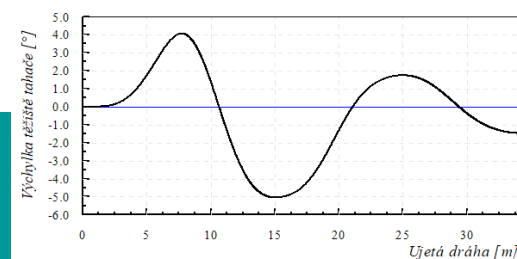
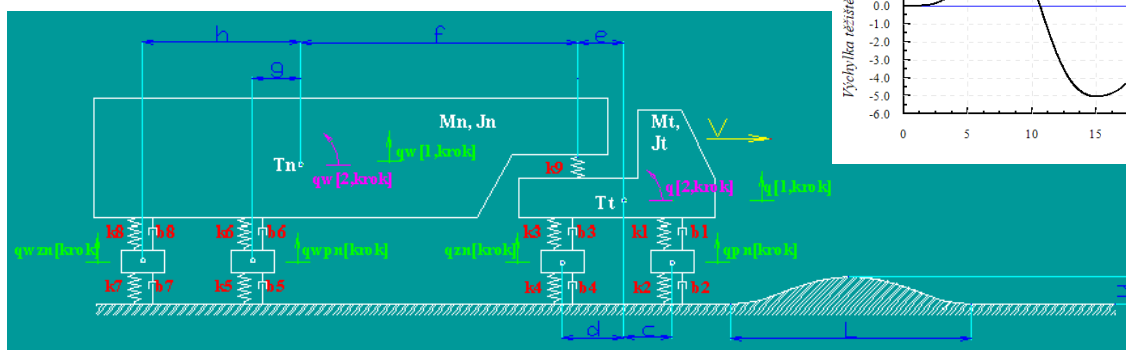
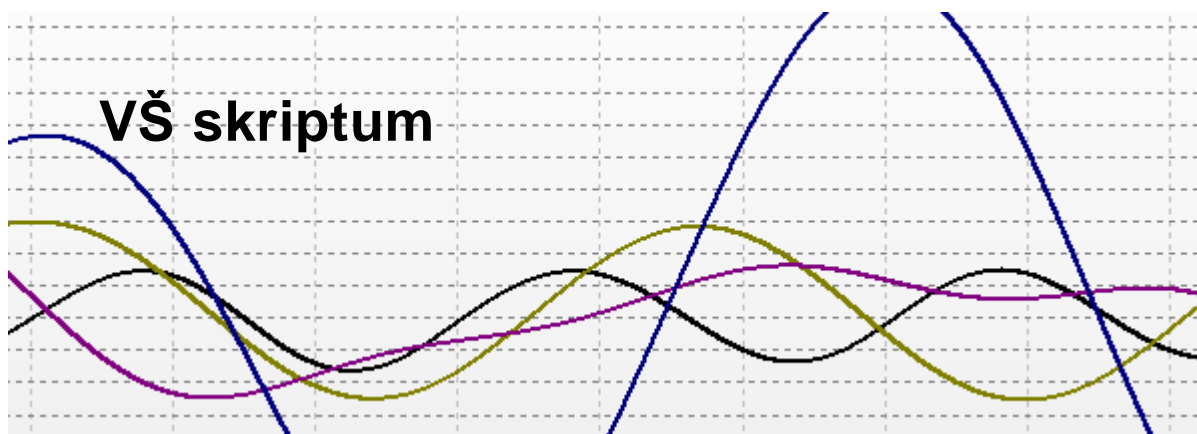


Jan Krmela

# Dynamika – výpočet přejezdu tahače přes nerovnost



2021

Jan Krmela

# **Dynamika – výpočet přejezdu tahače přes nerovnost**

VŠ skriptum

2021

**Autor: doc. Ing. Jan KRMELA, Ph.D.**

Pracoviště autora:

**Fakulta strojního inženýrství, Univerzita J. E. Purkyně**, Pasteurova 1, 400 96 Ústí nad Labem, Česká republika,

**Fakulta priemyselných technológií v Púchove, Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne**, I. Krasku 491/30, 020 01 Púchov, Slovenská republika.

E-mail: jan2.krmela@post.cz

Název: Dynamika – výpočet přejezdu tahače přes nerovnost

Druh díla: vysokoškolské skriptum

Jazyk publikace: český

Vydání: první, květen 2021

Návrh obálky: Jan Krmela

Formát: A4, počet stran: 31 plus přílohy (programy s kódy a schémata), elektronická verze (pdf formát skripta s přílohami v souboru zip)

Vydavatel: Univerzita J. E. Purkyně, Ústí nad Labem

Země vydavatele: Česká republika

Počet autorských archů (autorských hárkov): 4,25 AA (AH), počet normostran: 85,0 (započítány hlavní programové kódy)

Recenzent: Ing. Petr JILEK, Ph.D. (Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice)

Skriptum je volně dostupné ke stažení také na: <http://krmela.wz.cz/contact.html>

Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.

© Jan Krmela, 2021

Lze volně šířit, jakkoliv elektronicky.

ISBN 978-80-7561-297-7



## Předslov

Autor, doc. Ing. Jan Krmela, Ph.D., se dlouhodobě zabývá se problematikou výpočtového modelování pláště pneumatik doplněnou experimenty pneumatik na statickém a dynamickém zkušebním zařízení, mikroskopickým pozorováním vazeb kov-elastomer, studiem degradačních procesů pláště pneumatik a dlouho vláknových kompozitů s polymerní matricí, dále experimenty vybraných částí pláště na zkušebním zařízení pro zkoušky v tahu, ergonomickými problémy, bezpečností práce při experimentech, specifickými experimenty, výpočtovým modelováním konstrukčních částí automobilů a 3D tiskem. Je autorem přes 280 uveřejněných prací včetně vydání knižních publikací se zaměřením na výpočtové modelování a experimenty pneumatik pro automobily a materiálové parametry pláště pneumatik.

Odkazy na LinkedIn a Research Gate jsou dostupné na <http://krmela.wz.cz/contact.html>, kde je ke stažení toto skriptum a další vysokoškolské učebnice.

Předkládané skriptum bylo prioritně vytvořeno pro studenty Fakulty strojního inženýrství, kteří v rámci studia absolvují předměty zaměřené na dynamiku různých konstrukcí. Právě dynamika je důležitá pro pochopení interakce mezi jednotlivými vazbami těles nebo konstrukčních mechanismů vykonávající dynamický pohyb. Příkladem takové interakce může být přejezd nákladního automobilu jako dynamický prvek přes překážku (definovanou nerovnost).

V soustavě znázorňující tahač s návěsem se objevují pružící a tlumící prvky, jelikož pozornost je věnována vypružení sedačky řidiče, a proto přístup k výpočtům a stanovení dynamických ukazatelů je možné aplikovat na podobné dynamické systémy.

Výkladová forma s přiloženým programem (dvěma verzemi programu) a odpovídajícími kódy je vhodná právě pro začínající i pokročilé vysokoškolské studenty v technických oborech na jiných českých a slovenských vysokých školách s technickými zaměřenými na automobily, konstrukce strojů, strojírenství apod. Navíc, zdatní uživatelé v programování mohou kódy v programovacím jazyku Borland Delphi modifikovat, doplňovat a případně je použít pro vytvoření vlastní programové aplikace.

Skriptum může využito studenty všech stupňů studia včetně doktorandů. Studenti si v programu mohou změnit vstupní údaje a obratem sledovat vliv jednotlivých změn na počítané parametry v grafickém vyobrazení závislosti rychlostí a zrychlení.

Věřím, že si skriptum mezi studenty najde místo na jeho prostudování jako doplňkový studijní materiál a pomůže ve studiu pochopit zákonitosti dynamiky a přístupu k výpočtům přejezdu tahače nebo jakéhokoliv automobilu přes definovanou překážku.

Autor

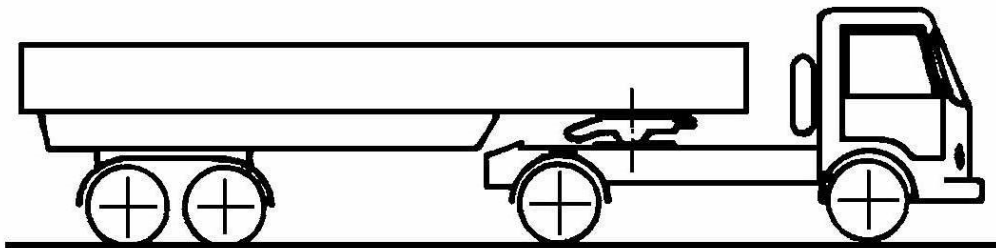
## Poděkování

Vydání tohoto skriptu bylo podpořeno

Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou MŠVVaŠ Slovenské republiky (KEGA),  
grantem **KEGA 002TnUAD-4/2019**.

## OBSAH

Výpočet přejezdu tahače přes nerovnost .....	7
Ovládání a popis programu – MANUÁL .....	13
Názorný příklad výpočtu s grafy .....	16
Dodatek .....	29
Použitá literatura .....	30



**Program tahač s kódy je dostupný v souboru [program.zip](#).**  
Zahrnutý dva programy – tahac-1 a tahac-2, který je kompletní s možností výběru ve vykreslování průběhů. Jsou doplněna schémata ACAD a ručně tvořenými.

**Pozn. v tahac-2 – adresář unit7 = [unit7\\_.rtf](#) = kód pro výpočet s otevřením v MS Office.**

---

## Výpočet přejezdu tahače přes nerovnost

Navrhněte program pro výpočet zrychlení, rychlostí a výchylek tahače vzniklých vlivem přejezdu tahače přes nerovnost za pomoci metody strukturních prvků.

Požadované parametry:

- program sestavený za pomoci Borland DELPHI,
- uložení vypočítaných hodnot do souboru pro možné další použití,
- grafické znázornění vypočítaných hodnot.

**Metoda strukturních prvků** se používá pro řešení přechodových jevů a dynamických systémů s prvky nelineárních charakteristik.

Metoda spočívá v tom, že si zaneseme obecné přenosové konstrukční bloky tzv. strukturní prvky, které uskutečňují silové vazby mezi obecnými hmotami soustavy. Strukturní prvky v sobě **zahrnují tuhostní a tlumící vlastnosti** systému. Takto vznikne **model dynamické soustavy** jako řetězec hmot vzájemně spojených strukturními prvky.

Výsledná obecná síla na  $n$ -tý stupeň volnosti tělesa se určí z následujícího vztahu:

$$f_n = \sum_{j=1}^S F_j l_{n,j} \quad (1)$$

kde:  $F_j$  [N] síla v  $j$ -tém strukturním prvku,

$S$  [1] počet strukturních prvků (dále značeno  $S=k$ ),

$N$  [1] počet stupňů volnosti

$l_{n,j}$  [1] koeficienty vazebních poměrů jednotlivých strukturních prvků  $j$  na  $n$ -tou obecnou sílu  $f_n$ .

Pravidlo pro určování znaménka vazebního poměru: síly  $F_j$  jsou kladné, pokud síly ve strukturních prvcích jsou tahové; záporné, pokud je strukturní prvek stlačován.

Pro celou soustavu platí vztah v maticovém tvaru:

$$f = L \cdot F \quad (2)$$

kde:  $f$  vektor obecných sil –  $f_1, f_2, f_3$  až  $f_n$ ,

$L$  obdélníková matice vazebních poměrů typu ( $m \times k$ ),

$F$  vektor sil všech strukturních prvků soustavy  $F \dots F_1, F_2, F_3$  až  $F_n$ .

