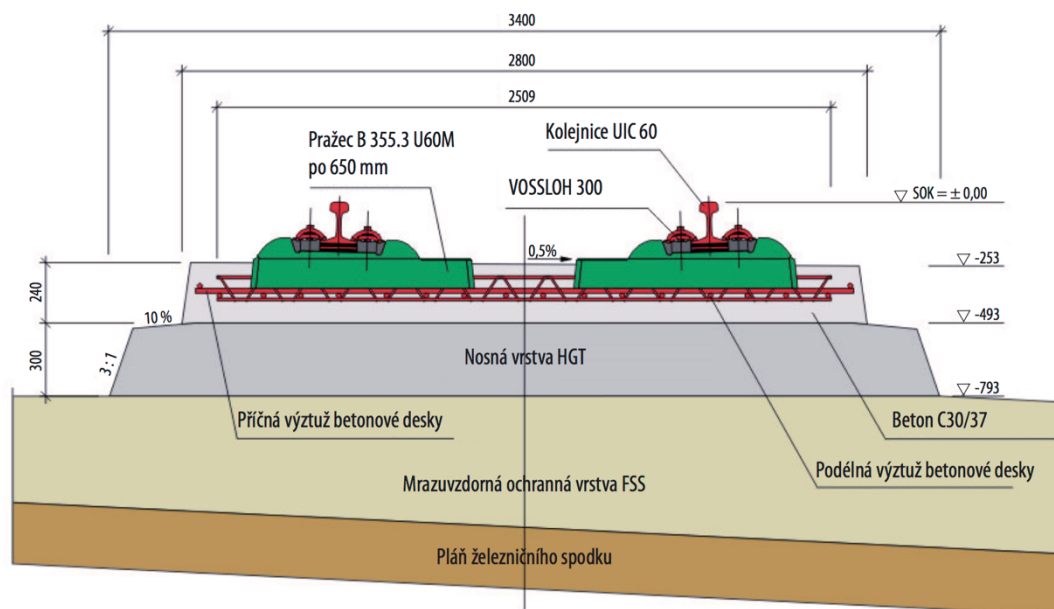
Základem systému Rheda 2000 se stala část trati mezi městy Bielfied a Hamm v Německu ve stanici Rheda, která byla zhotovena v roce 1972. Původní návrh (obr. 17) se nadále vylepšoval a optimalizoval, ale beze změny původního základního principu konstrukčního řešení.



Obr. 17: Porovnání typu Rheda Sengeberg a Rheda 2000 [7]



Samotný systém Rheda 2000 byl poprvé použit v roce 2000 v Německu na trati mezi městy Erfurt a Halle. Byl navržen pouze jako pilotní projekt o celkové délce 1 kilometr, ale nakonec byl zkušební úsek rozšířen na 3 kilometry. Po pozitivních zkušenostech s instalací, provozem i údržbou bylo rozhodnuto, že bude systém Rheda 2000 použit při výstavbě nové vysokorychlostní dráhy mezi městem Kolín a letištěm ve Frankfurtu a následně na části trati mezi městy Ingolstadt a Norimberk v celkové délce 75 kilometrů, kde byl úsek dokončen v roce 2006. Po těchto úspěšných projektech se systém Rheda 2000 začal používat i mimo Německo. Mezi nejvýznamnější projekty patří vysokorychlostní spojení na trati HSL-ZUID z Amsterdamu přes Rotterdam v Holandsku až na belgickou hranici. Dále použití pevné jízdní dráhy systému Rheda 2000 v tunelech Guadarrama a San Pedro ve Španělsku, kde je trať v provozu od roku 2008 s návrhovou rychlostí 350 km/h. V Asii byl systém Rheda 2000 poprvé použit na vysokorychlostní trati mezi městy Tchaj-pej a Kaohsiung na Tchaj-wanu v celkové délce 80 km a následně v jihovýchodní Číně na trati PDL mezi městy Wu-chan a Kuang-čou v celkové délce skoro 1000 kilometrů, kde vlaky od roku 2009 využívají maximální rychlost 350 km·h⁻¹.

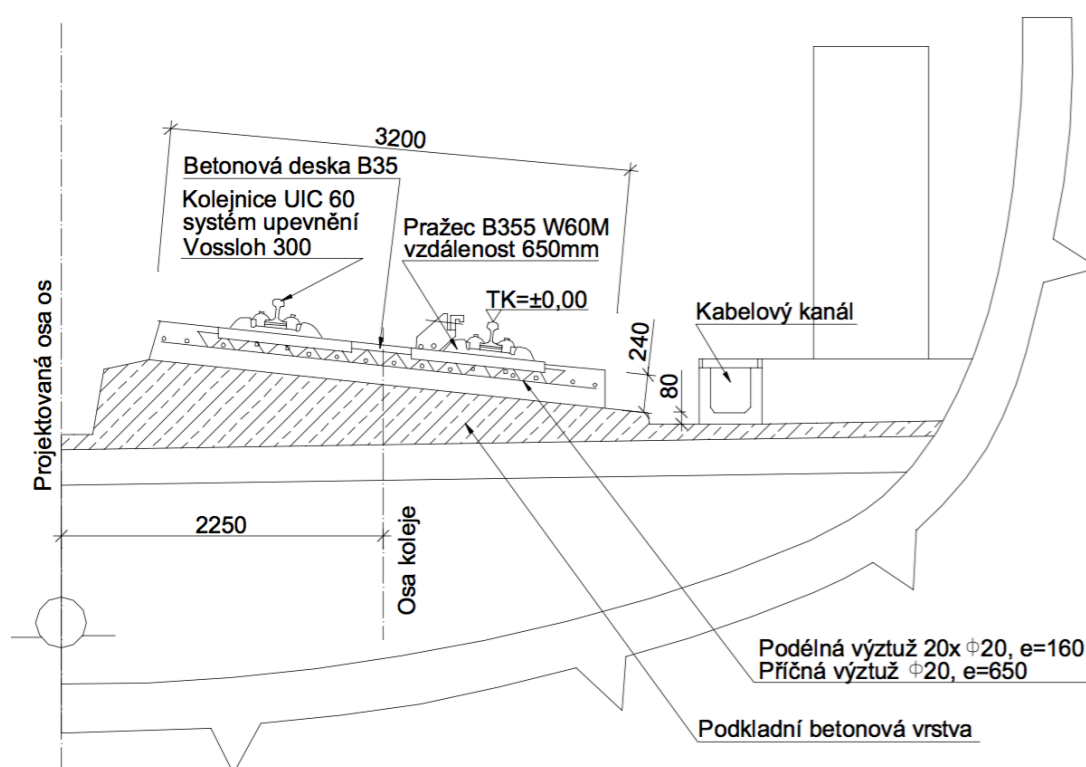


Obr. 18: Řez konstrukcí PJD typu Rheda 2000 [7]

Konstrukce pevné jízdní dráhy Rheda 2000 je monolitická s dvojblokovými pražci ze železobetonu a je budována systémem top-down, tj. shora, od temene kolejnice. Po přesném geodetickém ustavení kolejového roštu dojde ke zmonolit-



nění (zalití) pražců do betonové nosné desky uložené na vrstvě HGT. Jsou používány betonové směsi C 30/37 XF3, XC4. Při standardním použití upevnění Systému 300 a kolejnicových pásů 60 E1 je konstrukční výška od TK po horní plochu HGT pouze 472 mm. Používají se dvoublokové pražce typu B 355-W60M spojené příhradovou výztuží, která zajišťuje dobré spojení s nosnou betonovou deskou. Délka pražců je 2 300 mm resp. 2 565 mm včetně příhradové výztuže. Pražce mohou být, díky své konstrukční výšce, uloženy přímo na vrstvu HGT a před zalitím betonem pojížděny stavebními stroji. Pražce navíc váží pouze cca 194 kg což umožňuje snadnější manipulaci a logistiku při výstavbě.



