

Vysokorychlostní železniční tratě



Lukáš Týfa

Ústav dopravních systémů (K612)

Přednáška č. 8

Geometrické a další parametry koleje na vysokorychlostních tratích

- Anotace:**
- Dokumenty určující parametry VRT: TSI, EN, UIC
 - Geometrické parametry koleje (GPK)
 - Nástupiště

Dokumenty o GPK na VRT

Právní dokumenty obecně závazné:

- rozhodnutí Komise EU č. 2002/732/ES o **technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „Infrastruktura“** transevropského vysokorychlostního železničního systému podle čl. 6 odst. 1 směrnice Rady EU č. 96/48/ES
- vyhláška MD č. 352/2004 Sb., o **provozní a technické propojenosti evropského železničního systému**, ve znění vyhlášky č. 377/2006 Sb. (zejm. Příloha – kap. 1.1: Závazné dokumenty pro subsystém infrastruktura) – *transpozice části všech TSI do právního řádu ČR*

Dokumenty o GPK na VRT

Klíčové technické normy:

- prEN 13803-1:2006 (73 6350) Železniční aplikace – Kolej – Parametry návrhu polohy koleje – Kolej rozchodu 1435 mm a širšího – Část 1: Běžná kolej (*bez náhlých změn křivosti, tj. bez výhybkových konstrukcí a s oblouky bez přechodnic – většinou ve zhlavích dopraven; „pr“ = návrh – poslední verze XI/2006*)
- ČSN EN 13803-2:2006 (73 6350) Železniční aplikace – Kolej – Parametry návrhu polohy koleje – Kolej rozchodu 1435 mm a širšího – Část 2: Výhybky a výhybkové konstrukce a porovnatelné situace návrhu polohy koleje s náhlou změnou křivosti (*konečný návrh předložen do komise ČNI → harmonizovaná norma*)

Dokumenty o GPK na VRT

Další existující dokumenty:

- ČSN 73 6301 – Projektování železničních drah. 1998. (*zastaralá, pro $V > 160$ km/h doporučuje vyhlášky UIC*)
- vyhláška UIC 703. Trasovací parametry koleje pro tratě s provozem rychlých osobních vlaků. 1989. (*shrnuje zákl. GPK na tehdy provozovaných VRT jednotl. států*)
- Design of New Lines for Speeds of 300 – 350 km/h. State of the Art. First Report. UIC. 25.10.2001 (*dtto výše, ale podrobnější a rozsáhlejší*)
- doporučení Komise EU ze dne 21. 3. 2001, o základních parametrech transevropského vysokorychlostního železničního systému uvedeného v článku 5(3)(b) směrnice 96/48/ES. (*zjednodušený předchůdce TSI*)

TSI subsystému „Infrastruktura“

Charakteristika subsystému:

- základní parametry
- rozhraní (styk s ostatními subsystémy)
- výkonnostní požadavky podle kategorie trati:
 - I.: speciálně vybudované VRT pro rychlost 250 km/h a více
(musí umožnit jízdu vlaků o délce 400 m, max. hmotnosti 1 000 t a min. rychlosti 250 km/h)
 - II.: modernizované tratě pro rychlost 200 km/h a více
 - III.: modernizované tratě se zvláštními vlastnostmi

TSI subsystému „Infrastruktura“

Základní parametry dle Směrnice 96/48/ES:

- minimální průjezdný průřez (parametr č. 1)
- minimální poloměr oblouku koleje (2)
- rozchod koleje (3)
- maximální namáhání koleje (4)
- minimální délka nástupiště (5)
- výška nástupiště (6)
- mezní hodnoty pro vnější hluk (17)
- mezní hodnoty pro vnější vibrace (18)
- vlastnosti související s přepravou tělesně postižených osob (22)

Dále je nutno přihlížet k následujícím parametrům:

- maximální kolísání tlaku v tunelu (23)
- maximální sklony klesání a stoupání (24)
- minimální osová vzdálenost kolejí (25)

TSI subsystému „Infrastruktura“

Minimální průjezdný průřez:

- navržený dle vztažného kinematického obrysu GC
- nástavec pro elektrizované tratě – dle TSI pro energii

Minimální osová vzdálenost kolejí:

- v projektové fázi: min. 4,50 m
- může být snížena dle předpokládané výkonnosti na:

Rychlost vlaků nevybavených naklápěním vozidlových skříní	Minimální osová vzdálenost kolejí
$v \leq 250 \text{ km/h}$	4,00 m
$250 \text{ km/h} < v \leq 300 \text{ km/h}$	4,20 m

TSI subsystému „Infrastruktura“

Maximální podélný sklon:

- v projektové fázi: max. **35 ‰**
- na délce 10 km tratě je max. průměr sklonu 25 ‰
- max. délka úseku o sklonu 35 ‰ je 6 km

Odstavné a předjízdné koleje:

- min. poloměr směrového oblouku: 150 m (výj. 125 m)
- min. poloměr zaoblení lomu nivelety: vypuklý 600 m; vydutý 900 m
- max. podélný sklon: 2 ‰
- min. užitečná délka: 400 m

TSI subsystému „Infrastruktura“

Tunely:

- max. kolísání tlaku podél vlaku jedoucího nejvyšší rychlostí: 10 kPa
- plocha příčného řezu vlaku obrysu GC: 12 m²

Převýšení koleje:

- v projektové fázi: max. 180 mm
- v provozu: max. odchylka ± 20 mm, nejvýše 190 mm
- na VRT pouze pro osobní dopravu: max. 200 mm

TSI subsystému „Infrastruktura“

Nedostatek převýšení:

- kolej a hlavní směr výhybky:

Rozsah rychlostí (km/h)	Mezní hodnota (mm)
$250 \leq v \leq 300$	100
$300 < v$	80

- odbočná větev výhybky:

rychlost v odb. větvi [km/h]	mezní hodnota [mm]
$30 < V \leq 70$	120
$70 < V \leq 170$	105
$170 < V \leq 230$	85

TSI subsystému „Infrastruktura“

Rozchod koleje:

- měří se $(14,5 \pm 0,5)$ mm pod temenem kolejnice
- klouzavý průměr na délce 100 m musí být v mezích:

Rozsah rychlostí	Průměrný rozchod (mm) na délce 100 m		
	Teoretická referenční hodnota (projekt)	V provozu, na přímé koleji a v obloucích o poloměru $r > 10\,000$ m	V provozu, v obloucích o poloměru $r \leq 10\,000$ m
$230 \text{ km/h} < v \leq 250 \text{ km/h}$	1 435 – 1 437	1 433 – 1 442	1 433 – 1 445
$250 \text{ km/h} < v \leq 280 \text{ km/h}$	1 435 – 1 437	1 434 – 1 440	1 434 – 1 443
$v > 280 \text{ km/h}$	1 435 – 1 437	1 434 – 1 440	1 434 – 1 443

TSI subsystému „Infrastruktura“

Nástupiště:

- cestující nesmí být na nástupišti u koleje, jestliže po ní má projíždět vlak rychlostí 250 km/h a vyšší
- výška nástupišť nad TK: 550 mm nebo 760 mm
- povolené odchylky: výška $-30/+0$ mm; vzdálenost osa koleje hrana nástupiště $-0/+50$ mm
- min. délka: 400 m (výstup všemi dveřmi)
- nástupiště musí umožnit přístup tělesně postiženým cestujícím a kočárkům
- vybavení audiovizuálním informačním systémem (vč. modifikací pro zrakově a sluchově postižené)

prEN 13803-1:2006 – Běžná kolej

Druhy mezních parametrů:

- doporučené
- maximální / minimální:
 - s přímým vlivem na bezpečnost
 - bez přímého vlivu na bezpečnost (komfort a údržba)

Oblast působnosti normy:

pro hlavní tratě o rozchodu 1435 mm a širším (*dále uvedeny všechny parametry jen pro normální rozchod*) pro rychlosti **(80 ÷ 300) km/h**

prEN 13803-1:2006 – Běžná kolej

Návrhové parametry koleje:

- poloměr směrového oblouku R [m] (*S)
- převýšení D [mm] (*S)
- nedostatek převýšení I [mm] (*S) **(*S) – vliv na bezpečnost**
- přebytek převýšení E [mm]
- změna převýšení jako funkce času (časová změna převýšení) dD/dt [mm/s]
- změna převýšení jako funkce délky (sklon vzestupnice) dD/ds [mm/m] (*S)
- změna nedostatku převýšení jako funkce času (časová změna nedostatku převýšení) dI/dt [mm/s]
- délka vzestupnice L_D [m] (*S)
- délka přechodnice v horizontální rovině L_K [m]
- délka směrových prvků (kružnicové oblouky a mezipřímé) L_i [m]
- poloměr vertikálních oblouků (zaoblení lomu nivelety) R_v [m]
- vertikální zrychlení (zaoblení lomu nivelety) a_v [m/s²]
- rychlost V [km/h] (*S)

prEN 13803-1:2006 – Běžná kolej

Poloměr směrového oblouku R :

- musí být nejméně 150 m

$$\frac{C}{D - E_{\text{lim}}} V_{\text{min}}^2 \geq R \geq \frac{C}{D + I_{\text{lim}}} V_{\text{max}}^2 \quad [\text{m}]$$

$$D > E_{\text{lim}}$$

$$\text{kde: } C = 11,8 \text{ mm} \cdot \text{m} \cdot \text{h}^2 / \text{km}^2$$

Převýšení D :

- doporučená mezní hodnota: 160 mm
- maximální limitní hodnota: 180 mm

prEN 13803-1:2006 – Běžná kolej

Nedostatek převýšení I :

$$I = C \cdot \frac{V^2}{R} - D = D_{EQ} - D \leq I_{\text{lim}} \quad a_q = \left(\frac{V}{q_V} \right)^2 \frac{1}{R} - \frac{g \cdot D}{1500 \text{ mm}} = \frac{g \cdot I}{1500 \text{ mm}} \leq (a_q)_{\text{lim}} = \frac{g \cdot I_{\text{lim}}}{1500 \text{ mm}}$$

	Recommended limiting values	Maximum limiting values
Non-tilting trains		
80 km/h \leq V \leq 160 km/h	168 mm	183 mm
160 km/h $<$ V $<$ 200 km/h	153 mm	183 mm
200 km/h $<$ V \leq 230 km/h	153 mm	168 mm ^{ab}
230 km/h $<$ V \leq 250 km/h	130 mm	153 mm ^{ab}
250 km/h $<$ V \leq 300 km/h	100 mm	130 mm ^{abc}
Tilting trains		
80 km/h \leq V \leq 300 km/h	275 mm ^b	306 mm ^b

a. Trains complying with EN 14363, equipped with a cant deficiency compensation system, may be permitted by the Infrastructure Manager to run with higher cant deficiency values.

b. The Infrastructure Manager may require qualification of a part of a line for the introduction of trains running at these or higher cant deficiencies, taking into account the required track quality and other conditions.

c. A cant deficiency of 153 mm can be used on non-ballasted tracks for speeds in excess of 250 km/h.

prEN 13803-1:2006 – Běžná kolej

Časová změna převýšení dD/dt :

1) pro vozidla bez naklápění vozové skříně

- **lineární vzestupnice** (konst. změna převýšení za čas):

- doporučená limitní hodnota: 50 mm/s

- maximální limitní hodnota: 85 mm/s

- **nelineární vzestupnice**:

- doporučená limitní hodnota: 55 mm/s

- maximální limitní hodnota: 85 mm/s

2) pro vozidla s naklápěním vozové skříně

- doporučená limitní hodnota: 75 mm/s

prEN 13803-1:2006 – Běžná kolej

Sklon vzestupnice dD/ds :

- doporučená limitní hodnota: 2,25 mm/m

- maximální limitní hodnota: 2,50 mm/m

Časová změna nedostatku převýšení dI/dt :

1) pro vozidla bez naklápění vozové skříně

- doporučená limitní hodnota: 55 mm/s

- maximální limitní hodnota: 95 mm/s

2) pro vozidla s naklápěním vozové skříně

- doporučená limitní hodnota: 100 mm/s

prEN 13803-1:2006 – Běžná kolej

Délka vzestupnice L_D a přechodnice L_K :

$$L_D \geq q_N \cdot \frac{V}{q_V} \cdot \Delta D \cdot \left(\frac{dD}{dt} \right)_{\text{lim}}^{-1}$$

kde: $q_V = 3,6 \text{ km}\cdot\text{s}/(\text{h}\cdot\text{m})$

$$L_D \geq q_N \cdot \Delta D \cdot \left(\frac{dD}{ds} \right)_{\text{lim}}^{-1}$$

koeficient q_N (dle typu křivek):