Pohybové rovnice jsou ve tvaru:

$$m_i \cdot \ddot{q}_i = f_i$$

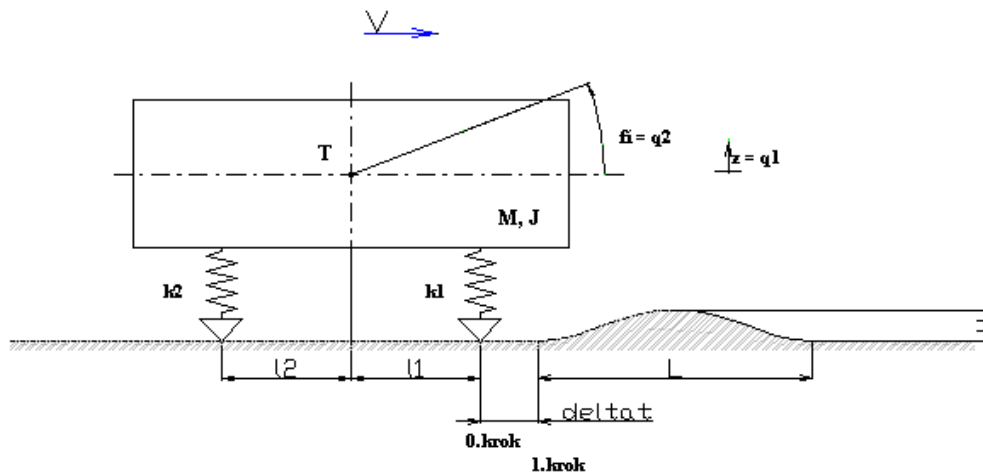
$$\text{maticově } M \cdot \ddot{q} = f \quad (3).$$

### Řešení příkladu se dvěma stupni volnosti

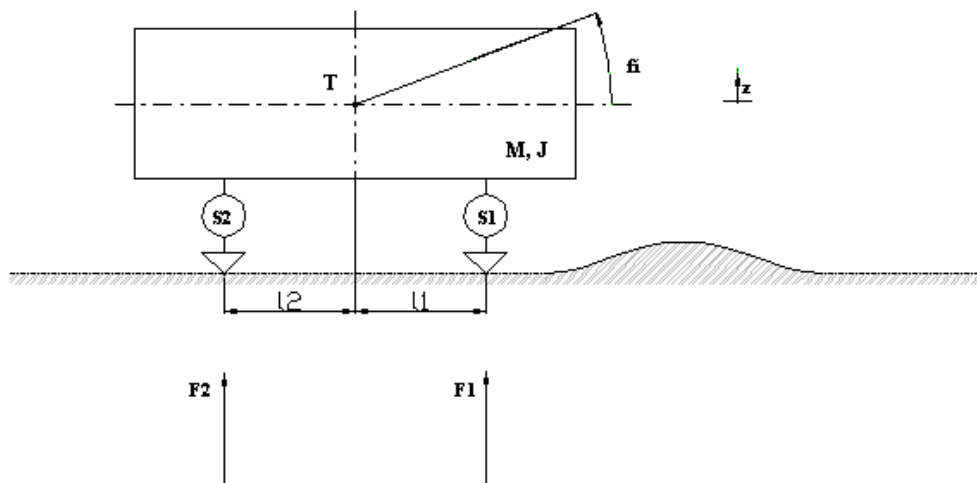
Tento model má dva stupně volnosti.

Dynamická soustava se dvěma stupni volnosti – obr. 1.

Model se strukturními prvky (model s kladnými silami ve strukturních prvcích) – obr. 2.



Obr. 1 – Dynamická soustava se dvěma stupni volnosti



Obr. 2 – Model se strukturními prvky

Obecné síly:

souřadnice  $z$ :  $f_1$

souřadnice  $\varphi$ :  $f_2$ .



Vzorce pro výpočet obecných sil:

$$\begin{aligned} f_1 &= +F_1 + F_2 \\ f_2 &= +F_1 \cdot l_1 - F_2 \cdot l_2 \end{aligned} \quad (4).$$

Maticově:

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & +1 \\ +l_1 & -l_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{F} \quad (5).$$

Zrychlení – v maticovém tvaru:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{M}^{-1} \quad (6)$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (7).$$

### ***Pokračování řešení příkladu pomocí metody konečných diferencí***

Podstata řešení je v tom, že časový průběh pohybu rozdělíme na časové úseky  $\Delta t$ . Pro jednotlivé časové okamžiky se vypočtou deformace a síly ve vypružení, z nich opět velikost jednotlivých souřadnic.

Při prvním kroku v čase se  $\Delta t$  mění síla v tom strukturním prvku, který se dotkne nerovnosti, poloha systému se zatím nezměnila, ale působí již síla vyvolávající zrychlení.

Řešení velikostí jednotlivých souřadnic předpokládáme vždy mezi dvěma časovými úseky ve tvaru polynomu druhého stupně.

Odvození zde nebudu provádět, uvedu pouze výsledný tvar pro  $n$ -tou hmotu:

$$q_{n,i+1} = 2 \cdot q_{n,i} - q_{n,i-1} + \ddot{q}_{n,i} \cdot (\Delta t)^2 \quad (8).$$

Metodu je nutné „nastartovat“ tzn. jedu po rovině a teprve pak najedu na nerovnost (na hmoty začíná působit síla).

$$q_{n,i} = 2 \cdot q_{n,0} + \ddot{q}_{n,0} \cdot (\Delta t)^2 \quad (9).$$

Z této nové polohy určíme nové deformace a cyklus výpočtu se opakuje.

Pokud se v systému vyskytuje tlumení, je potřebné taktéž znát vztah pro výpočet rychlosti (opět uvedu pouze výsledný tvar):

$$\dot{q}_{n,i+1} = (3 \cdot q_{n,i+1} - 4 \cdot q_{n,i} + q_{n,i-1}) / (2 \cdot \Delta t) \quad (10).$$

Popis nerovnosti:

$$u = \frac{u_0}{2} \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{L} \cdot t\right) \right] \quad \text{nebo} \quad u = \frac{u_0}{2} \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot x\right) \right] \quad (11)$$

kde:  $u$  [m] výška nerovnosti v daném časovém kroku,

$u_0$  [m] maximální výška nerovnosti,

$L$  [m] délka nerovnosti,

$v$  [m/s] rychlost jízdy vozidla.

Pozn.: argument cosinu je v radiánech.

*Vektor deformací:*

Pro tento příklad:

$$\mathbf{A}_{j,i} = \begin{bmatrix} q_{1,i} - u_{1,i} + q_{2,i} \cdot l_1 \\ q_{1,i} - u_{2,i} - q_{2,i} \cdot l_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & +l_1 \\ l_2 & -l_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{1,i} \\ q_{2,i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{1,i} \\ u_{2,i} \end{bmatrix} \quad (12).$$

*Matice tuhosti:*

$$|\mathbf{k}_j| = \begin{vmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{vmatrix} \quad (13).$$

*Obecné síly po dosažení a rozepsání čini:*

$$\begin{aligned} -f_1 &= q_{1,i} \cdot k_1 + q_{2,i} \cdot k_1 \cdot l_1 - k_1 \cdot u_{1,i} + q_{1,i} \cdot k_2 - q_{2,i} \cdot k_2 \cdot l_2 - k_2 \cdot u_{2,i} \\ -f_2 &= q_{1,i} \cdot k_1 \cdot l_1 + q_{2,i} \cdot k_1 \cdot l_1^2 - k_1 \cdot u_{1,i} \cdot l_1 - q_{1,i} \cdot k_2 \cdot l_2 + q_{2,i} \cdot k_2 \cdot l_2^2 + k_2 \cdot u_{2,i} \cdot l_2 \end{aligned} \quad (14).$$

Po rozepsání:

$$\begin{aligned} -f_1 &= q_{1,i} \cdot (k_1 + k_2) + q_{2,i} \cdot (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) - k_1 \cdot u_{1,i} - k_2 \cdot u_{2,i} \\ -f_2 &= q_{1,i} \cdot (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) + q_{2,i} \cdot (k_1 \cdot l_1^2 + k_2 \cdot l_2^2) - k_1 \cdot u_{1,i} \cdot l_1 + k_2 \cdot u_{2,i} \cdot l_2 \end{aligned} \quad (15).$$

*Výpočet zrychlení:*

Provedeme dle vzorce (7).

### **Výpočet prvních tří kroků výše uvedeného příkladu**

Zadané parametry:  $m$  [kg],  $J$  [m.s<sup>2</sup>],  $l_1$  [m],  $l_2$  [m],  $k_1$  [N/m],  $k_2$  [N/m],  $L$  [m],  $u_0$  [m],  $v$  [m/s]

Volené parametry:  $\Delta t$  (např.  $\Delta t = 0,001$  s)

Ve styku s nerovností je pouze první prvek (na modelu se strukturními prvky – levý prvek).

0. krok:

soustava je v klidu:

$$t = 0; i = 0; q_{1,0} = 0; q_{2,0} = 0;$$

$$\ddot{q}_{1,0} = 0; \ddot{q}_{2,0} = 0.$$

1. krok:

$$t = \Delta t = 0,001 \text{ s}$$

$$i = 1$$

$$q_{1,1} = 0; q_{2,1} = 0;$$

$$\begin{aligned}\ddot{q}_{1,1} &= -\frac{1}{m} \cdot (-u_{1,1} \cdot k_1 - u_{2,1} \cdot k_2) \left[ m/s^2 \right] & u_{1,1} &= \frac{u_0}{2} \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi \cdot v}{L} \cdot t\right) \right]; \\ \ddot{q}_{2,1} &= -\frac{1}{J} \cdot (-u_{1,1} \cdot k_1 \cdot l_1 - u_{2,1} \cdot k_2 \cdot l_2) \left[ rad/s^2 \right] & u_{2,1} &= 0\end{aligned}\tag{16}.$$

2. krok:

$$t = 2 \cdot \Delta t = 0,002 \text{ s}$$

$$i = 2$$

$$\begin{aligned}q_{1,2} &= \ddot{q}_{1,1} \cdot (\Delta t)^2 \left[ m \right]; & q_{2,2} &= \ddot{q}_{2,1} \cdot (\Delta t)^2 \left[ rad \right] \\ \ddot{q}_{1,2} &= -\frac{1}{m} \cdot (q_{1,2} \cdot (k_1 + k_2) + q_{2,2} \cdot (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) - u_{1,2} \cdot k_1 - u_{2,2} \cdot k_2) \left[ m/s^2 \right] \\ \ddot{q}_{2,2} &= -\frac{1}{J} \cdot (q_{1,2} \cdot (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) + q_{2,2} \cdot (k_1 \cdot l_1^2 + k_2 \cdot l_2^2) - u_{1,2} \cdot k_1 \cdot l_1 - u_{2,2} \cdot k_2 \cdot l_2) \left[ rad/s^2 \right] \\ u_{1,2} &= \frac{u_0}{2} \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi \cdot v}{L} \cdot t\right) \right]; & u_{2,2} &= 0\end{aligned}\tag{17}.$$

Tento příklad byl uvažován bez tlumení.