Obr. 19: Řez konstrukcí RHEDA 2000 v tunelu [7]

Při stavbě systému Rheda 2000 v tunelu se nosná betonová deska ukládá přímo na dno tunelu pouze na podkladní případně vyrovnávací betonovou vrstvu. Její tloušťka může být dle podmínek snížena až na 0,15 m. Pracovní postup při stavbě v tunelu je následující: na podkladní vrstvu se roznese pražce spolu s kolejnicemi a kolejový rošt se smontuje klasickou technologií, vloží se podélná výztuž (20 x průměr 20 mm á 160 mm), následně příčná výztuž (průměr 20 mm á 650 mm) budoucí betonové desky, podélná výztuž se může svařit, kolejový rošt se ustaví do požadované polohy GPK a zafixuje se, zhotoví se podélné bednění (prefabrikované



či pomocné) nosné betonové desky, případně je možné využít prostorové uspořádání vnitřního profilu tunelu místo bednění, nosná deska se vybetonuje pomocí vhodné mechanizace, pomocí ručních vibrátorů se zajistí, aby došlo k zatečení betonové směsi mezi výztuž, dále se musí částečně uvolnit svěrky, aby nedošlo k přenášení teplotních sil z kolejnic do pražců a upraví se povrch vybetonované desky. [7]



Obr. 20: Pohled na konstrukci Rheda 2000 před betonáží [19]

Existuje několik metod ustavení koleje do požadované GPK. Nejjednodušší je použití šroubů pro ustavení ve svislém směru pro nastavení přesné nivelety TK a převýšení. Pro přesné nastavení směrového vedení koleje se používá jednoduchý šroubový mechanismus „zapřený“ o předem zabetonované trubky do podkladního betonu. Případně se osazení kolejového roštu provádí pomocí speciálních portálových jeřábů, kdy je celý rošt nastaven do požadované polohy a zajištěn. Přesné nastavení GPK se provádí před každým záběrem betonáže. Poloha GPK je kontrolována geodetickými metodami. Před zavadnutím betonu je potřeba uvolnit případné rektifikační šrouby, aby při sedání betonu nedošlo k odtržení pražců od desky.

Jak bylo zmíněno výše, podobným systémem jako Rheda 2000 je systém Züblin, který se liší pouze tím, že podobné dvoublokové pražce jsou vibrovány do předem vybetonované desky a ustaveny do požadované polohy pomocí takzvané-



ho „kladecího vlaku“. Systém tedy vyžaduje použití velkých strojů, případně je možné kolej budovat stejným principem jako systém Rheda 2000. [20]



Obr. 21: Rektifikační mechanismus při stavbě PJD Rheda 2000 [19]

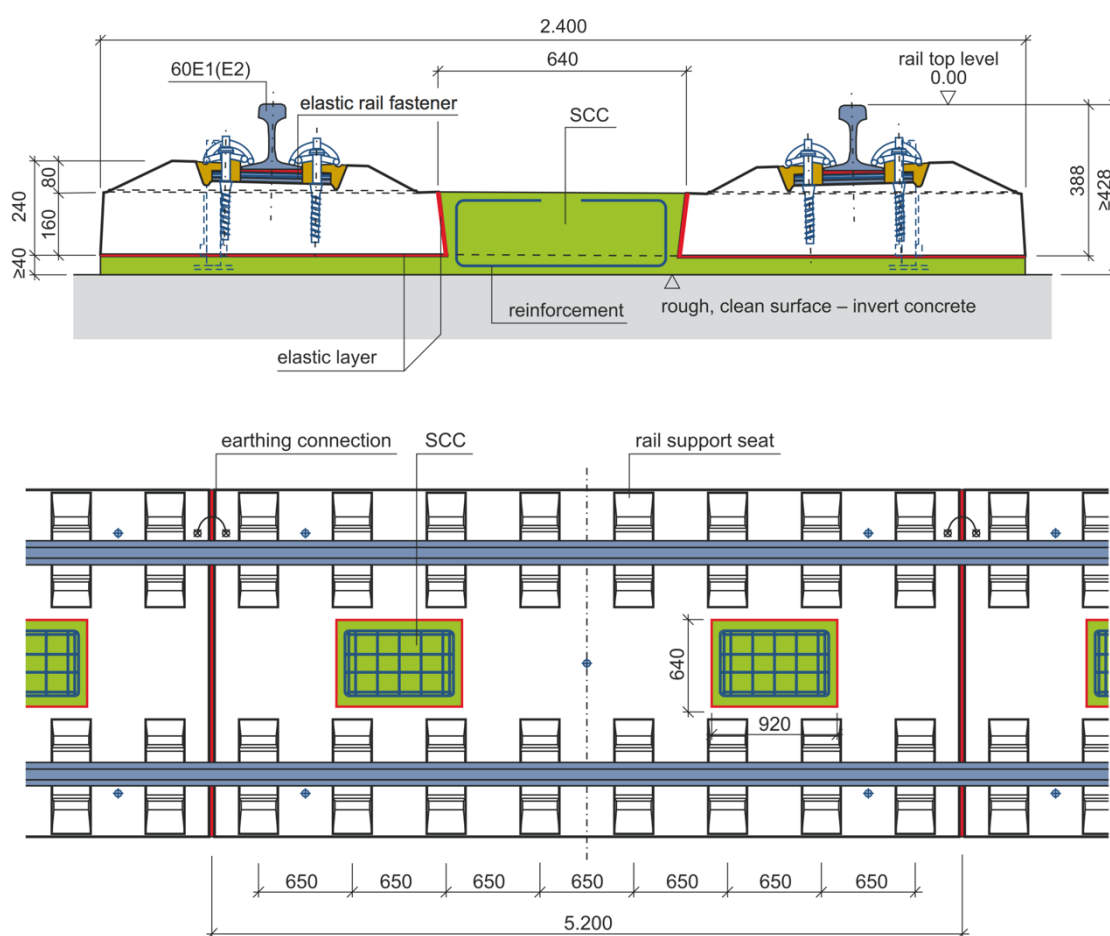
3.2 ÖBB-Porr

Systém konstrukce PJD ÖBB-Porr neboli STA (Slab Track Austria) byl vyvíjen ve spolupráci s rakouskými železnicemi a v současné době je jedním s nejrozšířenějších systému PJD z prefabrikovaných panelů v Evropě. Systém je používán už skoro 30 let především v rakouských a německých tunelech. V Rakousku se tento systém stal jediným standardem na tratích ÖBB. První úsek byl vložen v roce 1989 v délce 450 m.