- lineární: 1
- dle Blossse: 1,5
- cosinusoida: $\pi/2$
- dle Helmerta / Schramma: 2
- dle Kleina (sinusoida): 2

$$L_K \geq q_N \cdot \frac{V}{q_V} \cdot \Delta I \cdot \left(\frac{dI}{dt} \right)_{\text{lim}}^{-1}$$

Délka kružnicového oblouku a mezipřímé L_i :

- doporučená limitní hodnota: 20 m

prEN 13803-1:2006 – Běžná kolej

Poloměr zaoblení lomu nivelety R_v :

- vertikální oblouky kratší než 20 m nemusí být zaobleny
- zaoblen musí být lom nivelety při rozdílu sklonů:
 - více než 2 ‰ při rychlosti do 230 km/h včetně
 - více než 1 ‰ při rychlosti nad 230 km/h

$$R_v = q_R \cdot V^2$$

- koeficient q_R :
 - doporučená limitní hodnota: $0,35 \text{ m}\cdot\text{h}^2/\text{km}^2$
 - minimální limitní hodnota: $0,13 \text{ m}\cdot\text{h}^2/\text{km}^2$
- poloměr R_v musí být nejméně 2 000 m

Vyhláška UIC 703

Parametry		osobní + nákladní										pouze osobní	
VRT		I			II			III				IV	
	[km/h]	80 - 120			120 - 200			≤ 250				250 - 300	
	žel. správa							FS		DB		SNCF	
		Dop.	Max.	Výjm.	Dop.	Max.	Výjm.	Dop.	Max.	Dop.	Max.	Dop.	Max.
<i>kolej bez speciálních nároků (širá trať bez spojek)</i>													
I	[mm]	80	100	130	100	120	150	121	-	40	60	50	100
a _q	[m/s ²]	0,53	0,67	0,86	0,67	0,80	1,00	0,81	-	0,27	0,40	0,33	0,67
<i>hlavní kolej v obloukových výhybkách a křiženiích</i>													
I	[mm]	60	80	120	60	80	100	-	-	-	-	50	100
a _q	[m/s ²]	0,40	0,53	0,80	0,40	0,53	0,67	-	-	-	-	0,33	0,67
<i>bez omezení</i>													
E	[mm]	50	70	90	70	90	110	100	-	50	70	-	110
<i>kolej bez speciálních nároků (širá trať bez spojek)</i>													
p	[mm]	150	160	-	120	150	160	125	-	65	85	180	-

a_q – nevyrovnané příčné zrychlení

Vyhláška UIC 703

Parametry		osobní + nákladní										pouze osobní	
VRT		I			II			III				IV	
	[km/h]	80 - 120			120 - 200			≤ 250				250 - 300	
	žel. správa							FS		DB		SNCF	
		Dop.	Max.	Výjm.	Dop.	Max.	Výjm.	Dop.	Max.	Dop.	Max.	Dop.	Max.
<i>přechodnice s konstantní změnou křivosti</i>													
dl/dt	[mm/s]	25	70	90	25	70	-	36	-	13	-	30	75
da _q /dt	[m/s ³]	0,17	0,47	0,60	0,17	0,47	-	0,24	-	0,08	-	0,20	0,50
<i>přechodnice s proměnnou změnou křivosti</i>													
dl/dt	[mm/s]	50	90	-	50	90	-	-	-	-	-	-	-
da _q /dt	[m/s ³]	0,33	0,60	-	0,33	0,60	-	-	-	-	-	-	-
<i>lineární vzestupnice</i>													
dp/dt	[mm/s]	28	46	55	28	35	50	38	-	20	-	50	60
<i>nelineární vzestupnice</i>													
dp/dt	[mm/s]	56	70	-	56	70	-	-	-	-	-	-	-
<i>bez omezení</i>													
a _v	[m/s ²]	0,20	0,30	0,40	0,20	0,30	-	0,16	0,24	0,20	-	0,45	0,60

a_v – svislé zrychlení při zaoblení lomu nivelety

Přehled parametrů VRT podle UIC

Základní parametry (1):