Pokud bychom uvažovali i tlumení, první tři kroky by byly následující:

0. krok:

soustava je v klidu:

$$t = 0; i = 0; q_{1,0} = 0; q_{2,0} = 0;$$

$$\dot{q}_{1,0} = 0; \dot{q}_{2,0} = 0$$

$$\ddot{q}_{1,0} = 0; \ddot{q}_{2,0} = 0.$$

1. krok:

$$t = \Delta t = 0,001 \text{ s}$$

$$i = 1$$

$$q_{1,1} = 0; q_{2,1} = 0;$$

$$\dot{q}_{1,1} = 0; \dot{q}_{2,1} = 0$$

$$\begin{aligned}u_{1,1} &= \frac{u_0}{2} \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi \cdot v}{L} \cdot t\right) \right]; & \dot{u}_{1,1} &= \frac{u_0}{2} \cdot \left[ \frac{2\pi \cdot v}{L} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot v}{L} \cdot t\right) \right]; & u_{2,1} &= 0; & \dot{u}_{2,1} &= 0 \\ \ddot{q}_{1,1} &= -\frac{1}{m} \cdot (-u_{1,1} \cdot k_1 - u_{2,1} \cdot k_2 - \dot{u}_{1,1} \cdot b_1 - \dot{u}_{2,1} \cdot b_2) \left[ m/s^2 \right] \\ \ddot{q}_{2,1} &= -\frac{1}{J} \cdot (-u_{1,1} \cdot k_1 \cdot l_1 - u_{2,1} \cdot k_2 \cdot l_2 - \dot{u}_{1,1} \cdot b_1 \cdot l_1 + \dot{u}_{2,1} \cdot b_2 \cdot l_2) \left[ rad/s^2 \right]\end{aligned}\tag{18}.$$

2. krok:

$$t = 2 \cdot \Delta t = 0,002 \text{ s}$$

$$i = 2$$

$$\begin{aligned} q_{1,2} &= \ddot{q}_{1,1} \cdot (\Delta t)^2 \text{ [m]}; \quad q_{2,2} = \ddot{q}_{2,1} \cdot (\Delta t)^2 \text{ [rad]} \\ \dot{q}_{1,2} &= 3 \cdot q_{1,2} / (2 \cdot \Delta t); \quad \dot{q}_{2,2} = 3 \cdot q_{2,2} / (2 \cdot \Delta t) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{1,2} &= -\frac{1}{m} \cdot \left( q_{1,2} \cdot (k_1 + k_2) + q_{2,2} \cdot (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) + \dot{q}_{1,2} \cdot (b_1 + b_2) + \right. \\ &\quad \left. + \dot{q}_{2,2} \cdot (b_1 \cdot l_1 - b_2 \cdot l_2) - u_{1,2} \cdot k_1 - u_{2,2} \cdot k_2 - \dot{u}_{1,2} \cdot b_1 - \dot{u}_{2,2} \cdot b_2 \right) \text{ [m/s}^2\text{]} \\ \ddot{q}_{2,2} &= -\frac{1}{J} \cdot \left( q_{1,2} \cdot (k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2) + q_{2,2} \cdot (k_1 \cdot l_1^2 + k_2 \cdot l_2^2) + \dot{q}_{1,2} \cdot (b_1 \cdot l_1 - b_2 \cdot l_2) + \right. \\ &\quad \left. + \dot{q}_{2,2} \cdot (b_1 \cdot l_1^2 + b_2 \cdot l_2^2) - u_{1,2} \cdot k_1 \cdot l_1 - u_{2,2} \cdot k_2 \cdot l_2 - \dot{u}_{1,2} \cdot b_1 \cdot l_1 + \dot{u}_{2,2} \cdot b_2 \cdot l_2 \right) \text{ [rad/s}^2\text{]} \end{aligned} \quad (20).$$

Pro výpočet dalších časových kroků budu postupovat analogickým způsobem. Pro výpočet výchylky použiji vzorec (8) a pro výpočet rychlosti vzorce (10).

Pro výpočet je nutno zadat podmínky, kdy je ve styku s nerovností první a kdy druhý strukturní prvek (tj. kdy je nutno počítat nerovnost  $u_{1,krok}$ ;  $u_{2,krok}$  a kdy je hodnota nerovnosti rovna nule).

## Souhrn

Postup:

- sestavíme:
  - matici vazebních poměrů  $L$ ,
  - vektor deformací,
  - matici tuhostí,
  - matici hmotností,
- výpočet obecných sil,
- výpočet výchylky, rychlosti a zrychlení u prvních třech kroků,
- s použitím výsledků těchto třech kroků lze počítat následující kroky,
- je nutno zadat podmínky, po kdy je daný strukturní prvek ve styku s nerovností.

**Program tahač s kódy je dostupný v souboru [program.zip](#).**

**Zahrnutý dva programy – tahac-1 a tahac-2, který je kompletní s možností výběru ve vykreslování průběhů. Jsou doplněna schémata ACAD a ručně tvořenými.**

## Ovládání a popis programu – MANUÁL

Ovládání programu je vysvětleno v následujících bodech.

### Nastavení vstupů pro výpočet

Po spuštění programu lze nastavit vstupní hodnoty a pak je lze uložit pro další použití. K otevření vstupních dat složí menu **Soubor/Otevři (vstupní údaje)**. Pro uložení vstupních dat – menu **Soubor/Uložit jako ... (vstupní údaje)**.

**Rozměrové parametry [mm]**

3600	PN tahač od T_tahač	750	Točnice od T_návěs
4400	ZN tahač od T_tahač	2000	PN návěs od T_návěs
1000	Točnice od T_tahač	3000	ZN návěs od PN návěs

**Hmotnostní parametry [kg]**

400	PN tahač	400	PN návěs
600	ZN tahač	600	ZN návěs
12000	Tahač	6000	Návěs

**Tuhosti a tlumení b [N\*s/m]; k [N/m]**

PN tahač	40000	b1	ZN tahač	40000	b3
	3000000	k1		3000000	k3
	1000	b2		1000	b4
	1000	k2		1000	k4
PN návěs	1000	b5	ZN návěs	1000	b7
	1000	k5		1000	k7
	1000	b6		1000	b8
	1000	k6		1000	k8
Točnice	1000	k9			

**Moment setrvačnosti [kg\*m<sup>2</sup>]**

200000	J tahač	100000	J návěs
--------	---------	--------	---------

**Nerovnost (terénní vlna) L [mm]; u [mm]**

2000	Délka L	10	Výška u
------	---------	----	---------

**Čas, krok výpočtu, délka ujeté dráhy a rychlost soupravy i [s]; Lcmax [m]**

20000	Délka Lcmax	Pozn.: Lcmax >= (L+c+d)
36	Rychlost v [km/h]	
1	= i*0,001 (i=čas. krok) [s]	

Grafy vykreslí s tlumením a bez  
 zrychlení  
 rychlost  
 výchylka

**Počítej**

**Výkresli graf**

**Výkresli graf**

**Vstupní údaje (viz. vše co zadávám)**

**Výstupní údaje (výsledky a hodnoty pro Grapher)**

Otevřít vstup    Uložit vstup jako...    Uložit výstup jako...

Vstup: C:\tahac\new\vykouska\vstupni\_data\_a.txt    Výstupní data pro grapher:

Obr. 3 – Po spuštění programu

### Výpočet výchylek, rychlostí a zrychlení

Výpočet se provádí tlačítkem **Výpočet** nebo menu **Run/Počítej (F5)**. Po provedení výpočtu (upozornovací dialog) lze uložit vypočítané hodnoty do souboru. Název uloženého výstupního souboru bude zobrazen v dolní části formuláře. Aktuální adresář, odkud bude načítání a ukládání souborů provedeno, je adresář, z kterého byl program spuštěn. Aktuální adresář lze také přednastavit na hlavním formuláři v dolním levém rohu.

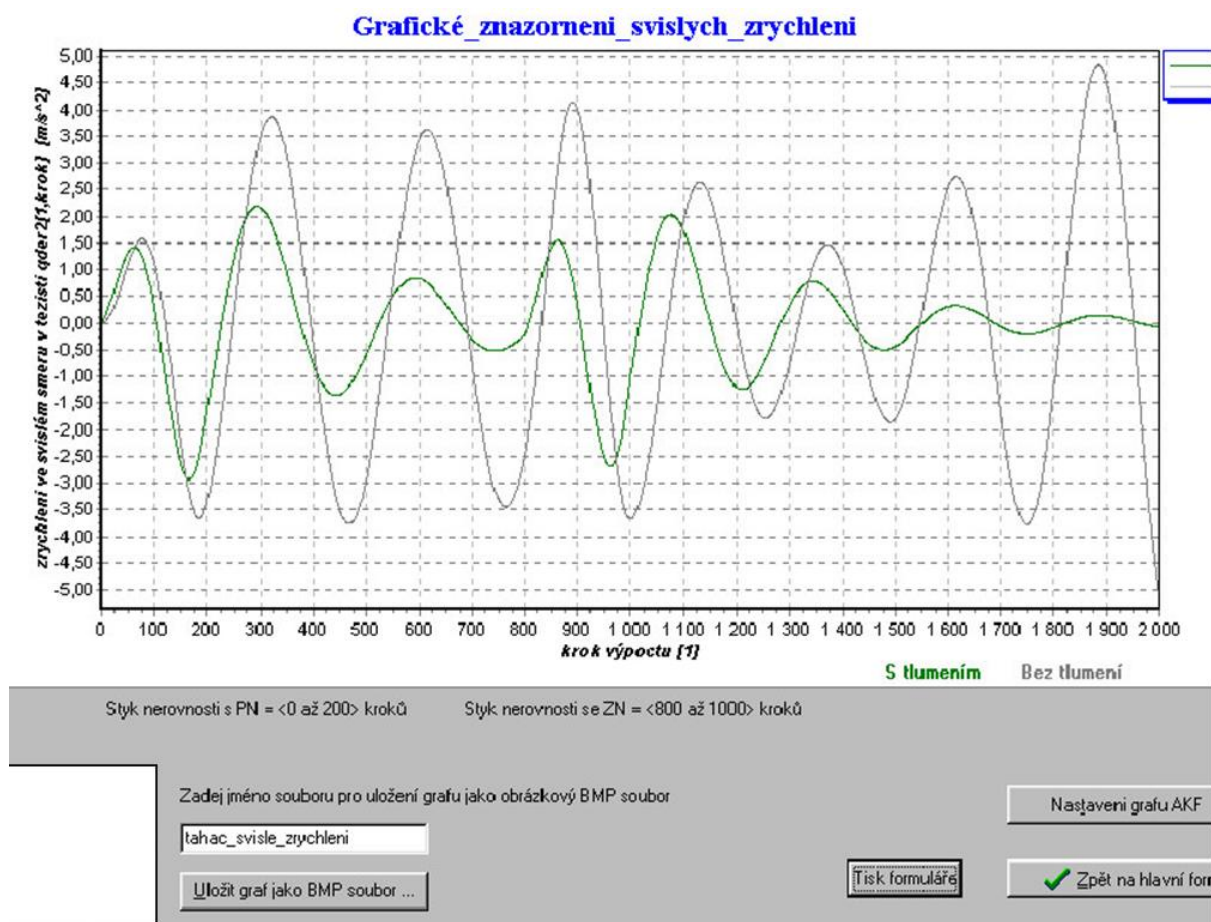
Výstupní soubor obsahuje informace:

- název vstupního souboru (v případě, že byl vstupní soubor vytvořen),

- datum a čas uložení souboru,
- hodnota časových kroků (kdy byla ve styku s nerovností přední náprava a kdy zadní náprava),
- všechny zadané hodnoty na hlavním formuláři; čas ujetí  $L_{cmax}$ , maximální počet kroků;
- vypočítané hodnoty výchylek, rychlostí a zrychlení přední nápravy, zadní nápravy tahače a návěsu, v těžišti tahače (podvozku tahače bez kabiny a náprav) a návěsu, kabiny a sedadla řidiče; dále je zde uvedena hodnota ujeté dráhy, o kolikátý časový krok se jedná a časový krok.

### Grafické zobrazení

Je možné graficky zobrazit: výchylky, rychlosti a zrychlení (tato funkce je odblokována až po provedení výpočtu). Lze zadat, co se má graficky vykreslit (zadáva se na hlavním formuláři v dolním pravém rohu – vysvětlení k jednotlivým hodnotám lze použít nápovědu).



