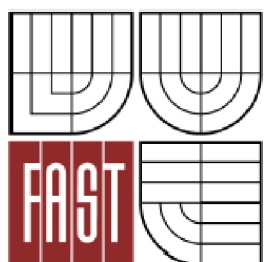




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

## ROZVOJ METODIKY POSUZOVÁNÍ SVODIDEL Z HLEDISKA DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ANALYSIS ROAD SAFETY BARRIERS IN TERMS OF  
DYNAMIC EFFECTS

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. IVAN KOUDELKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. VLASTISLAV SALAJKA, CSc.

BRNO 2014

© 2014 Ivan Koudelka

Ústav stavební mechaniky  
Fakulta stavební  
Vysoké učení technické v Brně  
Česká republika

## **Abstrakt**

Předložená práce analyzuje metodiku a přístupy dané legislativou. Předkládá v tisku prezentované výsledky numerického modelování nárazu vozidel do bariéry řešených ve světě i v ČR. Přináší návrh metodiky posuzování svodidel.

Metodika navazuje na základní principy užití v TP 101 a ČSN EN 1991-1-1. Kinetická energie vozidla v okamžiku nárazu je nahrazena statickou silou, jejíž účinky jsou srovnatelné s účinky nárazu vozidla. Nosná konstrukce svodidla je řešena za pomoci prostředků statiky. Ve výpočtu je uplatněna i deformace vozidla, což představuje reálné rozdělení energie pohlcené deformací vozidla a energie, kterou musí absorbovat svodidlo. Navrhované postupy umožňují zohlednit nelineární chování konstrukce jak z hlediska geometrické, tak z hlediska materiálové nelinearity. Práce se rovněž zabývá interpretací různých druhů podepření konstrukcí do výpočtového modelu. Na konkrétním případě je demonstrován způsob modelování pružného podepření sloupku svodidla v zemině, či model tření volně uloženého betonového bloku po podložce. K zajištění realitě odpovídající polohy vzájemně spojených volně uložených bloků je navržen způsob modelování kontaktu v místě jejich možného průniku. K výraznému zpřesnění výpočtu přispívá postupné zatěžování konstrukce pomocí přírůstku zatížení a vyčíslování přírůstků energie absorbované deformací po jednotlivých krocích. Předkládaná metodika představuje účinný nástroj k posuzování svodidel, pro jehož aplikaci je dostatečné užití běžných prostředků a vybavení, kterými disponuje téměř každý projektant zabývající se statikou stavebních konstrukcí. V závěru práce jsou zobecněny poznatky získané z řešených příkladů a doplněny o grafická vyjádření.

## **Abstract**

The presented work analyses the methodology and approach of the legislation. It presents in the press presented results of numerical modelling of the impact of vehicles crashed into barriers that are being solved in the Czech Republic and worldwide. It presents a recommendation of a methodology for assessing crash barriers.

The methodology follows the basic principles used in the TP 101 and EN 1991-1-1. The kinetic energy of the vehicle at the moment of impact is replaced with substitute static force, whose effects are comparable with those of a vehicle collision. The supporting structure of crash barriers is implemented in compliance with means of statics. The calculation includes the vehicle deformation, which represents the real distribution of the energy absorbed by the

deformation of the vehicle and the energy that crash barriers need to absorb. The proposed methods allow to take into account non-linear behaviour of the structure both in terms of geometry and in terms of material nonlinearity. The work also deals with the interpretation of various types of support structures in the computational model. A specific case is used for a demonstration of a way of modelling the elastic supporting column of crash barriers in the soil, or modelling the friction of a loose concrete block over the surface. To ensure the proper position of interconnected loose blocks corresponding to the reality, a method of modelling the place of a possible contact of the breakthrough is drafted. A significant contribution to the more accurate calculation is achieved by sequential increase of the load on the construction by using load increment and measurement of energy increases absorbed by the deformation in each step. The presented methodology is an effective tool to assess crash barriers. For the application of this tool, using common resources and facilities available to almost every designer dealing with statics of structures is sufficient. In conclusion, the knowledge obtained from solved examples is generalized and complemented by a graphical representation.