Hlavním prvkem konstrukce ÖBB-Porr je elasticky uložená deska, kterou představuje nepředpjatá vyztužená betonová deska, prefabrikovaná ve výrobním závodě, kde podléhá kontrole kvality. Panely jsou vyrobeny z betonové směsi kvality C30/37 a mají standardní délku 5,16 m, šířku 2,40 m (2,10 m),



tloušťku 0,16 m a hmotnost přibližně 5 tun. Takto mohou být ve vagoních dopraveny na staveniště. Desky obsahují 8 párů integrovaných kolejových podpor v osové vzdálenosti 0,65 m. Jako upevnění se znovu používá Systém 300. V podélné ose mají desky dva otvory o rozměrech 640 x 920 mm, které slouží k zalití samozhutnitelným betonem „SCC“ po jejich fixaci do předepsané polohy. Spodní plocha desky a stěny otvorů jsou pokryty elastickou vrstvou, která společně s pružnými podložkami pod patou kolejnice zajišťuje nezbytnou „deformaci“ pod zatížením a tlumí vznikající hluk i vibrace přenášené do podkladních vrstev. Na celkové tuhosti koleje se podílí asi 10%. [2,8]



Obr. 22: Systém PJD ÖBB-Porr [8]

Konstrukční výška v tunelech může být pouze 433 mm nad dnem tunelu, při použití speciálního zalévacího betonu C 55/67. Toho lze využít například při rekonstrukcích, kde bývá omezený průjezdný profil. Desky se vyrábějí ve dvou základních typech, pro přímou kolej a pro kolej v oblouku. Desky bývají označené čárovým kódem pro přesnou identifikaci, případně pro opětovnou výrobu.



Postup prací při stavbě v tunelech probíhá následovně: prefabrikované desky se pomocí jeřábu ukládají na dřevěné distanční bloky uložené na dně tunelu ve vzdálenosti 4 cm od sebe, dále jsou namontovány kolejnice a panely jsou ustaveny do požadované polohy GPK pomocí 4 rektifikačních zařízení. Jednotlivé panely nejsou nijak konstrukčně propojeny a díky přesné výrobě desek je rektifikace velmi rychlá.

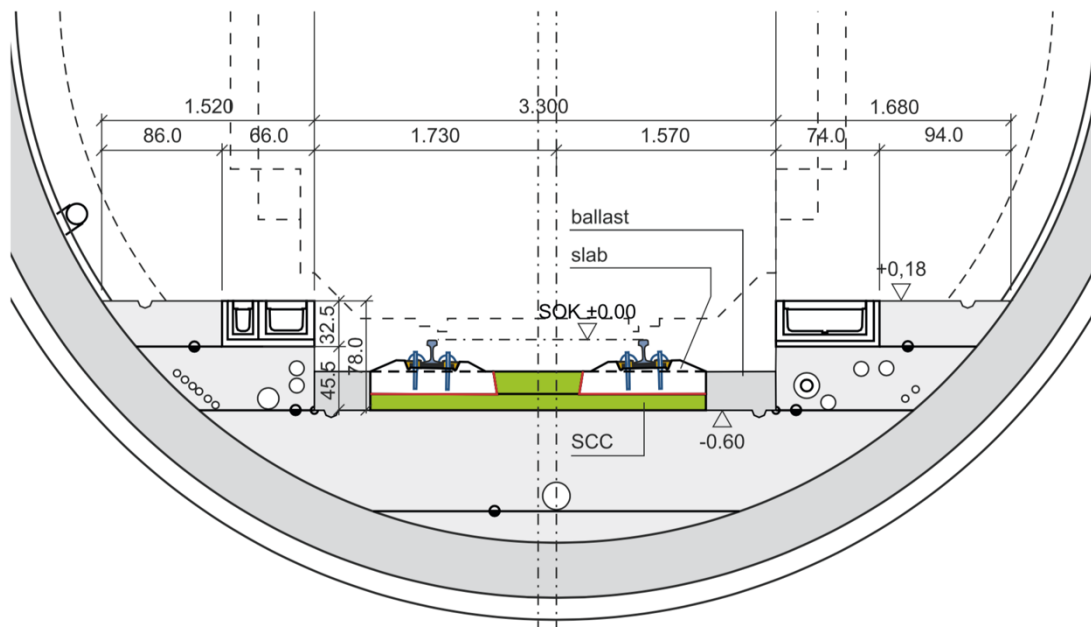


Obr. 23: Pokládání prefabrikovaných panelů ÖBB-Porr [9]

Panely jsou následně z boku opatřeny bedněním (pokud se nevyužije tvar vnitřního uspořádání tunelového tubusu) a skrz otvory je prostor pod deskami zalit samozhutitelným betonem. Prostor pod deskami je opatřen betonářskou výztuží a je potřeba dbát na to, aby se zálivka dostala do celého prostoru pod panelem a zajistilo se tak dostatečné spolupůsobení a eliminoval se vznik dutin. Následně se zalijí i kónické otvory, které po dokončení slouží jako silové uchycení desek. Výztuž je pro správné fixování výšky nade dnem tunelu uložena do vlnovitě tvarovaných „žebříčků“ z oceli. Zálivka se aplikuje pumpou až do vzdálenosti 500 m. Zalivkový beton se nevibruje. V případě potřeby je možné, díky elastické vrstvě na spodní ploše desek, poškozené panely vyjmout po odsekání zalévacích otvorů. [2,8]



Obr. 24: Pokládání prefabrikovaných panelů ÖBB-Porr [9]



Obr. 25: Řez systémem PJD ÖBB-Porr v tunelu [8]

Stejně jako jsou si podobné systémy Rheda a Züblin je to i u systémů Porr a Bögl. Systém Bögl se liší velikostí prefabrikovaných panelů – jsou delší cca o 139 cm, tlustší o 4 cm a také těžší o 4 t. Otvory pro zálivku v panelech jsou



výrazně menší a také je menší prostor pod deskami, který je injektován bitumencementovou maltou. Panely jsou navzájem spojeny třmeny. Systém Bögl je nejrozšířenějším systémem na světě. [21]

3.3 Porovnání pro použití v tunelu

I přes dva rozdílné přístupy nelze jednoznačně říci, který ze systémů je lepší. Mezi zásadní parametr pro porovnání těchto systémů při použití v tunelu patří především konstrukční výška, která je nižší u systému ÖBB-Porr. Systém Rheda 2000 zase přináší snadnější logistiku při práci v jednokolejných tunelech. Výhody a nevýhody jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 6: Srovnání výhod a nevýhod systému Rheda 2000 a ÖBB-Porr

Rheda 2000	ÖBB-Porr
<ul style="list-style-type: none">- Minimální konstrukční výška: 472 mm- Hmotnost jednoho prvku: 194 kg- Složitější rektifikace- Při betonáži menší riziko vzniku dutin- Betonáž desky in-situ ruční úprava povrchu- Možnost dodatečné rektifikace GPK pouze v uzlech upevnění- Není potřeba speciálního náradí ani mechanizace- Větší podíl lidské práce při výstavbě- Vhodné i pro stavbu kratších úseků kvůli snazší možnosti dovozu prahů- Rychlost výstavby až 100 m za směnu- Snazší manipulace v jednokolejných tunelech- Složitější možnost opravy	<ul style="list-style-type: none">- Minimální konstrukční výška: 433 mm- Hmotnost jednoho prvku: 5000 kg- Rychlá rektifikace pomocí 4 stavěcích šroubů- Velké riziko vzniku dutin pod panely- Přesná a vysoce kvalitní výroba celých desek- Možnost dodatečné rektifikace GPK nejen v uzlech upevnění- Potřeba těžké mechanizace a jeřábů vzhledem k rozměrům prefabrikovaných desek- Horší logistika kvůli rozměru prvků- Vhodné pouze pro delší úseky, kvůli nutnosti výroby desek- Rychlost výstavby až 300 m za směnu- Horší logistika v jednokolejných tunelech- Relativně jednoduché i větší opravy výměnou desek- Útlum rázů a vibrací díky pružné vrstvě



4 Pevná jízdní dráha v tunelech - shrnutí

Návrh konstrukce koleje v tunelu musí zohledňovat především prostorové řešení průjezdného průřezu a tedy i plochu teoretického výrubu, dále minimální údržbu, která je v tunelu dražší a nebezpečnější než na koleji mimo tunel, a v neposlední řadě i možnost přístupu vozidel integrovaného záchranného systému. Navíc dno tunelu už samo o sobě poskytuje dostatečně tuhé podloží pro konstrukci pevné jízdní dráhy, a proto není potřeba řešit často složitý problém s konsolidací zemní pláně. Nejen z těchto důvodů je už tradičně využívána v železničních tunelech po celém světě pevná jízdní dráha.