Obr. 4 – Grafické zobrazení výstupních dat – příklad

### Uložení grafů jako BMP obrázek a nastavení grafů

Grafické znázornění je možné uložit jako BMP soubor. Je možné zadat název souboru. Názvy souborů jsou pro jednotlivé grafy předem přednastaveny. Soubor bude uložen

do aktuálního adresáře, tj. adresář, do kterého bylo naposled ukládáno (ukládány výstupní hodnoty či vstupy). V případě, kdy ještě nebyly ukládány žádné hodnoty, bude soubor uložen do adresáře, odkud byl program spuštěn.

### *Nastavení grafů*

Nastavení grafů – (čeština bez diakritiky je z důvodu kompatibility různých operačních systémů).

Minimum osy X	0.0000000
Maximum osy X	500.0000000
Minimum osy Y	0.0000000
Maximum osy Y	0.1000000
Delení osy X	100.000000000
Delení osy Y	0.010000000

Nastavení grafu

OK Nastav

Cancel

Obr. 5 – Nastavení grafů

### *Nápověda*

Při zadávání vstupů lze získat nápovědu zastavením kurzoru myši na políčku, o kterém chceme vědět, co vlastně tato vstupní hodnota znamená a čemu odpovídá ve schématu v nápovědě. Vyvolání schématu (nápovědy) lze vyvolat klávesovou zkratkou **F1**.

### *Jaké výpočty jsou v programu použity*

Bylo použito výše uvedených postupů výpočtu. Zvlášť byl proveden výpočet výchylek, rychlostí a zrychlení přední nápravy a zvlášť pro zadní nápravu tahače. Pro odpěrovanou hmotu tahače bylo použito stejného postupu pouze s malou odlišností, a to, že nerovnost v tomto případě není tvořena nerovností vozovky ale vypočtenými hodnotami výchylek přední a zadní nápravy. Totéž platí pro první derivaci nerovnosti.

Pro výpočet byly zadány podmínky styku s nerovností přední a zadní nápravy.

Pozn.: graficky lze vykreslit i případ, kdy není mezi nápravami a rámem tahače použito tlumičů pérování (hodnoty  $b1$  a  $b3$  jsou rovny nule – toto provede sám výpočet, tj. vykreslení bez tlumení znamená nepoužití tlumičů pérování u přední a zároveň i u zadní nápravy).

Pro případ výpočtu bez použití tlumení u aktuální soustavy např. nechci-li použít tlumiče pérování u zadní nápravy a chci-li použít tlumičů u přední nápravy, stačí zadat v tomto případě hodnotu  $b3$  zadat rovnu jedné (program automaticky rozpozná, že nechci zde použít tlumení a tato hodnota v programu bude brána  $b3 = 0$ ).

---

## Názorný příklad výpočtu s grafy

Proveďte názorný příklad („školní“ příklad) výpočtu za pomoci programu pro výpočet zrychlení, rychlostí a výchylek tahače s návěsem ve svislém a úhlovém směru vzniklých vlivem přejezdu tahače přes nerovnost založen na metodě strukturních prvků.

### *Parametry nerovnosti vozovky*

Délka nerovnosti  $L$ ..... 10,0 m,  
výška nerovnosti  $u$  ..... 0,3 m.

### *Grafické znázornění*

Grafické znázornění vstupní nerovnosti vozovky – příloha 1.

## **PARAMETRY VOZIDLA**

### *Parametry hmotnostní*

Hmotnost podvozku tahače (bez náprav a budky)  $Mt$  ..... 3 800 kg,  
hmotnost přední nápravy tahače  $M_{pnt}$  ..... 800 kg,  
hmotnost zadní nápravy tahače  $M_{znt}$  ..... 1 700 kg,  
hmotnost kabiny (budky)  $Mk$  ..... 1 700 kg,  
hmotnost sedadla řidiče včetně hmotnosti řidiče  $M_s$  ..... 150 kg,  
hmotnost podvozku návěsu (bez náprav)  $M_n$  ..... 26 000 kg,  
hmotnost přední nápravy návěsu  $M_{pnn}$  ..... 500 kg,  
hmotnost zadní nápravy návěsu  $M_{znn}$  ..... 500 kg,  
moment setrvačnosti podvozku tahače  $J_t$  ..... 85 500 kg·m<sup>2</sup>,  
moment setrvačnosti podvozku návěsu  $J_n$  ..... 350 000 kg·m<sup>2</sup>,  
moment setrvačnosti kabiny (budky)  $J_k$  ..... 10 000 kg·m<sup>2</sup>.

### *Parametry rozměrové*

Vzdálenost přední nápravy tahače od jeho těžiště  $d$  ..... 1 250 mm,  
vzdálenost zadní nápravy tahače od jeho těžiště  $c$  ..... 3 500 mm,  
vzdálenost přední nápravy návěsu od jeho těžiště  $g$  ..... 1 300 mm,  
vzdálenost zadní nápravy návěsu od jeho těžiště  $h$  ..... 2 500 mm,  
vzdálenost točnice od těžiště tahače  $e$  ..... 2 100 mm,  
vzdálenost točnice od těžiště návěsu  $f$  ..... 4 900 mm,



---

vzdálenost zadního vypružení kabiny od těžiště tahače $o$ .....	800 mm,
vzdálenost předního vypružení kabiny od těžiště tahače $p$ .....	1 000 mm,
vzdálenost zadního vypružení kabiny od těžiště kabiny $r$ .....	800 mm,
vzdálenost předního vypružení kabiny od těžiště kabiny $s$ .....	1 000 mm,
vzdálenost vypružení sedadla řidiče od těžiště kabiny $w$ .....	100 mm.

### Parametry – tuhost a tlumení

#### Tahač

Mezi vozovkou a nápravou (pneumatiky):

- přední
 

tlumení $b_1$ .....	10 N·s/m,
tuhost $k_1$ .....	937 500 N/m,
- zadní
 

tlumení $b_2$ .....	10 N·s /m,
tuhost $k_2$ .....	937 500 N/m.

Mezi nápravou a podvozkem:

- přední
 

tlumení $b_5$ .....	32 000 N·s/m,
tuhost $k_5$ .....	300 000 N/m,
- zadní
 

tlumení $b_6$ .....	35 000 N·s/m,
tuhost $k_6$ .....	600 000 N/m.

Mezi podvozkem a kabinou:

- přední
 

tlumení $b_{11}$ .....	1 200 N·s/m,
tuhost $k_{11}$ .....	14 000 N/m,
- zadní
 

tlumení $b_{10}$ .....	1 200 N·s/m,
tuhost $k_{10}$ .....	14 000 N/m.

Mezi sedadlem a kabinou

- |                        |            |
|------------------------|------------|
| tlumení $b_{12}$ ..... | 200 N·s/m, |
| tuhost $k_{12}$ .....  | 1 200 N/m. |

#### Návěš

---

Mezi vozovkou a nápravou (pneumatiky):

- přední  
tlumení  $b_3$ ..... 10 N/m,  
tuhost  $k_3$  ..... 937 500 N/m,
- zadní  
tlumení  $b_4$ ..... 10 N·s/m,  
tuhost  $k_4$  ..... 937 500 N/m.

Mezi nápravou a podvozkem:

- přední  
tlumení  $b_7$ ..... 55 800 N·s/m,  
tuhost  $k_7$  ..... 500 000 N/m,
- zadní  
tlumení  $b_8$ ..... 55 800 N·s/m,  
tuhost  $k_8$  ..... 500 000 N/m.

Mezi tahačem a návěsem (točna):

- tuhost  $k_9$  ..... 300 000 N/m.

### **DALŠÍ PARAMETRY**

- Rychlost jízdy soupravy  $v$ ..... 60 km/hod,
- časový krok výpočtu  $i$  ..... 0,001 s,
- délka ujeté celkové dráhy  $L_{max}$  ..... 60 m.

### **GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ**

#### *Svislý směr*

Grafické zpracování výsledků výchylek – příloha 2.

Grafické zpracování výsledků rychlostí – příloha 3.

Grafické zpracování výsledků zrychlení – příloha 4.

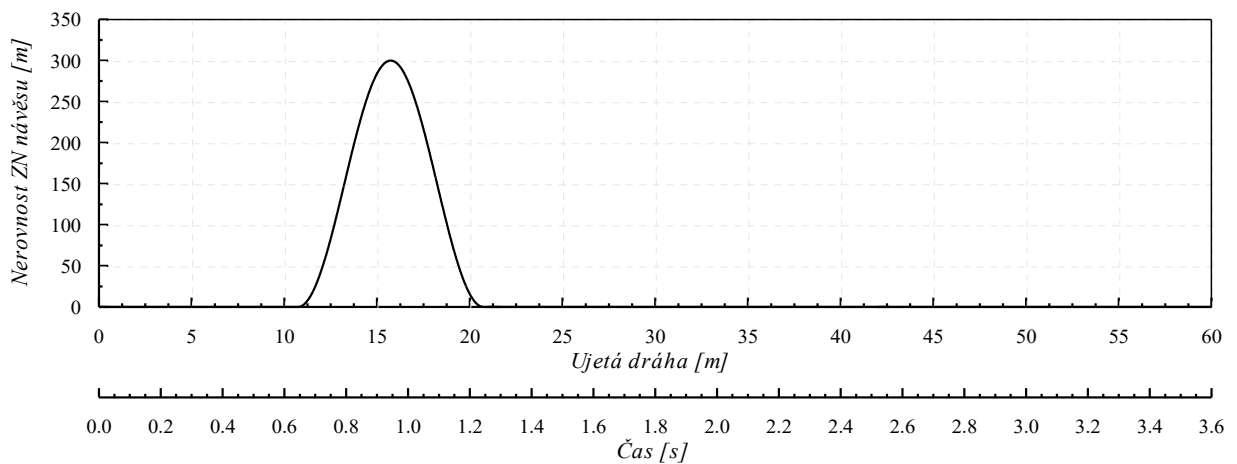
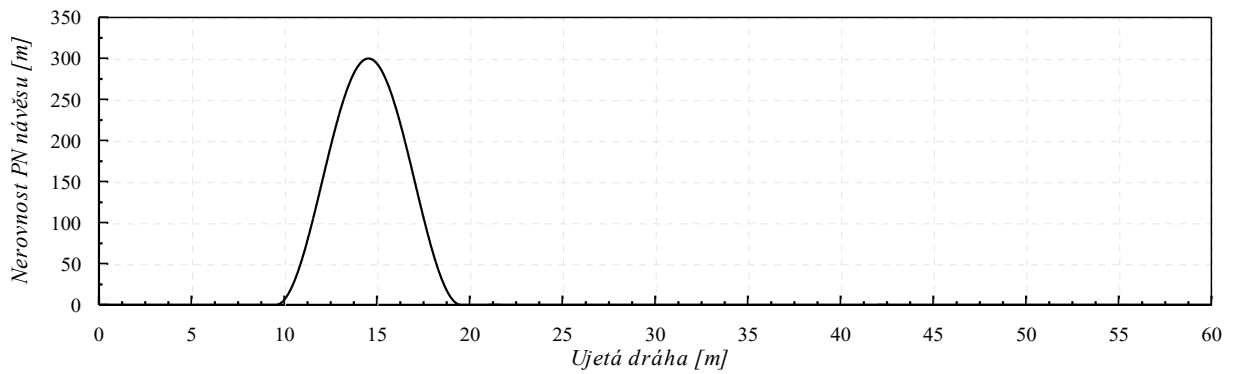
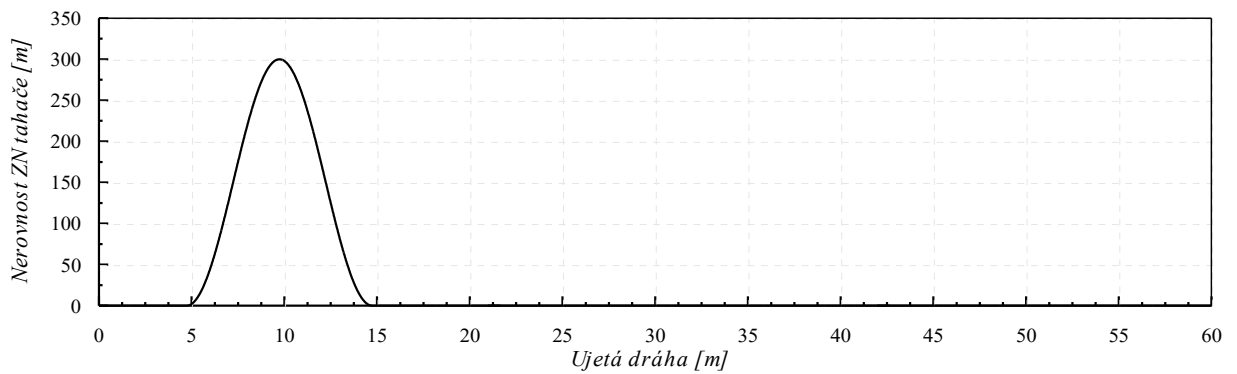
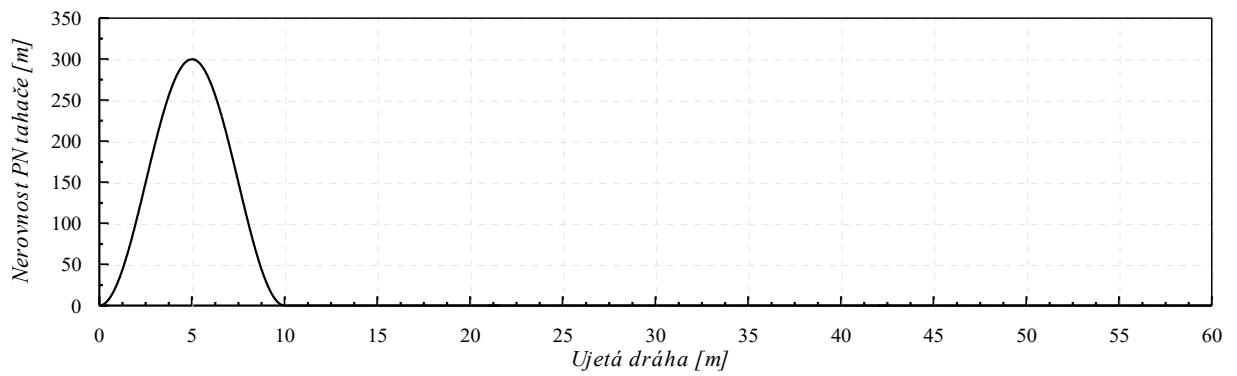
#### *Úhlový směr*