#### **Klíčová slova**

Svodidlo, vozidlo, náraz, deformace, energie, náhradní síla, deformační zóna

#### **Keywords**

Barrier, vehicle, crash, deformation, energy, representative force, deformation zone

## OBSAH

<b>1.</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>SOUČASNÝ STAV SYSTÉMU POSUZOVÁNÍ</b> .....	<b>7</b>
<b>4.</b>	<b>ROZBOR METODIKY NÁVRHU SVODIDLA DLE TP 101</b> .....	<b>8</b>
4.1	FORMULACE ÚLOHY – PRINCIP ŘEŠENÍ .....	8
4.2	ENERGETICKÁ BILANCE NÁRAZU – ODVOZENÍ VELIKOSTI SÍLY NAHRAZUJÍCÍ NÁRAZ ....	8
4.3	PRACOVNÍ DIAGRAM SVODIDLA .....	10
<b>5.</b>	<b>ROZBOR METODIKY PRO NAVRHOVÁNÍ SVODIDEL A ZÁBRADLÍ V GARÁŽÍCH DLE ČSN EN 1991-1-1</b> .....	<b>11</b>
5.1	USTANOVENÍ NORMY .....	11
5.2	ANALÝZA VZTAHU PRO STANOVENÍ NÁHRADNÍ SÍLY A KINETICKÉ ENERGIE UVEDENÉHO V ČSN EN 1991-1-1 .....	11
5.3	ANALÝZA VSTUPŮ .....	12
5.3.1	RYCHLOST VOZIDLA .....	12
5.3.2	DEFORMACE VOZIDLA .....	12
<b>6.</b>	<b>NÁVRH METODIKY POSUZOVÁNÍ SVODIDEL</b> .....	<b>13</b>
6.1	NORMY K POSUZOVÁNÍ SVODIDEL .....	13
6.2	NÁVRH ZÁKLADNÍCH VZTAHŮ A ALGORITMŮ PRO POSUZOVÁNÍ SVODIDEL POMOCÍ NÁHRADNÍ SÍLY .....	13
6.2.1	ZÁKLADNÍ ENERGETICKÝ PRINCIP .....	14
6.2.2	KINETICKÁ ENERGIE VOZIDLA .....	14
6.2.3	ENERGIE DEFORMACE .....	14
6.2.4	ZPŘESNĚNÍ VÝPOČTU NÁHRADNÍ SÍLY .....	14
6.2.5	TUHOST VOZIDLA .....	15
6.2.6	VÝPOČET ENERGIE ABSORBOVANÉ SYSTÉMEM VOZIDLO SVODIDLO .....	16
6.2.7	OBECNÝ ALGORITMUS POSOUZENÍ SVODIDLA .....	16
<b>7.</b>	<b>POZNÁMKY K TVORBĚ MODELU SVODIDLA</b> .....	<b>18</b>
7.1	GEOMETRIE KONSTRUKCE .....	18
7.2	PODEPŘENÍ .....	19
7.2.1	MODEL SVODNICOVÉHO SVODIDLA ULOŽENÉHO V ZEMINĚ .....	19
7.2.2	MODEL KONSTRUKCE VOLNĚ ULOŽENÉ NA PODLOŽCE .....	21
7.2.3	ZABEZPEČENÍ VZÁJEMNÉHO POSTAVENÍ DÍLCŮ (KONTAKT) .....	22
<b>8.</b>	<b>ZHDNOCENÍ VÝSLEDKŮ ŘEŠENÝCH PŘÍKLADŮ, ZOBECNĚNÍ, ZÁVĚRY</b> .....	<b>24</b>
8.1	DEFORMAČNÍ ZÓNA VOZIDLA A JEJÍ TUHOST .....	24
8.1.1	VLIV TUHOSTI DEFORMAČNÍ ZÓNY VOZIDLA NA VELIKOST NÁHRADNÍ SÍLY U TUHÝCH SVODIDEL .....	26
8.2	ZPŮSOB VÝPOČTU ABSORBOVANÉ ENERGIE .....	27
<b>9.</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>29</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>30</b>
	<b>PŘEHLED PUBLIKOVANÝCH PRACÍ</b> .....	<b>32</b>
	<b>ŽIVOTOPIS AUTORA</b> .....	<b>38</b>

## 1. ÚVOD

Dvacáté století přineslo bouřlivý rozvoj silniční dopravy se stále se zvyšujícím objemem přepravených osob a zboží. Tento trend pokračuje i v současné době, moderní technologie nám umožňují produkci stále výkonnějších a rychlejších dopravních prostředků. Zajištění bezpečnosti na pozemních komunikacích je prioritou každé vyspělé společnosti. Jedním z důležitých bezpečnostních prvků na pozemních komunikacích jsou i silniční svodidla. Úkolem systémů je zadržet na komunikaci a přesměrovat neovládané vozidlo při zajištění přiměřené bezpečnosti cestujících a dalších uživatelů komunikace.

Svodidlo musí zajistit, aby se vozidlo při nárazu nedoslalo za svodidlo a aby deformace svodidla nepřekročila hodnoty, při kterých by mohlo dojít k ohrožení osob za svodidlem. K tomu, aby bylo možné považovat zadržení vozidla za úspěšné musí být náraz dostatečně „měkký“, tak aby nedošlo k nadměrnému poškození vozidla a „nadměrnému“ zranění členů posádky. Posouzení „přijatelnosti nárazu“ je poměrně komplikovaná záležitost, při které je zvažována řada faktorů. Jedním z těchto faktorů je mechanická únosnost, kde svodidlo vyšetřujeme jako nosnou konstrukci. Současně však musí být splněny i požadavky „přiměřené“ tuhosti, nutné k zajištění bezpečnosti posádky. Navrhování záchytných systému je v České republice podřízeno technickým předpisům, vydává je ministerstvo dopravy a jsou součástí harmonizovaných evropských norem.