Pro použití v tunelu jsou uzpůsobeny prakticky všechny systémy PJD. Kromě výše podrobněji zmíněných má velkou tradici používání v tunelech ještě systém PJD SBB – Börzberg, který je založený na principu dvoublokových pražců spojených ocelovou tyčí. Pražce jsou „obuty“ do pryžové „boty“ a následně zabetonovány do nosné betonové desky podobně jako u systému Rheda 2000. Díky pružnému uložení je možné používat klasické upevnění W14. Tento systém je použit prakticky ve všech Švýcarských tunelech s PJD včetně brzy dokončeného Gotthardského úpatního tunelu.

4.1 Výhody použití PJD v tunelu

Pro návrh dispozice vnitřku tunelového tubusu je u klasické konstrukce železničního svršku omezujícím prvkem poloha odvodnění a nutný prostor pro práci mechanizačních prostředků. Tento prostor je definovaný vodorovnou vzdáleností 2200 mm na každou stranu od osy koleje a svislou vzdáleností 800 mm pod projekovanou niveletou koleje. V obloucích se tyto vzdálenosti ještě zvětší podle zásad platných pro úpravu průjezdného profilu. V návrhu dispozice řešení vnitřku tunelového tubusu u konstrukce železničního svršku PJD není omezujícím faktorem nutný prostor pro práci mechanizačních prostředků, protože kolej se uvažuje jako prakticky bezúdržbová. Dále je možné uvažovat horní hranu PJD jako svodní vrstvu pro odvodnění (při dostatečném podélném sklonu) a tak je možné osadit odvodňovací žlaby výš než u KK, kde musejí být osazeny pod dolní hranou štěrkového lože, ze kterého je také potřeba odvést vodu.



Velkou výhodou je tedy i samotná konstrukční výška konstrukce PJD, která se liší podle použitého typu konstrukce a geologických a stavebních podmínek v tunelu. V ideálních podmínkách je možné pokládat nosnou betonovou desku PJD přímo na dno tunelu dokonce se sníženou tloušťkou desky až na 0,15 m bez použití vrstvy HGT. Z těchto důvodů je možné výrazně zmenšit teoretickou plochu výrubu a tím výrazně snížit investiční náklady na stavbu tunelu. Samozřejmě je potřeba přihlídnout k vyšším investičním nákladům na zbudování samotného svršku PJD. Návrhovatelnost použití ŽSv PJD bude popsána dále. [1,7]

Jednou z dalších výhod použití PJD v tunelu je i to, že šterk na pevném podkladu (betonové desce dna tunelu) podléhá rychlejší degradaci než na zemní pláni. Proto jsou nutné údržbové opravy častější, navíc v tunelu jsou náročnější také z hlediska bezpečnosti.



Obr. 26: Panely BRENS ACCESS® v předportáli tunelu Turecký vrch [23]

Možnost poježdění záchranných vozidel integrovaného záchranného systému po koleji v tunelech při haváriích je další výhodou PJD. Výrazně hladší povrch oproti klasické konstrukci odstraňuje nepříjemné vibrace při jízdě a také poskytuje komfortnější únikovou cestu pro cestující v případě potřeby. Navíc je možné použít



krycí desky k ještě komfortnějšímu poježdění koleje, především v místech záchranných ploch.

4.2 Ekonomické srovnání PJD a KK pro použití v tunelu

Ekonomické srovnání těchto dvou přístupů v otevřené trati je velice obtížné a záleží na velkém množství faktorů (viz výše), především na druhu trati a návrhových rychlostech. Při vyšších rychlostech se výrazně snižuje životnost štěrkového lože. Při rychlostech 250-300 km/h je štěrk třeba měnit po projetí cca 300 mil.hrt, to je při 70 vysokorychlostních spojích za den dosaženo cca za 15 let. Při nižších rychlostech se štěrkové lože degraduje až po projetí cca 1000 mil.hrt. Samozřejmě existují způsoby, jak zvýšit životnost štěrku i při vyšších rychlostech a to použitím širších pražců, měkkých podložek v uzlech upevnění, případně podštěrkových rohoží. [1]

Je tedy velmi náročné odhadnout návratnost vyšších investičních nákladů na budování PJD následnou výrazně nižší nutností údržby a vyšší životností celé konstrukce. Navíc je potřeba zohlednit naopak vyšší náklady na případné větší opravy například při vykolejení.

Dalšími faktory, které činí ekonomické srovnání složitým, jsou geologické podmínky pro zakládání zemních těles násypů. Splnění parametrů zemní pláně pro PJD může být obzvlášť v problematických oblastech (viz výše) velmi finančně náročné. Pro použití PJD v tunelu lze tyto náklady odhadnout přesněji.

Nejvýraznější výhodou může být možnost zmenšení teoretické plochy výrubu a tudíž výrazné ušetření nákladů. Jako modelový příklad může posloužit ekonomické posouzení konstrukce železničního svršku při přípravě projektu modernizace trati Rokycany – Plzeň v tunelech Homolka a Chlum, i přestože nakonec byla zvolena ražba pomocí TBM. Celková délka tunelu je 4150 m a Teoretická plocha výrubu tunelu s využitím klasické konstrukce kolejového lože vychází 76,16 m². S využitím pevné jízdní dráhy systému Rheda 2000 vychází teoretická plocha výrubu 72,59 m². Navíc je v tomto ukázkovém případě u systému s PJD použita vrstva HGT, která není nutná a bez které by se teoretická plocha výrubu ještě zmenšila. Vzorové příčné řezy (viz níže) jsou v místech s nulovým převýšením.



V následujícím ekonomickém srovnání je zohledněna cena samotné ražby tunelu, ale i ceny konstrukcí, které se mění v závislosti na dispozici tunelového profilu jako bednění odvodňovacích žlabů a podkladní a výplňový beton C 16/20. Na řešení stavebního objektu tunelů má ale vliv mnoho dalších faktorů (změna předpokládané geologie, technologie výstavby, technologický postup prací,...), které mohou ceny značně ovlivnit. U ekonomického posouzení v tunelech jsou použité předpokládané ceny výrubu na běžný metr délky tunelu zohledňující odlišnou geologickou skladbu prostředí v tunelu Homolka a Chlum. Samotná cena 1 m² tunelového profilu je odvozená z ceny za 1 m³ obestavěného prostoru tunelového profilu. [9]

Tab. 7: Ekonomické srovnání tunelu s PJD a KK [9]

	Tunel s klasickou konstrukcí	Tunel s konstrukcí PJD
Cena železničního svršku	28 376 838 Kč	53 691 040 Kč
Cena tunelového tubusu	4 492 119 162 Kč	4 369 181 960 Kč
Cena celkem v okamžiku dokončení stavby	4 520 496 000 Kč	4 422 873 000 Kč

Z přehledu jde tedy jasně vidět, že v případě použití PJD v tunelu není vyšší cena samotného železničního svršku rozhodující, ale naopak přinese výraznější úspory celkových nákladů stavby. Samozřejmě to nelze říci o všech tunelových stavbách a je potřeba zohlednit i širší souvislosti, jako třeba délku tunelu. Například na trati, která je budována klasickou konstrukcí nemá smysl v krátkých tunelech budovat PJD, protože to přináší komplikaci v podobě častých přechodových oblastí, které jsou technologicky, cenově i údržbově náročné. Ale v tomto případě délky tunelu přes 4 km vychází jako ekonomičtější varianta s PJD.