Grafické zpracování výsledků výchylek – příloha 5.

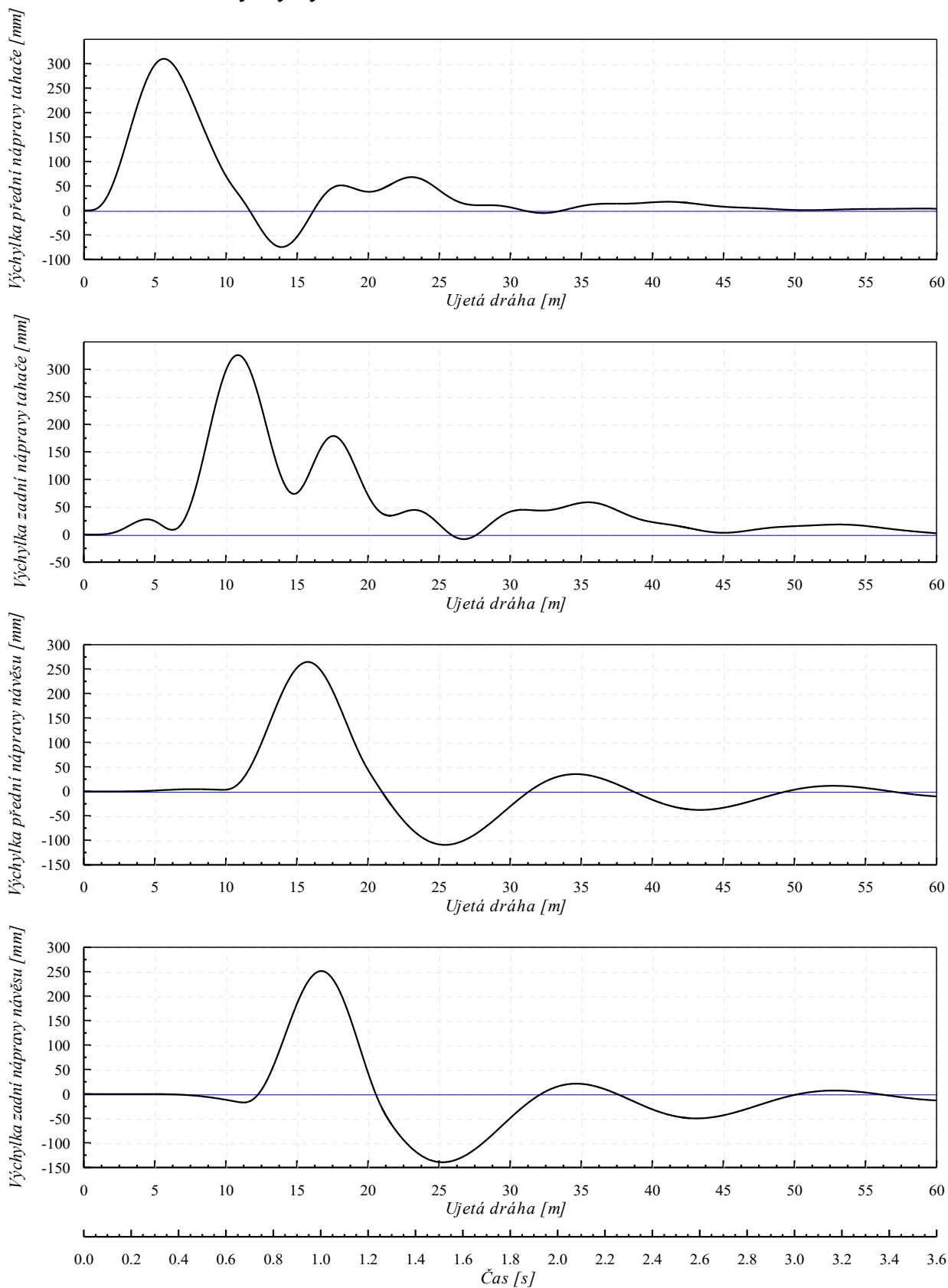
Grafické zpracování výsledků rychlostí – příloha 6.

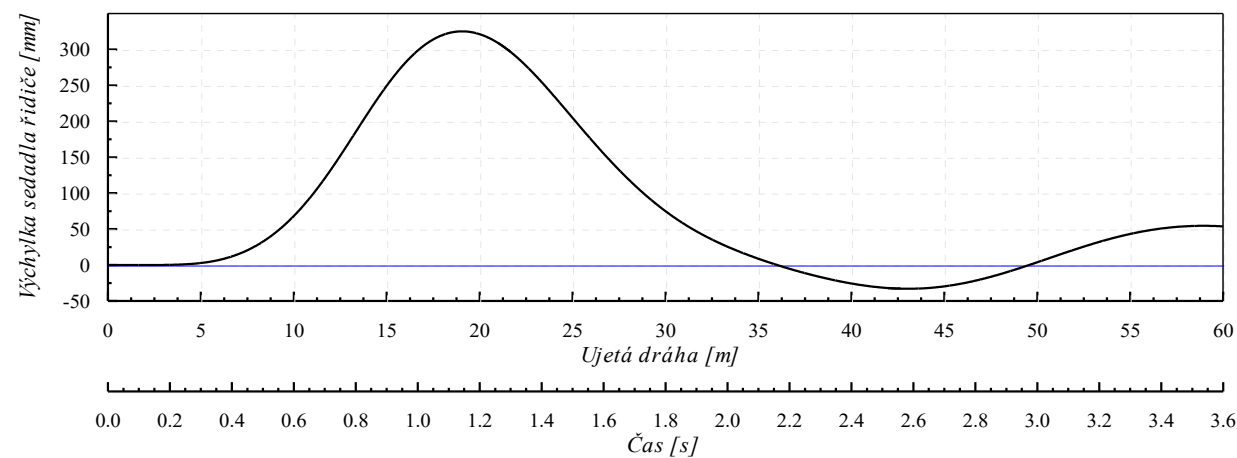
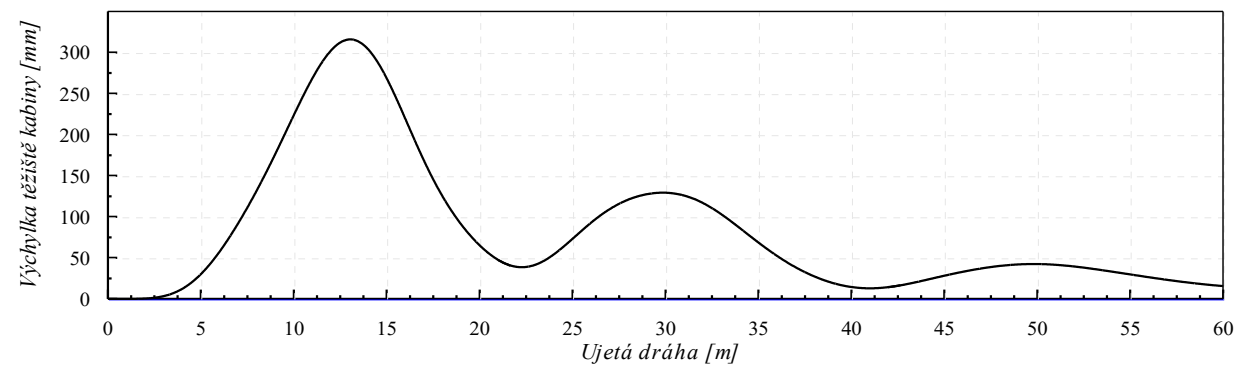
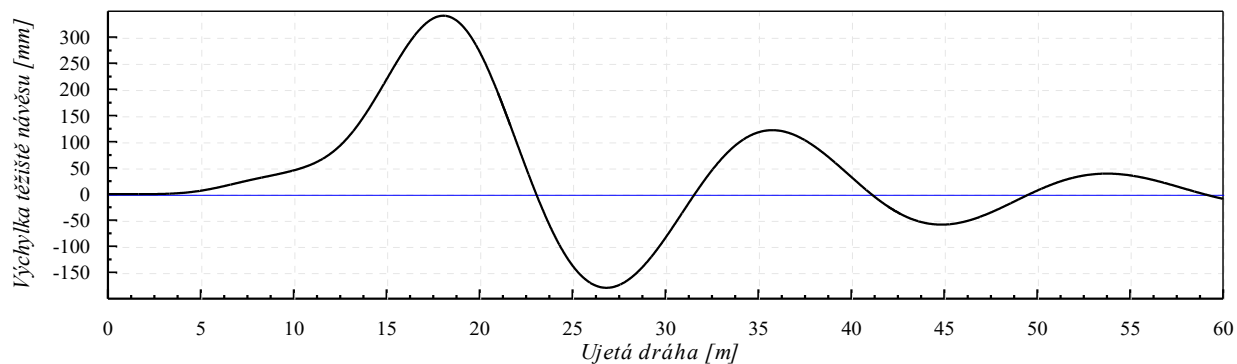
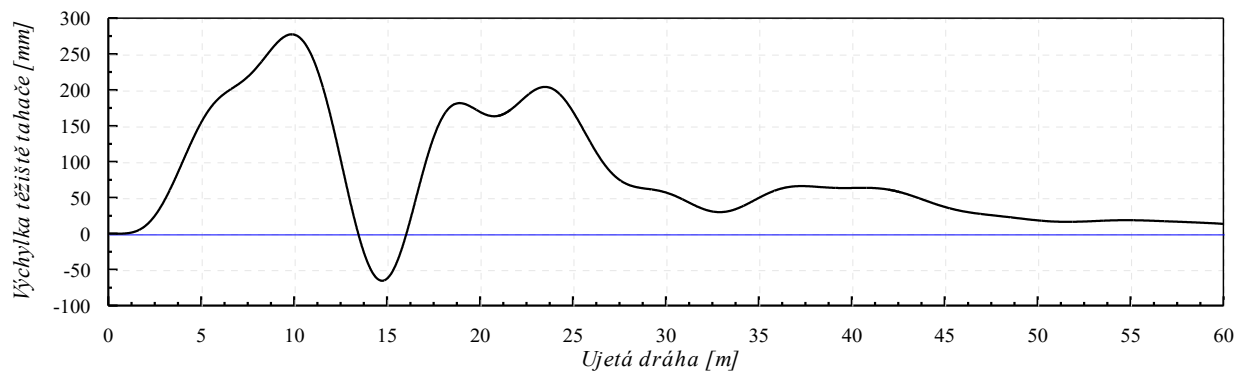
Grafické zpracování výsledků zrychlení – příloha 7.