PARAMETER	COUNTRY (km/h)											STI (Draft)
	France		Germany			Italy		Spain		Belgium		
	300	350	300 (1)	300 (2)	350 (3)	300	350 (3)	300	350	300	350	
Type of traffic	PASSENGER	PASSENGER	PASSENGER /FREIGHT	PASSENGER	PASSENGER	PASSENGER /FREIGHT	PASSENGER /FREIGHT	PASSENGER	PASSENGER	PASSENGER	PASSENGER	
Maximum axle load for the maximum line speed, high speed trainsets (t)	17	17	17	17	≤ 16	17	17	17	18	17	17	
Maximum axle load for locomotives (t)	None	None	20	None	None	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	None	
Maximum axle load for freight wagons (7) (t)	None	None	22.5	None	None	22.5	22.5	None	None	22.5	None	
Maximum design speed of the lines (km/h)	300	350	300 (tunnels 330)	300 (tunnels 330)	350	250 - 300	350	270	350	320	> 300	
Maximum operating speed of the lines (km/h)	300	320	300	300	330	300	350	270 (300)	> 300	300	None	
Minimum radius of curvature for the maximum speed (m)	4 000	6 250 exc. (5 556)	4 000	3 350 (4)	5 120	5 450	7 000	4 000	6 500	4 800	Defined by I	
Maximum cant of the rack (mm)	180	180	160	170	170	105	130	150	150	150	200	
Maximum gradient (mm/m)	35	35	20	40	40	12 (6)	12 (6)	12.5	25	15 - 21 (6)	35 (for lengths < 6 km)	

Přehled parametrů VRT podle UIC

Základní parametry (2):

PARAMETER	COUNTRY (km/h)											STI (Draft)
	France		Germany			Italy		Spain		Belgium		
	300	350	300 (1)	300 (2)	350 (3)	300	350 (3)	300	350	300	350	
Law of variation of the cant of the track (mm/s)	50	50 (5)	34.7	34.7	34.7	27	37	32	30	30	37	-
Minimum vertical radius (m)	16 000	21 000	14 000 12 000	14 000 12 000	20 000	25 000	25 000	24 000 (17 000)	25 000	+ 20 000 - 17 000	(Comfort) not specified)	
Cant deficiency at the design speed (mm)	85	65 (85)	105	130 ballasted track 150 non ballasted track	112	90	75	100	65	100	80 (8)	
Length of the transition curves which correspond to the minimum radius (m)	300	350	384	408	476	330	330	360	460	420	(Comfort)	
NOTES:												
(1) Nuremberg - Ingolstadt												
(2) Cologne - Frankfurt												
(3) Hypothesis												
(4) This could be reduced down to 3 250 m with cant of 180 mm and cant deficiency of 150 mm												

Přehled parametrů VRT podle UIC

Základní parametry (3):

PARAMETER	COUNTRY (km/h)										STI (Draft)
	France		Germany (1)			Italy		Spain		Belgium	
	300	350	300 V + F	300 Pass.	350 Hypoth.	300	350 Hypoth.	300	350	320	
Minimum distance between track centre lines (m)	4.2	4.5	4.5	4.5	4.7	5	5	4.3	4.7	4.5	4.5
Width of subgrade (m)	13.9	14.2	12.1	12.1	13.3	13.6	13.6 (3)	13.3	14	13.9	-
Section of tunnels for double track, vehicles sealed or not (m ²)	70	100	92 (2)	92 (2)	103 (2)	82	100	75	100	150 (4)	-

(1) For unballasted track. With ballasted track, $d = 0$ mm and with $d = 160$ mm, width increased by 40 cm due to inclination of the ballast to the outside

(2) Sealed vehicles (except for freight)

(3) To be confirmed by means of tests with a model to check that the STI is met

(4) Short covered section

Přehled parametrů VRT podle UIC

Příklad změny parametrů VRT podle rychlosti:

PARAMETER (from data given by SNCF)	SPEED (km/h)		
	270	300	350
Minimum radius of curvature (m) :			
- Recommended	3 846	4 545	7 143
- Normal	3 226	4 000	6 250
- Exceptional	3 125	4 000	5 556
Maximum cant (mm) :			
- Normal	180	180	180
- Exceptional	180	180	180
Cant deficiency (mm) :			
- Normal	100	85	65
- Exceptional	130	100	85
Excess of cant in normal conditions experienced by freight trains (mm) :			
- Normal	100	100	-
- Exceptional	110	110	-