Všeobecně i ze zahraničních zkušeností vychází poměr nákladů mezi použitím PJD a klasické konstrukce cca 1,5 v tunelu a 2,0 na zemním tělese. Tento poměr porovnává pouze náklady v okamžiku dokončení stavby. Celkové náklady LCC mohou dokonce vycházet výhodněji pro PJD. Například v Japonsku uvádí poměr nákladů na údržbu PJD a KK 0,18-0,33 a návratnost při 12 mil.hrt/rok cca 10 let.



V delších tunelech navíc dochází k velké úspoře nákladů na vybudování samotného tubusu, takže náklady jsou nižší už v okamžiku dokončení stavby. Není tedy potřeba zohledňovat návratnost vyšších výdajů delší životností a menší údržbou koleje. [4]

4.3 Přejchodová oblast

Úsek koleje v tunelu, kterému je potřeba vždy věnovat pozornost, nejen při konstrukci pevné jízdní dráhy, je přechodová oblast z důvodu měnící se svislé tuhosti konstrukce železničního spodku. Jak bylo už několikrát zmíněno, častokrát ideální podmínky tuhého dna tunelu přispívají k použití PJD, tudíž je potřeba řešit nejen přechodovou oblast železničního spodku mezi tunelem a zemním tělesem, ale také přechodovou oblast železničního svršku i spodku mezi pevnou jízdní dráhou a klasickou konstrukcí s kolejovým ložem.

Přejchodová oblast železničního svršku nesmí být zřízena v místě přechodové oblasti tunelu. Dále se nesmí přechodová oblast zřizovat v přechodnici a vzešupnici a není doporučeno ji zřizovat ani v oblouku. Přejchodová oblast železničního spodku se navrhuje na délku minimálně $V_{\max}/3,60$ m, kde V_{\max} je maximální projektovaná rychlost v $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. [2] Prakticky všechny systémy PJD řeší tuto problematiku velice podrobně a nabízí svá konstrukční řešení. Využívá se technologických postupů jako prolévání šterkového lože pryskyřicí, ztužujících kolejnic a dalších. (viz kapitola 1.6) Při dodržení technologických postupů ale nevykazují tyto úseky žádné problémy ani výraznější komplikace při realizaci ani při provozu. Jako příklad je uveden podrobný popis přechodové oblasti systému ÖBB-Porr v kapitole 2.3.2.

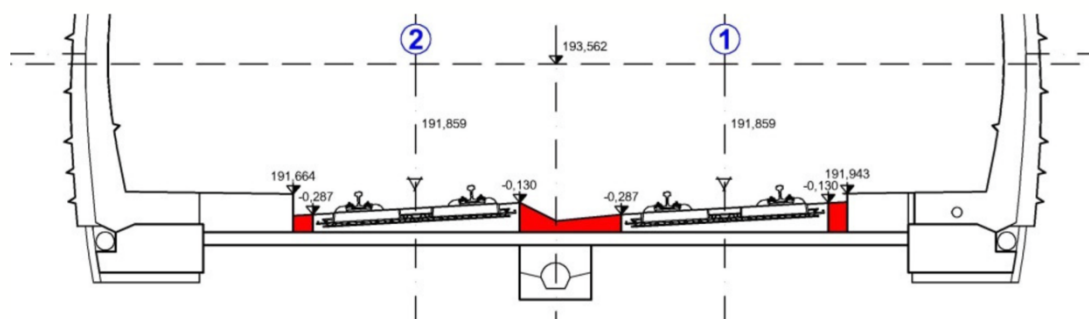
S použitím a umístěním přechodové oblasti může souviset také způsob ražby tunelu. Například při ražení pomocí TBM je potřeba v předportáli tunelu zřídit betonové lože pro nájezd dlouhého razícího štítu jako je tomu v případě Ejpovicových tunelů. Tuhé podloží se tedy nenachází pouze v tunelu a tak se s výhodou nabízí možnost prodloužení PJD a zřízení přechodové oblasti dál od přechodové oblasti tunelu. Toho lze právě v Ejpovicích využít, protože v oblasti západního předportáli se nachází přechodnice oblouku trati, kde se přechodová oblast nesmí zřizovat.[17]



4.4 Konkrétní nově dokončené a právě realizované projekty

4.4.1 Tunel Turecký vrch - Slovensko

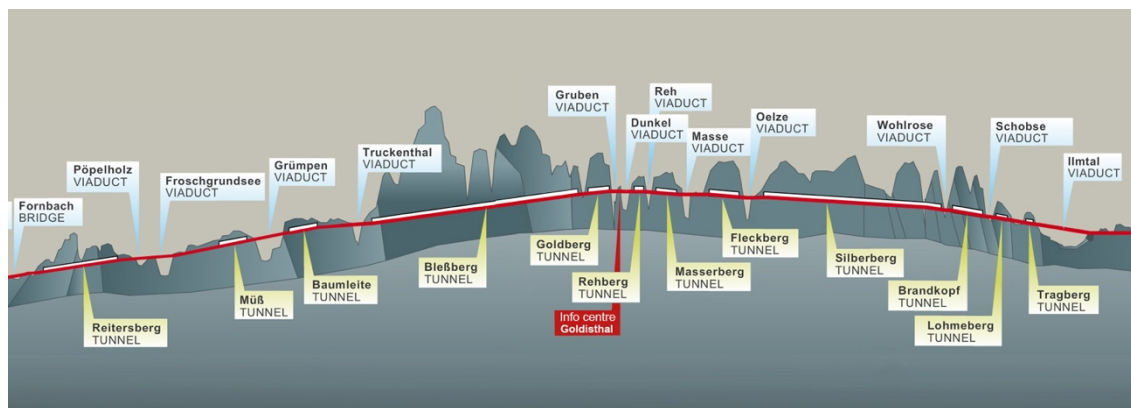
Tunel Turecký vrch je poměrně nedávno dokončený dvoukolejný tunel o délce 1775 m na trati Bratislava – Žilina. Tunel byl ražený NRTM a je zde použit systém PJD Rheda 2000 s návrhovou rychlostí 200 km/h. V blízkosti severního portálu se nachází most a proto z důvodů uvedených výše byla PJD protažena až do Trenčianských Bohuslavíc. Celkem bylo položeno 4480 m PJD. Betonáž PJD začala v srpnu 2011 a práce uvnitř tunelu pokračovaly i v průběhu zimy. Při stavbě byla používána dvoucestná vozidla a denně bylo dokončeno cca 50m nové koleje PJD.



Obr. 29: řez PJD v tunelu Turecký vrch [13]

4.4.2 VRT Projekt 8 - Německo

Jeden z největších právě realizovaných evropských projektů VRT je projekt německých DB, který propojí vysokorychlostní železnici Mnichov a Berlín. Na úseku této trasy, která prochází velmi členitým terénem mezi městy Ebenfeld a Erfurt o celkové délce 107 km s návrhovou rychlostí 300 km/h se nachází celkem 22 tunelů o celkové délce 41 km.