## PŘÍLOHA I Vstupní nerovnosti vozovky

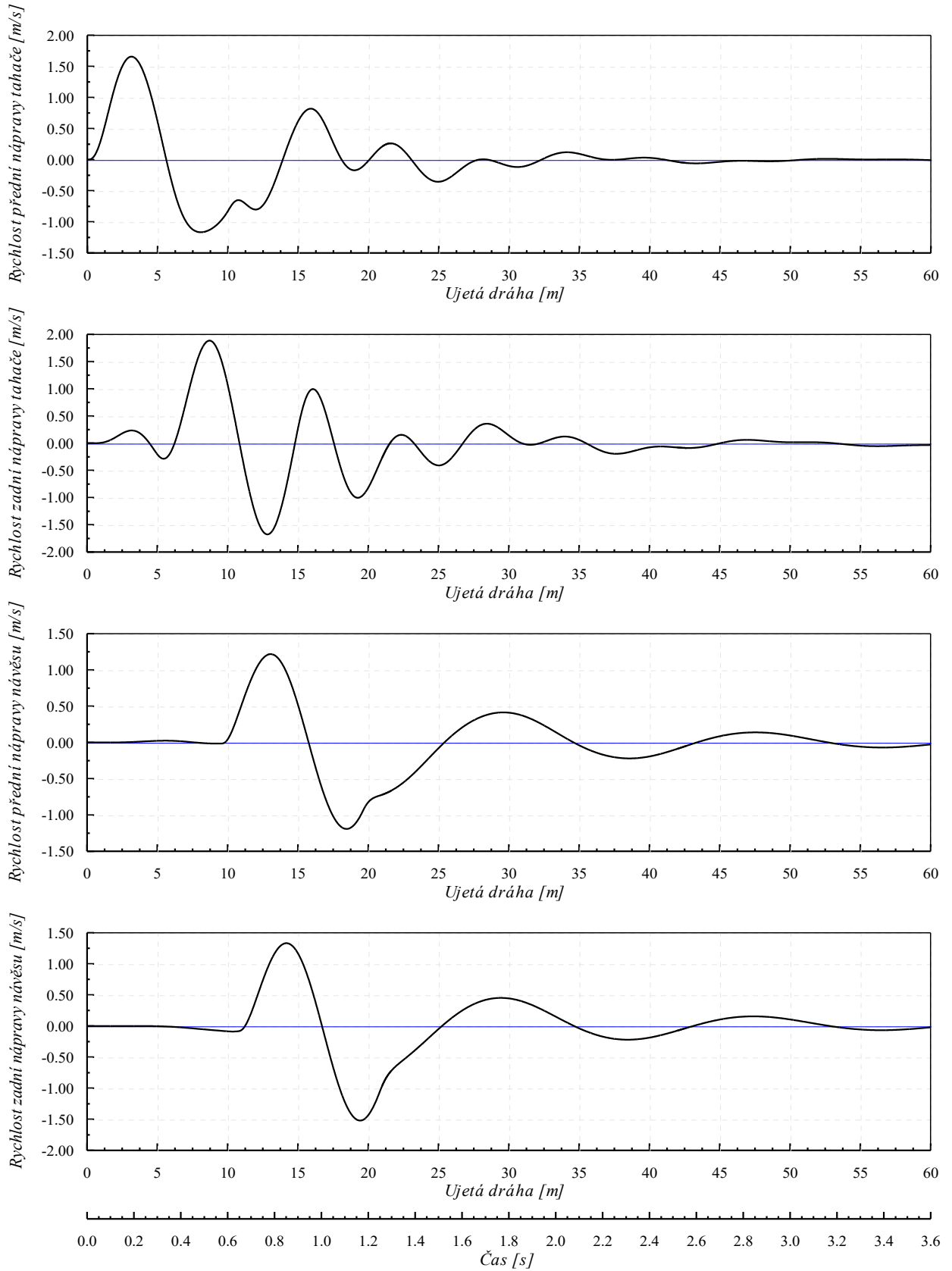


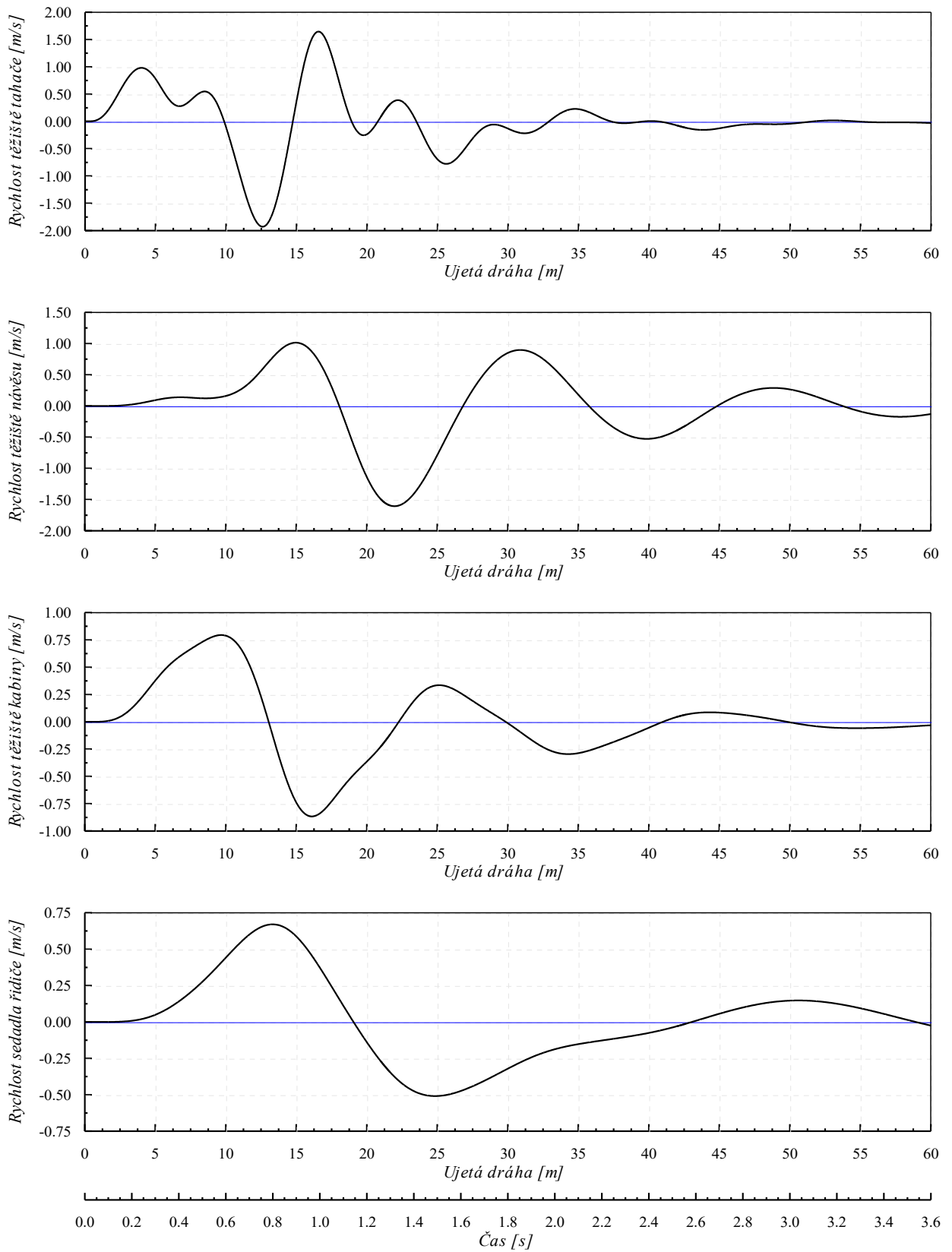
## PŘÍLOHA 2 Svislé výchylky



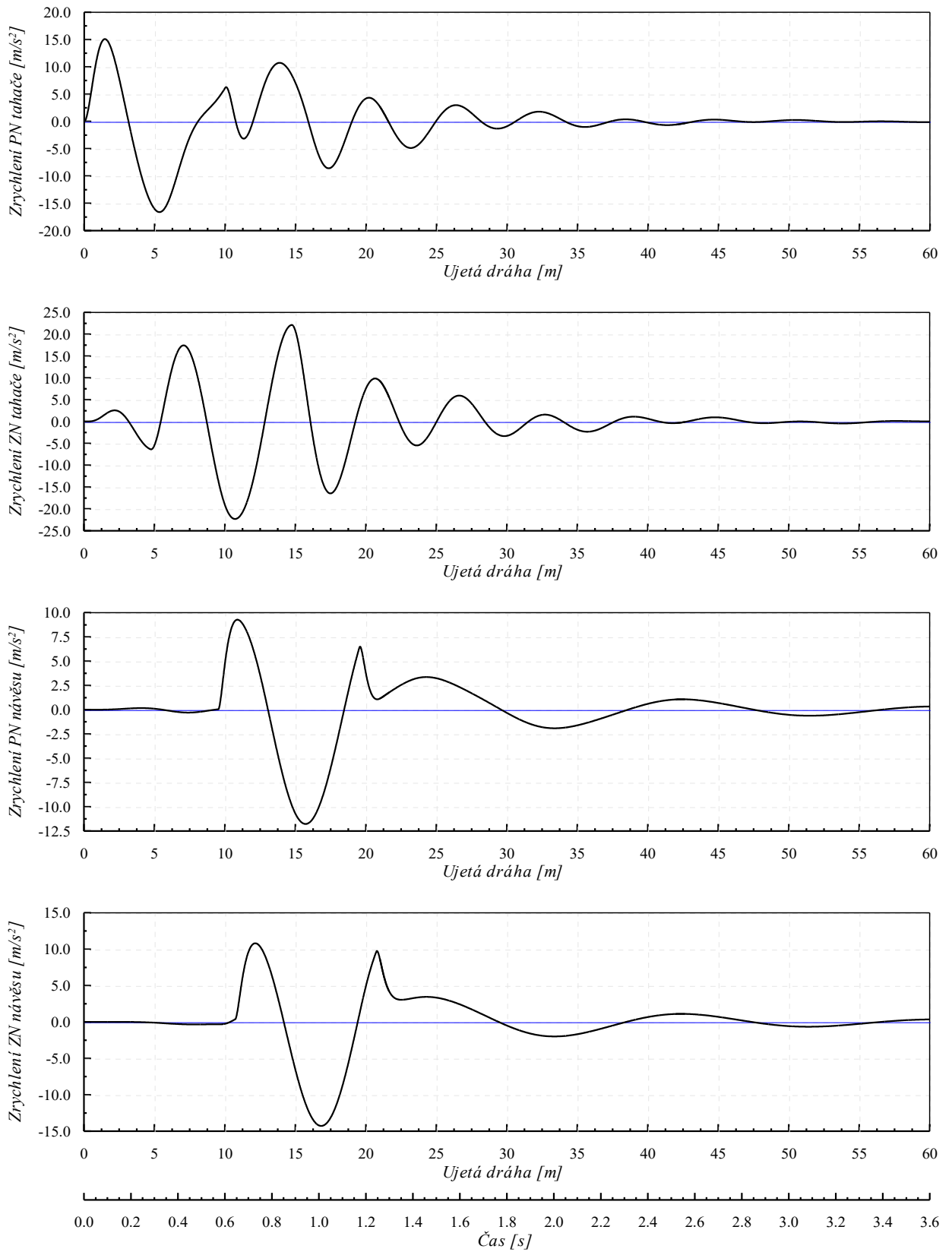