Porovnání přechodnic a vzestupnic

1. **kubická parabola** užívaná u ČD: $y = \gamma \frac{x^3}{6 \cdot r \cdot l}$

2. **klotoida** užívaná zejména v silničním stavitelství a u městských drah: $A^2 = l_o \cdot r$

3. **podle Blossé** normovaná pro použití na železnici i v ČR:

$$y = \frac{x^4}{4 \cdot l^2 \cdot r} - \frac{x^5}{10 \cdot l^3 \cdot r}$$

4. **podle Kleina**, kterou užívají některé zahraniční žel. správy:

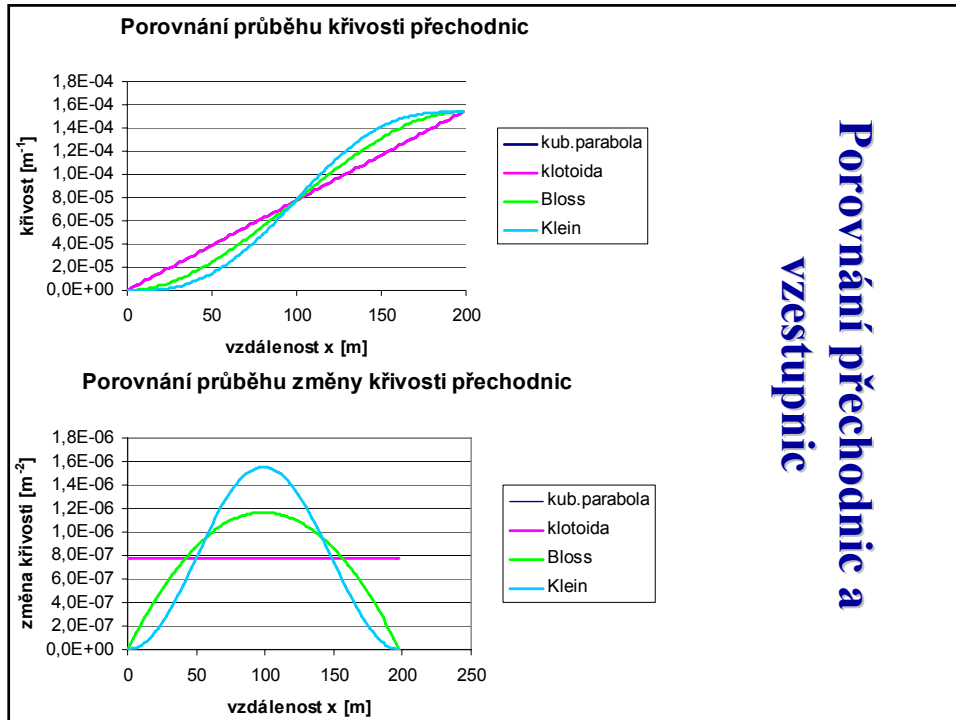
$$y = \frac{x^3}{6 \cdot r \cdot l} - \frac{l}{4\pi^2 \cdot r} \left(x - \frac{l}{2\pi} \cdot \sin \frac{2\pi \cdot x}{l} \right)$$

5. **cosinusoida:**

$$y = \frac{1}{2 \cdot r} \left[\frac{x^2}{2} + \frac{l^2}{\pi^2} \left(\cos \frac{\pi \cdot x}{l} - 1 \right) \right]$$

Porovnání přechodnic a vzestupnic

druh přechodnice	výhody	nevýhody
kubická parabola	- zavedená v ČR přímo na železnici - jednoduchý předpis, snadná údržba - opravný součinitel	- odvozena z rovnice pro poloměr křivosti - konstantní změna křivosti
klotoida	- není odvozena z rovnice pro poloměr křivosti - jednoduchý předpis, snadná údržba - normově upravena v ČR	- konstantní změna křivosti
podle Blossé	- normově upravena v ČR - pozvolný nárůst/pokles křivosti	- odvozena z rovnice pro poloměr křivosti a nemá opravný součinitel
podle Kleina	- nejpozvolnější nárůst/pokles křivosti	- odvozena z rovnice pro poloměr křivosti a nemá opravný součinitel - není v ČR nijak zavedena - komplikovaný předpis