## 2. CÍLE PRÁCE

Cíle práce jsou definovány v následujících bodech:

1. Rozbor a posouzení systému navrhování svodidel v návaznosti na platnou legislativu, analýza způsobu navrhování svodidel v souladu s doporučením uvedeným ČSN EN a TP 101.
2. Rešerše prací, které se zabývají problematikou nárazu vozidel do bariéry a jejich simulacemi pomocí matematických modelů.
3. Návrh modifikace postupů dle ČSN EN a TP 101 vedoucí k zpřesnění výsledků s možností širšího uplatnění v praxi s větším důrazem na interpretaci dynamických účinků a nelinearitu problému.
4. Hlavním cílem rozvoje a modifikace metodiky posuzování je vytvoření jednoduchého a srozumitelného nástroje posuzování svodidel, algoritmu s jednoduchým zadáváním parametrů, který s dostatečnou přesností respektuje dynamický charakter úlohy, je v souladu s platnou ČSN EN a s využitím běžně dostupných softwarových produktů je schopen poskytnout použitelné výsledky.

### 3. SOUČASNÝ STAV SYSTÉMU POSUZOVÁNÍ

Technické podmínky – Výpočet svodidel (TP 101) jsou určeny jako metodická pomůcka pro navrhování svodidel. V jednotlivých částech se zaměřují především na stanovení velikosti síly nahrazující náraz, stanovení silových a deformačních účinků náhradní síly působící na svodidlo a dále pak na definování mezních stavů svodidel jako nosných konstrukcí a na ověřování spolehlivosti svodidel proti překročení těchto mezních stavů. Řešení se snaží najít v energetické bilanci nárazu o kterou se celý výpočet „opírá“

$$E = \frac{1}{2} m(v \cdot \sin \varphi)^2 = \int F(w) dw [+Ed], \quad (3.1)$$

kde  $m$  je hmotnost vozidla,  
 $v$  je nárazová rychlost,  
 $\varphi$  úhel nárazu,  
 $F(w)$  odpor svodidla (v závislosti na deformaci svodidla),  
 $Ed$  další energie (blíže nespecifikovaného odporu).

Další pomůcka schválená Ministerstvem dopravy (TP 114) [7] z roku 2005 k problematice zatížení svodidel mimo jiné uvádí tabulku 3.1 konkrétních údajů pro nárazové zkoušky:

**Tabulka 3.1 – Zadržení svodidel „schválených“**

Označení nárazu (test č.)	Nárazová rychlost [km/h]	Úhel nárazu [stupně]	Celková hmotnost vozidla [kg]	Kinetická energie $E_k$ [kJ]
TB 11	100	20	900	40,6
TB 21	80	8	1300	6,2
TB 22	80	15	1300	21,5
TB 31	80	20	1500	43,3
TB 32	110	20	1500	81,9
TB 41	70	8	10000	36,6
TB 42	70	15	10000	126,6
TB 51	70	20	13000	287,5
TB 61	80	20	16000	462,1
TB 71	65	20	30000	572,0
TB 81	65	20	38000	724,6

Ve stávajícím systému posuzování jsou v teoretické části (ve výpočtu) používány velmi „hrubé“, nevýstižné aproximace kontaktu vozidla se svodidlem, které se omezují pouze na náhradní statickou sílu, případně na kinetickou energii.

## 4. ROZBOR METODIKY NÁVRHU SVODIDLA DLE TP 101

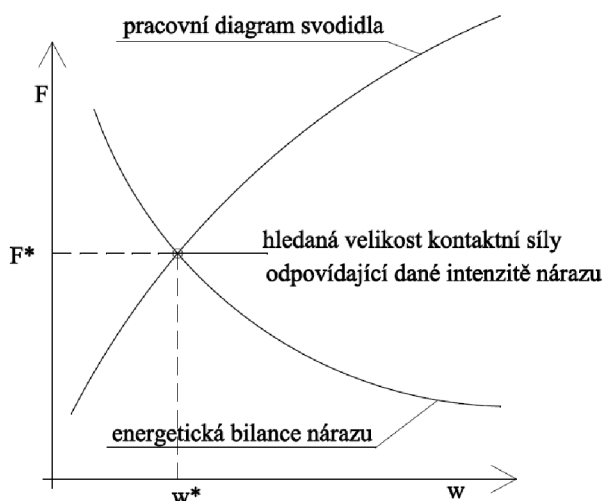
Základní normou upravující metodiku výpočtu svodidel jsou v současné době technické podmínky schválené Ministerstvem dopravy a spojů (odbor pozemních komunikací) účinné od 1. ledna 1998 vydané pod názvem TP 101 Výpočet svodidel [6].