### PŘÍLOHA 3 Svislé rychlosti

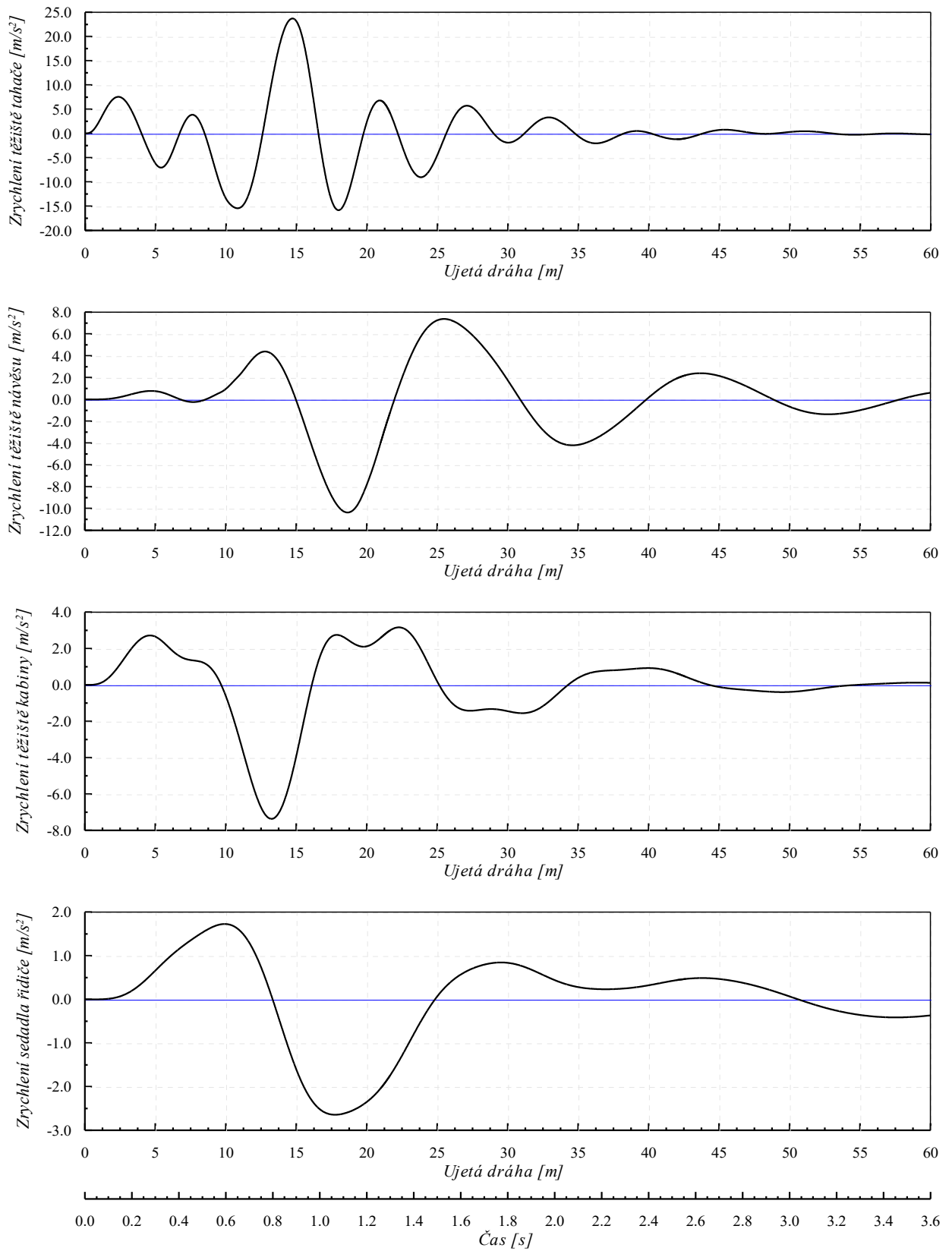




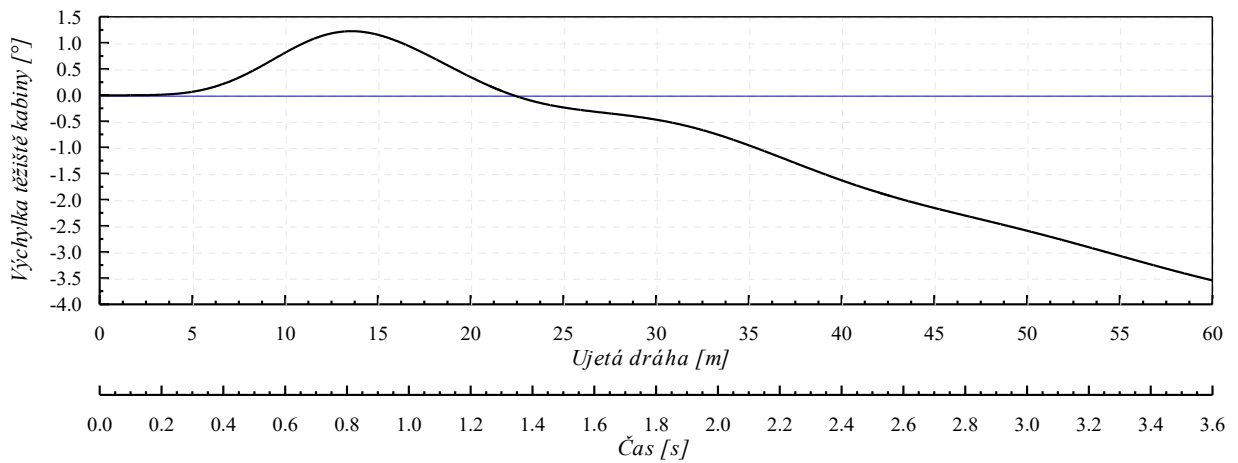
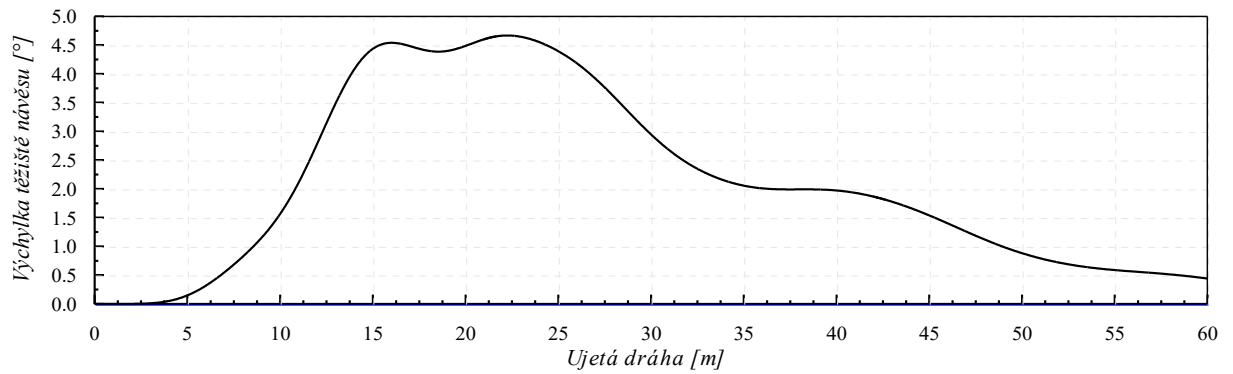
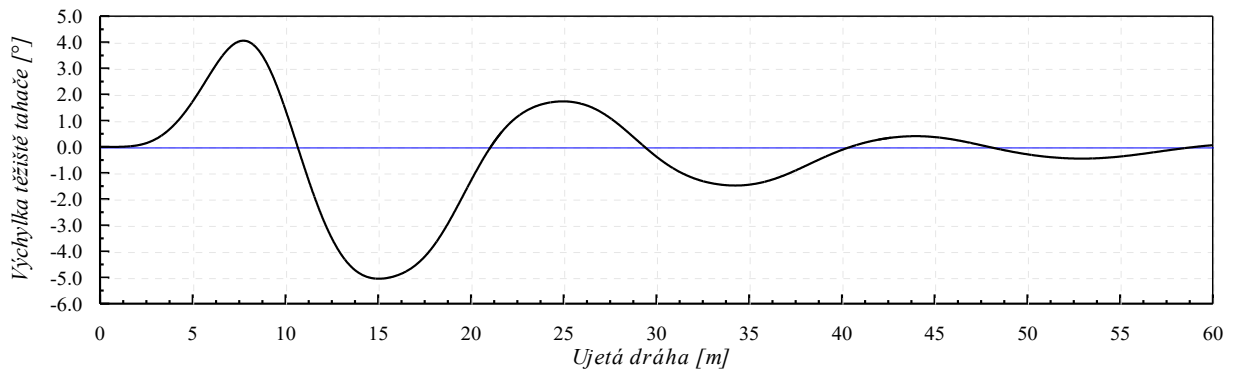
#### PŘÍLOHA 4 Svislé zrychlení