Obr. 30: VRT Projekt 8 Norinberk-Berlin [18]



Dvě třetiny jsou budovány systémem PJD ÖBB-Porr a třetina systémem Bögl. Nejdelším tunelem na této trase je dvoukolejný tunel Blessberg s délkou 8 134 m. V tomto tunelu je použita pevná jízdní dráha typu Bögl. Celý úsek má být uveden do provozu v roce 2017. [18]

4.4.3 Gotthardský úpatní tunel - Švýcarsko

Jedná se o nejdelší železniční tunel na světě o délce 57 km. Tento úpatní tunel s dvěma jednokolejnými tubusy, který se nachází na trati mezi Milánem a Curychem a prochází pod Gotthardským masivem výrazně zrychlí spojení mezi těmito dvěma městy a stane se tak významnou konkurencí nejen silniční, ale i letecké dopravy. Švýcarsko se tak zároveň napojí na evropskou VRT síť, protože návrhová rychlost v tunelu je 240 km/h. V tunelu se nachází dvě bezpečnostní stanice Faido a Sedrun, které dělí délku na třetiny a umožňují nouzový únik při havárii. Je zde zbudováno 114 km PJD systému SBB, tedy systému s dvoublokovými pražci s pryžovou „botou“ zalitých do betonové desky. Délka tunelu a možný přístup pouze ze severního a jižního portálu přináší několik logistických a technologických problémů nejen pro výstavbu PJD.



Obr. 31: Pohled na dokončenou PJD v Gotthardském tunelu [12]



Pokládka PJD probíhala speciálním vlakem o 22 upravených vozech, jejíž součástí byla i přípravná betonové směsi na místě kvůli dosažení potřebné kvality betonu. První fází bylo rozmístění pražců na dno tunelu a osazení 120 m dlouhých kolejnic. Vždy byl takto nachystán 2,6 km dlouhý úsek. Tato fáze trvala 12 dní. Druhou fází byla betonáž samotné koleje. Postup prací probíhal na dvě osmihodinové směny v tunelu a jednu směnu pro přípravu vlaku pro další záběr stavby. Po příjezdu vlaku do tunelu k poslední dokončené části PJD se oddělila speciální část vlaku. Tento stroj pojížděl podélné boční „prahy“ tunelu a umožnil přesnou rektifikaci pražců na dně tunelu a následnou betonáž prostoru mezi pražci. V jednom pracovním záběru bylo použito 6 m³ betonové směsi. Následovala ruční úprava povrchu a takto se celý pracovní postup opakoval směrem zpět k „betonovacímu“ vlaku. Za dvě směny bylo tímto způsobem možno zbudovat 264 m PJD. [12]

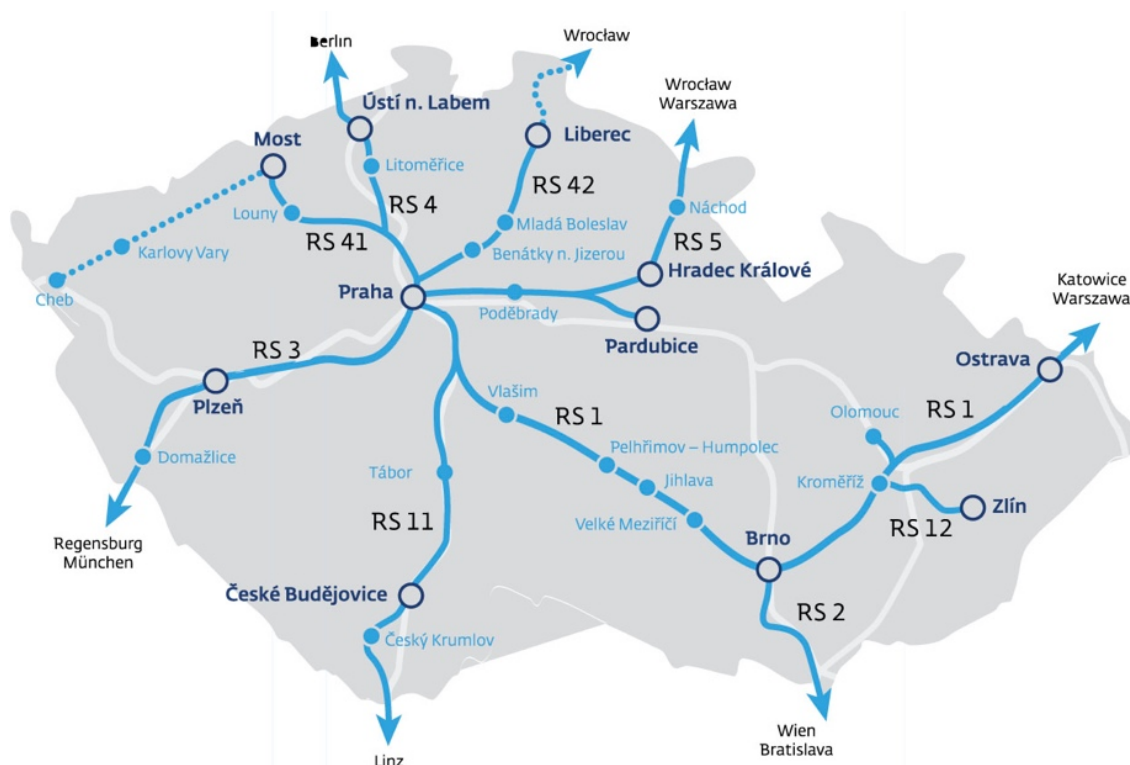


Obr. 32: Pokládka PJD v Gotthardském tunelu [12]



5 Perspektivy PJD v tunelech v ČR

Perspektiva budoucí výstavby pevné jízdní dráhy v tunelech na tratích v České republice je především pro použití při plánovaných projektech vysokorychlostní železnice a to nejen v tunelech, ale i po celé délce budoucích tratí. Dále pevná jízdní dráha nalezne uplatnění při modernizaci stávajících koridorů, ať už v nově budovaných, nebo modernizovaných tunelech o délce aspoň 500 m. A samozřejmě také v tunelech metra, což se již dlouhodobě děje.



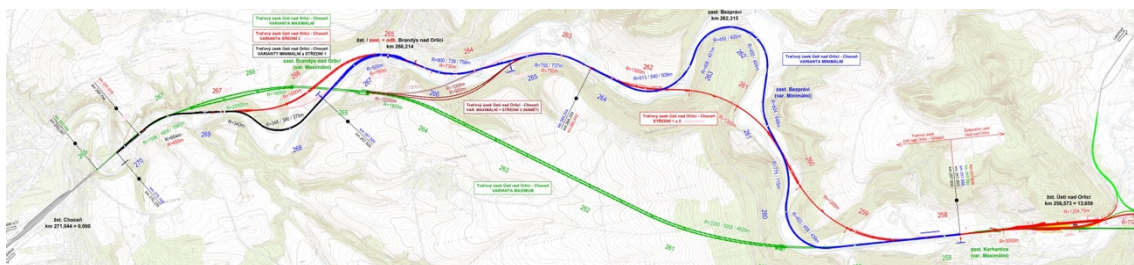
Obr. 33: Studie VRT sítě v České republice [15]

Co se týče perspektivy použití jednotlivých konstrukčních typů PJD, mají největší šanci na úspěch systémy Rheda 2000 a ÖBB-Porr, které už jsou v Česku použity na testovacích úsecích a dlouhodobě ověřovány. Jak již bylo zmíněno, systém ÖBB-Porr je projektován v právě raženém Ejpovickém tunelu. Ostatní systémy nemají větší šanci na úspěch, ať už z důvodu chybějících zkušeností z jejich použitím v podmínkách ČR (jako například SBB či LVT), nebo z důvodu některých technologických problémů (například systémy s betonovými pražci na asfaltové desce nebo systémy s kontinuálně podepřenými kolejnicemi), nebo z důvodu nutnosti po-



užití speciálních strojů i při budování kratších úseků (například systém Züblin v původní variantě). Navíc licenci pro výrobu pražců Rheda 2000 respektive panelů a ÖBB-Porr vlastní ŽPSV a.s. Po nejnovějších zkušenostech přináší více výhod v podobě menší konstrukční výšky, rychlejší rektifikace, přesnější výroby a snazších oprav spíše systém ÖBB-Porr o čemž svědčí i jeho použití v Ejpovicích.