Porovnání přechodnic a vzestupnic

	Cubic parabola	Bloss	Cos	Schramm	Klein (Sin)
Horizontální křivost K Nekompenzované boční zrychlení v rovine kotaje	 $K_x = \frac{1}{R}; a_q = \frac{v^2 \cdot g \cdot D}{R \cdot 1500}$	 $K_x = \frac{1}{R}; a_q = \frac{v^2 \cdot g \cdot D}{R \cdot 1500}$	 $K_x = \frac{1}{R}; a_q = \frac{v^2 \cdot g \cdot D}{R \cdot 1500}$	 $K_x = \frac{1}{R}; a_q = \frac{v^2 \cdot g \cdot D}{R \cdot 1500}$	 $K_x = \frac{1}{R}; a_q = \frac{v^2 \cdot g \cdot D}{R \cdot 1500}$
Prevýšení Maximální součinitel sklonu vzestupnice jako funkce délky	 $1:n = \frac{D}{L}$	 $1:n = \frac{1,5 \cdot D}{L}$	 $1:n = \frac{\pi \cdot D}{L}$	 $1:n = \frac{2 \cdot D}{L}$	 $1:n = \frac{2 \cdot D}{L}$
Kolísání nevyrovnaného příčného zrychlení (horizontálních rázov) Měra změny převýšení jako funkce času	 $\frac{da}{dt} = \frac{a_q \cdot v}{L}; \frac{dD}{dt} = \frac{D \cdot v}{L}$	 $\frac{da}{dt} = \frac{1,5 \cdot a_q \cdot v}{L}; \frac{dD}{dt} = \frac{1,5 \cdot D \cdot v}{L}$	 $\frac{da}{dt} = \frac{x \cdot a_q \cdot v}{L}; \frac{dD}{dt} = \frac{x \cdot D \cdot v}{L}$	 $\frac{da}{dt} = \frac{2 \cdot a_q \cdot v}{L}; \frac{dD}{dt} = \frac{2 \cdot D \cdot v}{L}$	 $\frac{da}{dt} = \frac{2 \cdot a_q \cdot v}{L}; \frac{dD}{dt} = \frac{2 \cdot D \cdot v}{L}$
Měra změny horizontálních rázov, vertikální zrychlení	 $\frac{d^2 a}{dt^2} = a_q \cdot \frac{v^2}{L^2}; a_v = \frac{v^4}{L^2}$	 $\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{6 \cdot a_q \cdot v^2}{L^2}; a_v = \frac{6 \cdot D \cdot v^2}{L^2}$	 $\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{x^2 \cdot a_q \cdot v^2}{2L^2}; a_v = \frac{x^2 \cdot D \cdot v^2}{2L^2}$	 $\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{4 \cdot a_q \cdot v^2}{L^2}; a_v = \frac{4 \cdot D \cdot v^2}{L^2}$	 $\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{2 \cdot a_q \cdot v^2}{L^2}; a_v = \frac{2 \cdot D \cdot v^2}{L^2}$
Vertikální rázy	 $\frac{da_v}{dt} = \frac{4 \cdot x^2 \cdot D \cdot v^2}{L^2}$				
Odsazení kružnicového oblúka f_s (m)	$f_s = \frac{L^2}{24 \cdot R}$	$f_s = \frac{L^2}{40 \cdot R}$	$f_s = \frac{L^2}{42,23 \cdot R}$	$f_s = \frac{L^2}{48 \cdot R}$	$f_s = \frac{L^2}{61,2 \cdot R}$
Ekvivalentní délka přechodnice ($f_s = f_{eq}$)	L_{dot}	$L_{Bloss} = 1,29 \cdot L_{dot}$	$L_{Cos} = 1,326 \cdot L_{dot}$	$L_{Schramm} = 1,414 \cdot L_{dot}$	$L_{Klein} = 1,597 \cdot L_{dot}$
Poměrné hodnoty horizontálního rázu ($f_s = f_{sz}$)	1,0	1,16	1,185	1,414	1,252
Měra změny vertikálního zrychlení ($f_s = f_{sz}$)	1,0	0,37	0,29	0,21	0,25