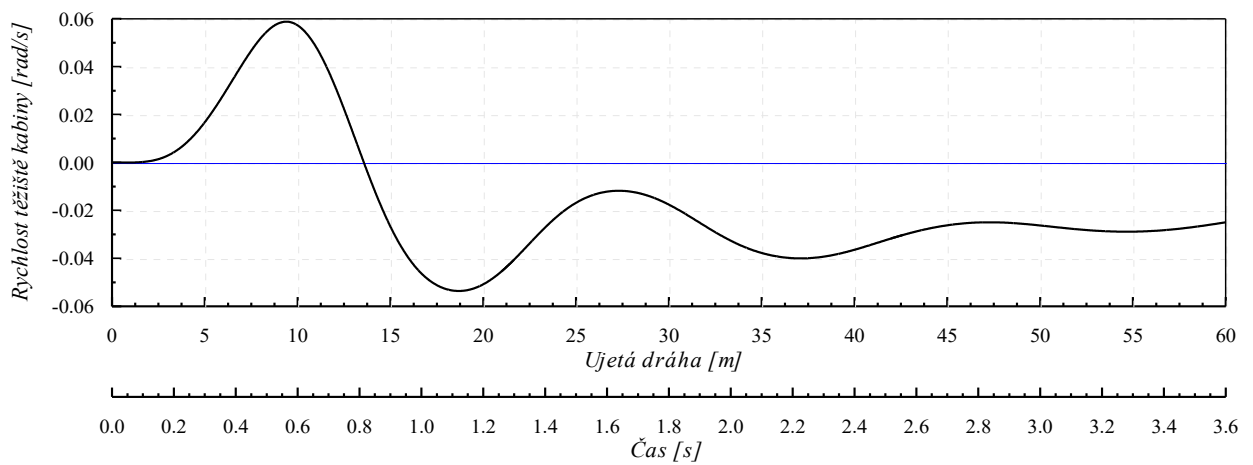
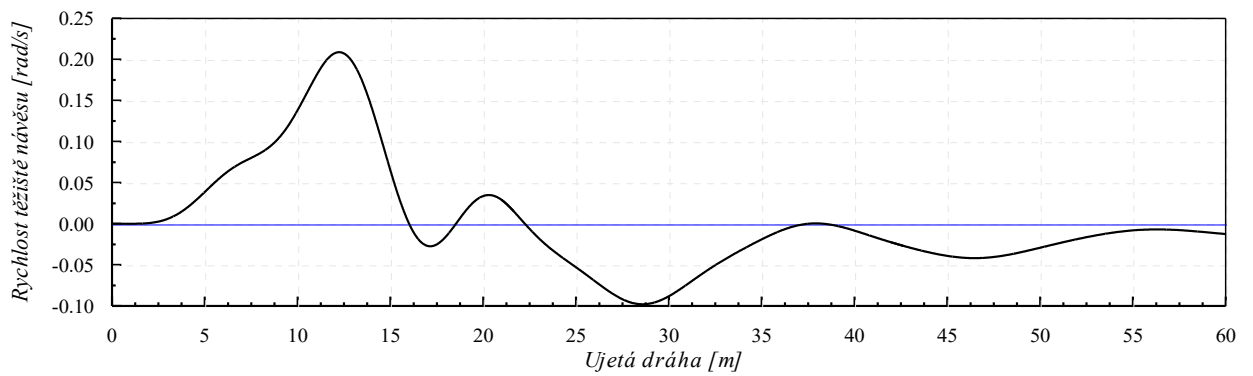
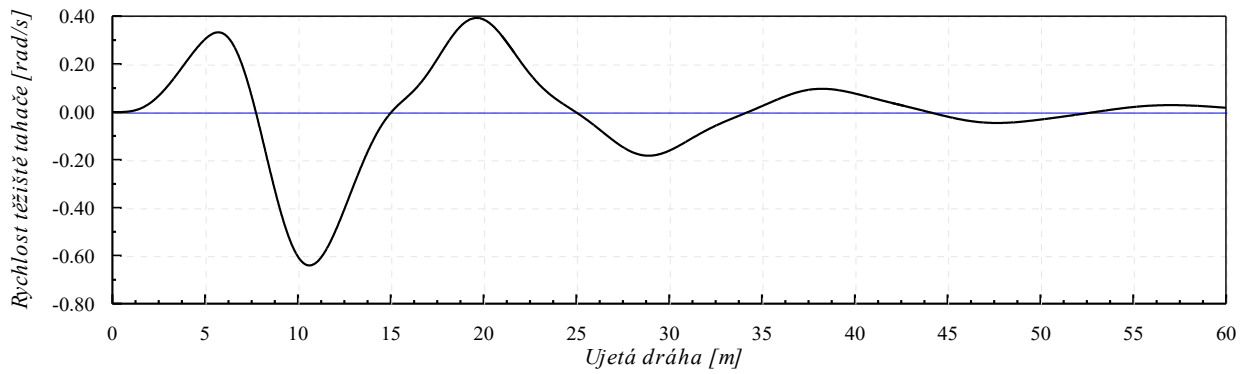




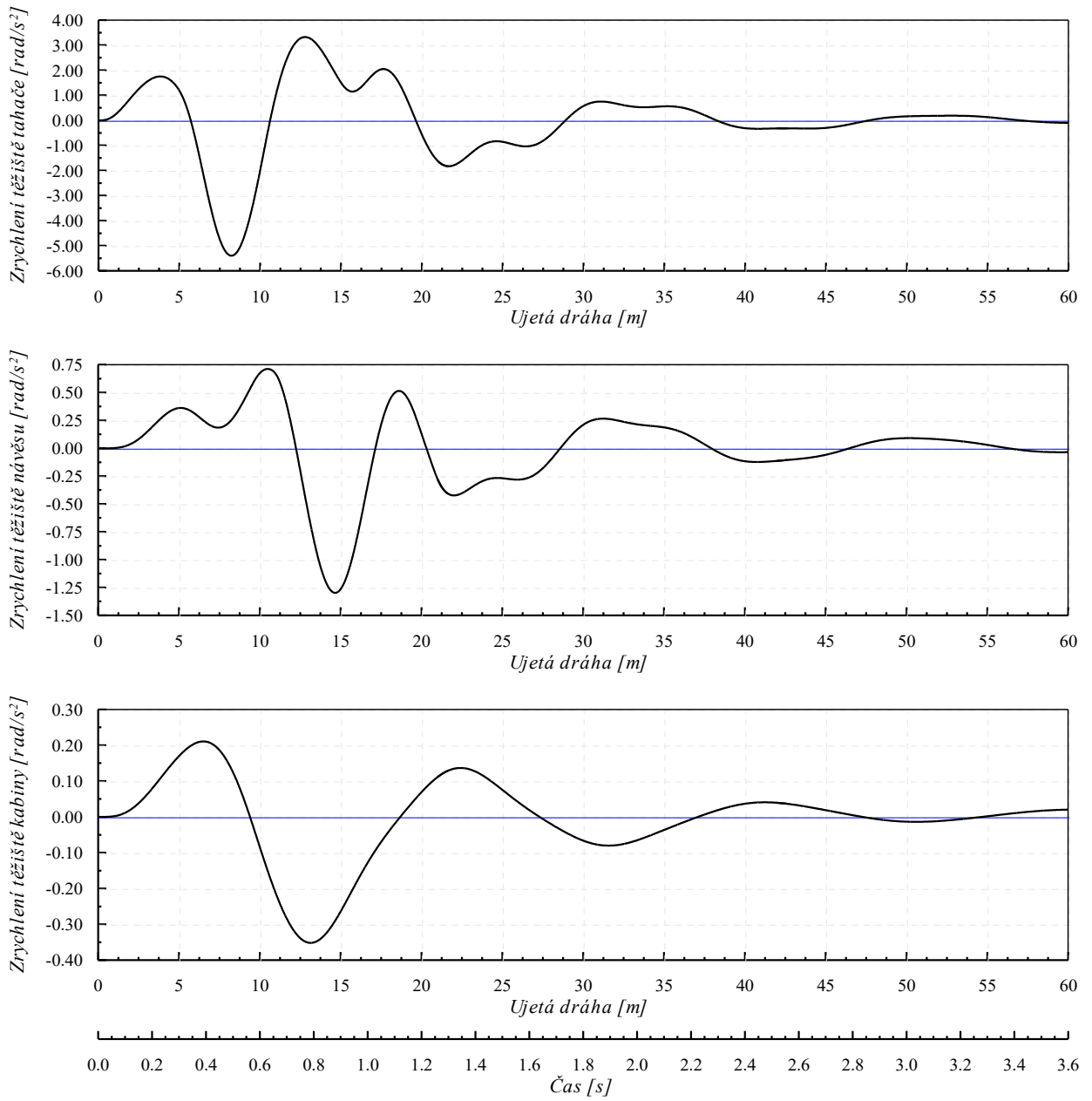
## PŘÍLOHA 5 Úhlové výchylky



## PŘÍLOHA 6 Úhlové rychlosti



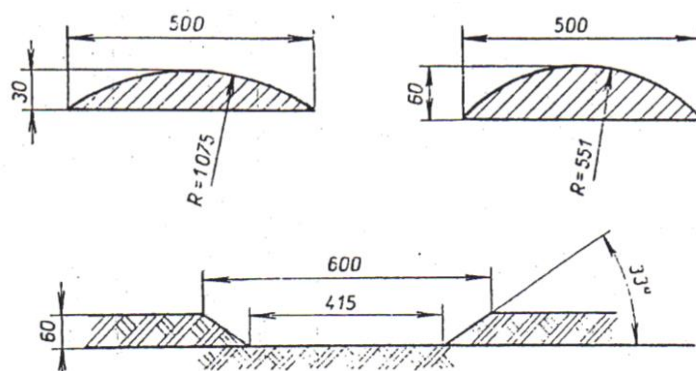
## PŘÍLOHA 7 Úhlová zrychlení



## Dodatek

### Typy překážek při jízdě vozidla

Pro měření dynamických součinitelů při jízdě vozidla přes překážky je postavena norma ČSN 30 0560 (z r.1970, [1]), která definuje tři typy překážek na vozovce. Dvě jsou válcové výsečové překážky (válcový výstupek) o délce výseče 500 mm a výšce 30 a 60 mm, třetí má tvar „prohlubně“ (obr. 6).

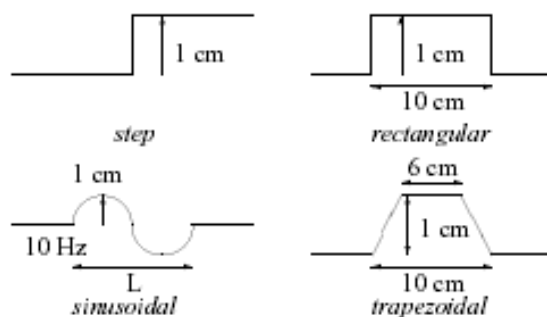


Obr. 6 – Definice překážek podle normy ČSN 30 0560 [1]

V normě popsané překážky jsou určeny pro zkoumání dynamických stavů celého vozidla, přičemž norma neuvádí a lze se pouze domnívat, že výběr geometrických parametrů překážky je ovlivněn i velikostí pláště pneumatiky a překážky lze aplikovat i pro dynamické zkoušení pneumatik samotných.

### Překážky pro dynamické výpočty

Nejčastěji používané druhy překážek podle geometrie překážky pro dynamické výpočty kontaktní úlohy „pneumatiky–vozovka“, tj. přejezd vozidla přes překážku, [2] jsou uvedeny na obr. 2. Překážky je možné dělit z pohledu podélného profilu překážky na vyduté a vypuklé, přičemž plochy překážek mohou být zaoblené nebo rovinné.



Obr. 7 – Geometrické druhy překážek používané pro dynamické výpočty [2]

---

## Použitá literatura

- [1] ČSN 63 1511 (631511), 1970. Pérování vozidel. Měření dynamických součinitelů při jízdě vozidla přes překážky.
- [2] Miege, A., 2002: Tyre for truck ride simulations. CPGS Dissertation. University of Cambridge.

Další informace o nerovnostech je možné získat v publikaci:

- [3] Krmela, Jan, 2017. Tire Casings and Their Material Characteristics for Computational Modeling. Vědecká monografie. Czestochowa, Polsko: Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menadżerów Jakości i Produkcji (Printing House The Managers of Quality and Production Association). ISBN 978-83-63978-62-4.

---

Název: Dynamika – výpočet přejezdu tahače přes nerovnost  
Autor: doc. Ing. Jan Krmela, Ph.D.  
Druh díla: vysokoškolské skriptum  
Vydání: první, květen 2021  
Vydavatel: Univerzita J. E. Purkyně, Ústí nad Labem, Česká republika  
Stran: 31 plus přílohy

Tato publikace prošla jazykovou úpravou.

© Jan Krmela, 2021

ISBN 978-80-7561-297-7