Příklad konkrétního projektu, kde se uvažuje použití pevné jízdní dráhy v tunelu, je nová železniční trať na I. koridoru mezi Ústím nad Orlicí a Choceň. Trať zde prochází silně členitým terénem údolí Tiché Orlice a úzké údolí se strmými svahy značně omezuje prostorové vedení trasy. Současná maximální rychlost v části úseku dosahuje pouze 70 - 85 km/h. Bylo navrženo několik variant nového vedení trasy tímto komplikovaným terénem a byla schválena varianta Střed 2, která přináší zvýšení maximální rychlosti na 110 - 160 km/h. Na trase jsou projektovány 2 tunely o délkách 691 m a 561 m. Před třetím tunelem o délce 379 m navíc vede trasa po estakádě. Množství těchto umělých staveb nabízí použití PJD jako efektivní varianty nejen v tunelech, ale na celé trase. [9]

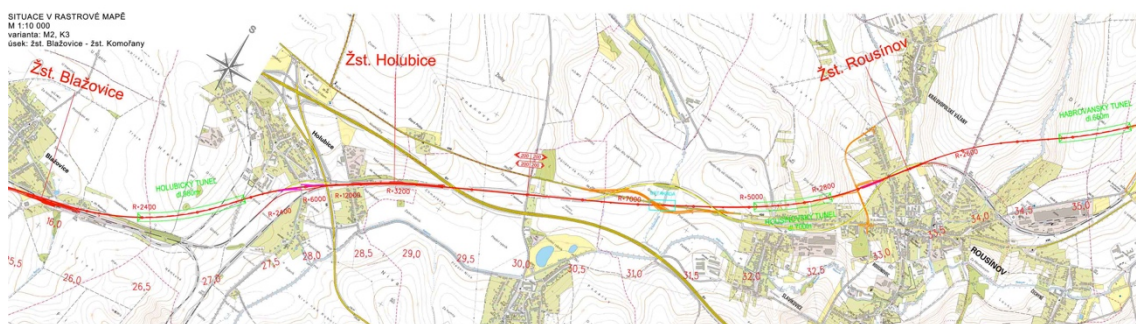


Obr. 34: Studie Ústí nad Orlicí - Choceň [9]

Podobný projekt se chystá také na IV. koridoru na trati Sudoměřice – Votice. V současné době mohou vlaky mezi Sudoměřicemi a Voticemi jezdit rychlostí pouze 60 - 100 km/h. Aby i zde mohly vlaky dosahovat rychlosti až 160 km/h, je potřeba vést tuto část koridoru ve zcela nové stopě. Na trati budou vybudovány dva tunely, Deboreč o délce 660 a Mezno o délce 840 metrů. Na IV. koridoru se nachází ještě jeden úsek trati a to Nemanice – Ševětín, kde se uvažuje o výstavbě dvou tunelů, Hosínského (3 120 m) a Chotýčanského (4 180 m). Z tohoto důvodu se jedná o technicky i ekonomicky náročné projekty a musí se zhodnotit jejich efektivita. Ale i zde se v případě realizace bude uvažovat o PJD. [9]



Dalším příkladem chystaného projektu je modernizace trati Brno – Přerov, který už má patřit do sítě vysokorychlostních tratí. Bude se tedy jednat o první VRT trať v České republice. Po zvážení několika variant i varianty s návrhovou rychlostí 350 km/h, která by musela vést úplně v nové stopě, byla schválena varianta M2, která počítá s modernizací stávající tratě a zvýšení rychlostí ze současných 80 – 100 km/h na 200 km/h na 95 % trati. Což je v České republice zatím nevídané číslo. Podle studie proveditelnosti by trať měla být hotova do roku 2025 a na trase by se mělo nacházet 6 tunelů o délkách 980, 700, 650, 500, 380 a 660 m. Bude se jednat o VRT trať a proto se určitě bude i v tomto případě zvažovat použití konstrukce pevné jízdní dráhy.



Obr. 35: Studie části trati Brno - Přerov [9]



Závěr

Cílem této práce bylo popsat a shrnout problematiku použití konstrukce pevné jízdní dráhy v tunelech v podmínkách České republiky. I přesto, že v České republice existují už dva testovací úseky, tak se stále jedná o konstrukci, se kterou nejsou velké zkušenosti. Práce se snaží popsat základní principy technologie výstavby a skladby konstrukce pevné jízdní dráhy. Zároveň upozorňuje na některá technická řešení a přináší komplexní srovnání pevné jízdní dráhy s klasickou konstrukcí s kolejovým ložem především pro použití v tunelu. Existuje velké množství přístupů ke konstrukci PJD a proto práce přehledně rozděluje jednotlivé systémy podle technologie výstavby a snaží se popsat jejich výhody a nevýhody. Do hloubky se zabývá systémy Rheda 2000 a ÖBB-Porr, u kterých je největší pravděpodobnost budoucího použití v České republice. Dále podrobně popisuje technologii výstavby těchto dvou konstrukcí včetně způsobu provedení přechodových oblastí mezi pevnou jízdní dráhou a klasickou konstrukcí s kolejovým ložem.

Práce přináší podrobnou rešerši výhod použití pevné jízdní dráhy v tunelech. Mezi hlavní výhody patří nízká konstrukční výška, což může přinést výrazné zmenšení teoretické plochy výrubu při ražbě tunelu a tím výrazné snížení celkových nákladů stavby i při vyšší ceně samotné koleje. Dále minimální údržba a stabilita geometrické polohy koleje, která opět přináší snížení nákladů a zvyšuje bezpečnost v tunelu. V neposlední řadě mezi výhody patří možnost pojíždění koleje vozidly integrovaného záchranného systému. Navíc v tunelech není potřeba řešit složitý problém s konsolidací zemní pláně a konstrukce umožňuje větší převýšení, čehož lze využít pro vyšší návrhové rychlosti v menších poloměrech oblouků. Díky tomu je možné snadnější vedení trasy například podél dálnic nebo při modernizacích blíž stávající stopě.

Díky těmto výhodám se stává pevná jízdní dráha konkurenceschopnou konstrukcí nejen pro použití na budoucích vysokorychlostních tratích, ale také v tunelech na stávajících koridorech. Pokud má i Česká republika držet krok s okolními státy a využívat výhod železniční dopravy, jak pro vysokorychlostní



osobní, tak pro rychlou nákladní dopravu, bude muset i nadále rozvíjet a modernizovat železniční síť. Při projektování těchto staveb bude bezesporu pevná jízdní dráha hrát důležitou roli.

Ve srovnání konkrétních konstrukcí pevné jízdní dráhy pro použití v tunelech, byl kladen důraz především na nejpoužívanější systémy ve světě a také na již provozované typy v České republice. V podrobném srovnání systémů Rheda 2000 a ÖBB-Porr se jako výhodnější jeví systém ÖBB-Porr, i přesto, že použití těžkých panelů přináší složitější logistiku především v jednokolejných tunelech. Mezi hlavní výhody systému ÖBB-Porr patří nižší konstrukční výška než u systému Rheda 2000, menší pracnost a snadnější rektifikace GPK při výstavbě.



Literatura a podklady

- [1] DARR, E., WERNER, F. *Feste fahrbahn - Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Strassenbahn*. Německo: Eurailpress, 2006.
- [2] SŽDC. *S9 - Pevná jízdní dráha*. Praha: Správa železniční dopravní cesty s.p., 2012.
- [3] UIC. *High Speed Around the World*. Paříž: UIC Lecture, 2016.
- [4] MICHAS, G. *Slab Track Systems for High-Speed Railways*. Stockholm: Royal institute of technology, 2012.
- [5] KREJČIŘÍKOVÁ, H., *Železniční stavby 2*. Praha: ČVUT, 2013.
- [6] DARR, E., WERNER, F. *Feste Fahrbahn - Innovative Oberbauart des Fahrwegs In Deine Bahn*. Německo: Eurailpress, 2015.
- [7] RAIL.ONE GmbH. *Rheda 2000® The ballastless track system*. Německo: Rail.one GmbH Pfleiderer track systems, 2011.
- [8] HOPF, G. *Slab track Austria – System ÖBB-PORR elastically supported slab*. Rakousko: Chiari & Partner ZT, 2012.
- [9] SŽDC s.p., materiály poskytnuté Ing. Radkem Bernatíkem z odboru Traťového hospodářství.
- [10] VOSSLOH AG. *High Speed in Europe – Vossloh fastening systems*. Německo: Vossloh AG, 2014.
- [11] SERDELOVÁ, K., VIČAN, J. *Analysis and design of steel bridges with ballastless track*. Žilina: Žilinská univerzita, 2015.
- [12] MICHAEL, A., DIXON, CH. *Slab track in Gotthard tunnel*. Švýcarsko: Society for Mining Metallurgy and Exploration, 2013.



- [13] IŽVOLT, L., ŠESTÁKOVÁ, J., VILÍMEK, P. *The first Construction of Unconventional Type of Railway Superstructure in The ŽSR Infrastructure*. Žilina: Žilinská univerzita, 2013.
- [14] MIKULÁŠEK, P. Rekonstrukce Střelenského tunelu. *Tunel*, 2014, roč. 23, č. 1, str. 63-66.
- [15] ŠLEGR, P. a kol. *Rychlá železnice i v České republice*. Praha: Centrum pro efektivní dopravu, o.s., 2012.
- [16] *2_3 Pevná jízdní dráha: CESTI Workshop*. Publikováno Kolejconsult & servis, spol.s r.o., Praha, 2013.
- [17] ustní rozhovor s Ing. Radkem Bernatíkem ze Správy železniční dopravní cesty s.p., generální ředitelství odbor traťového hospodářství.
- [18] German Unity Transport Project 8. http://www.vde8.de/---_site.project..ls_dir._likecms.html (online 4. dubna, 2016).
- [19] ŽPSV Kolejnicové podpory železničních a tramvajových kolejí. <http://www.zpsv.cz/Kategorie.aspx?lang=cz&cat=KP&sku=kolejove-dopravni-stavby&skup=kolejnicove> (online 25. dubna, 2016).
- [20] Slab track systém Züblin. http://www.zueblin.de/databases/internet/_public/content.nsf/web/EN-ZUEBLIN.DE-REFERENCES-BUILDING%20SYSTEM%20Zueblin (online 2. května 2016).
- [21] FFB Slab track systém Bögl. <https://max-boegl.de/en/performance-range/track-technologies/ffb-slab-track-system-boegl.html> (online 2. května 2016).
- [22] Tunel Chotýčany - varianty technického řešení a způsobu ražby. <http://www.zelpage.cz/clanky/tunel-chotycany---varianty-technickeho-reseni-a-zpusobu-razby> (online 10. května 2016).
- [23] Záchranné a přístupové plochy BRENS ACCESS. http://www.brens.cz/brens_-_access.htm (online 12. Května 2016).



Seznam obrázků

Obr. 1: Profil konstrukce PJD bez pražců a s pražci [1].....	12
Obr. 2: Šířka pevné jízdní dráhy a roznášecí úhel [1].....	13
Obr. 3: Základní rozdělení PJD z hlediska technologie provádění [16]	14
Obr. 4: Kolejový absorbér hluku BRENS® [vl. fotoarchiv 29.4.2016]	24
Obr. 5: Mass spring systém v konstrukci ÖBB-Porr [8]	25
Obr. 6: Absorbér hluku BRENS® s umělou trávou [vl. fotoarchiv 29.4.2016].....	26
Obr. 7: Přejížděvací oblast na trati Č. Třebová – Přerov [vl. fotoarchiv 29.4.2016] .	27
Obr. 8: Přejížděvací oblast systému Rheda 2000 [9].....	28
Obr. 9: Mapa s vyznačením použití, či plánování VRT stav k 12/ 2015 [3]	31
Obr. 10: Mapa evropské železniční sítě s vyznačením VRT stav k 12/ 2015 [3]	32
Obr. 11: Nynější stav [vlastní fotoarchiv 29.4.2016].....	34
Obr. 12: Pohled na PJD ve Střelenském tunelu při výstavbě [14]	35
Obr. 13: Vzorový příčný řez Střelenský tunelem [9].....	36
Obr. 14: Pokládání panelů ÖBB-Porr ve Střelenském tunelu [9]	37
Obr. 15: Stav po dokončení PJD ve Střelenském tunelu [9]	37
Obr. 16: Vzorový příčný řez tunelu Homolka [9]	38
Obr. 17: Porovnání typu Rheda Sengeberg a Rheda 2000 [7]	39
Obr. 18: Řez konstrukcí PJD typu Rheda 2000 [7].....	40
Obr. 19: Řez konstrukcí RHEDA 2000 v tunelu [7].....	41
Obr. 20: Pohled na konstrukci Rheda 2000 před betonáží [19]	42
Obr. 21: Rektifikační mechanismus při stavbě PJD Rheda 2000 [19]	43
Obr. 22: Systém PJD ÖBB-Porr [8]	44
Obr. 23: Pokládání prefabrikovaných panelů ÖBB-Porr [9].....	45
Obr. 24: Pokládání prefabrikovaných panelů ÖBB-Porr [9].....	46
Obr. 25: Řez systémem PJD ÖBB-Porr v tunelu [8].....	46
Obr. 26: Panely BRENS ACCESS® v předportáli tunelu Turecký vrch [23]	49
Obr. 27: Řez jednokolejným tunelem s kolejí se šterkovým ložem [9].....	51
Obr. 28: Řez jednokolejným tunelem s kolejí PJD [9].....	51
Obr. 29: řez PJD v tunelu Turecký vrch [13]	54
Obr. 30: VRT Projekt 8 Norinberk-Berlin [18].....	54
Obr. 31: Pohled na dokončenou PJD v Gotthardském tunelu [12]	55



Obr. 32: Pokládka PJD v Gotthardském tunelu [12]	56
Obr. 33: Studie VRT sítě v České republice [15]	57
Obr. 34: Studie Ústí nad Orlicí - Choceň [9]	58
Obr. 35: Studie části trati Brno - Přerov [9]	59

Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdělení konstrukčních typů a jejich výrobců	14
Tab. 2: Minimální požadovaná únosnost a míra zhutnění [2]	15
Tab. 3: Souhrn kritérií pro jednotlivé vrstvy [2]	19
Tab. 4: Srovnání podílů na celkové pružnosti koleje u KK a PJD [1]	21
Tab. 5: Srovnání výhod a nevýhod PJD a KK [1,2,3,4,5,6,7]	22
Tab. 6: Srovnání výhod a nevýhod systému Rheda 2000 a ÖBB-Porr	47
Tab. 7: Ekonomické srovnání tunelu s PJD a KK [9]	52