### 4.1 FORMULACE ÚLOHY – PRINCIP ŘEŠENÍ

Řešení problému je rozděleno do tří základních úloh. První se zabývá energií nárazu a její interpretací do náhradní statické síly, jejíž účinky na svodidlo budou srovnatelné s účinky skutečného nárazu. Řešení spočívá v hledání vhodného poměru síly  $F$  a délky dráhy  $w$ , na které síla působí.

Ve druhé úloze sestavujeme „pracovní diagram“ svodidla. Hledáme závislost mezi velikostí síly působící na určené místo svodidla a deformací, kterou daná síla způsobuje.

Třetí úlohou je porovnání „energetické bilance nárazu“ s „pracovním diagramem“ svodidla, nalezení průsečíku obou závislostí (viz obr. 4.1), což odpovídá hledanému řešení.



Obr. 4.1 Pracovní diagram svodidla a energetická bilance nárazu [6]

### 4.2 ENERGETICKÁ BILANCE NÁRAZU – ODVOZENÍ VELIKOSTI SÍLY NAHRAZUJÍCÍ NÁRAZ

Při plnění své funkce má svodidlo vzdorovat ataku vozidla. V závislosti na hmotnosti vozidla, jeho rychlosti a směru stanovuje norma velikost kinetické energie, kterou musí svodidlo při

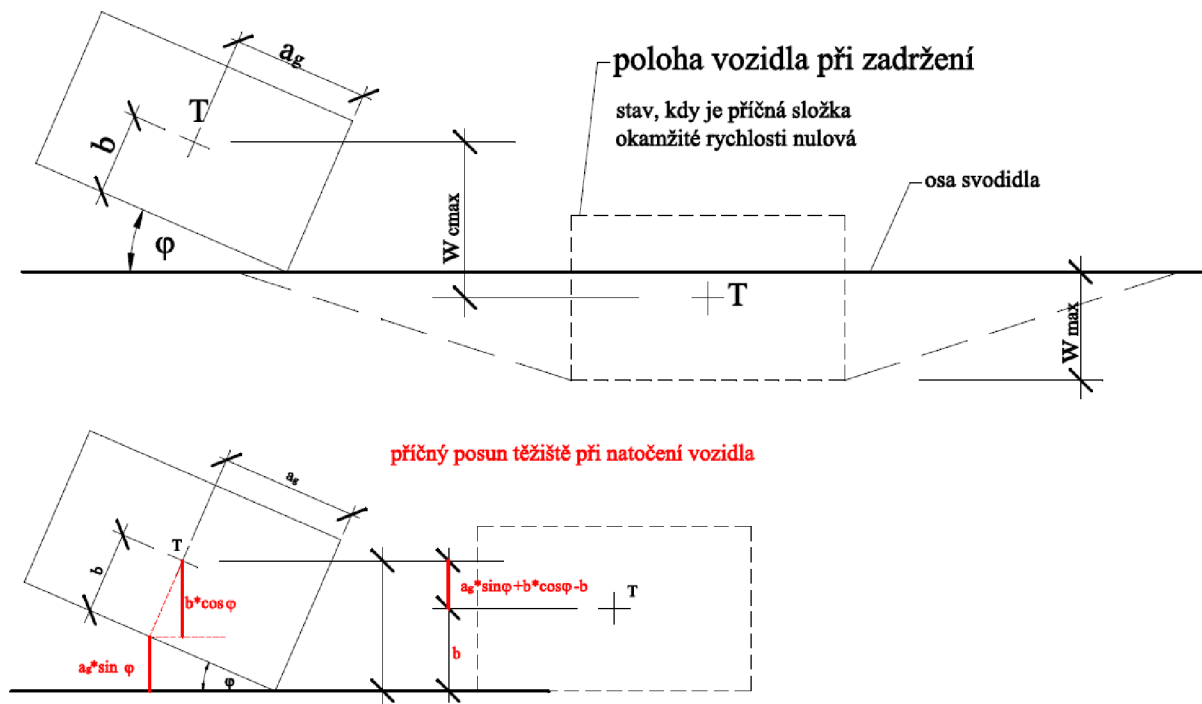


zadržení zachytit. Daná energie nárazu  $E_k$  (viz rovnice 3.1) je proto nahrazena silou  $F$  (průměrnou hodnotou) působící na dráze  $w$  v takových hodnotách, aby byla splněna podmínka:

$$E = F * w \quad (4.1)$$

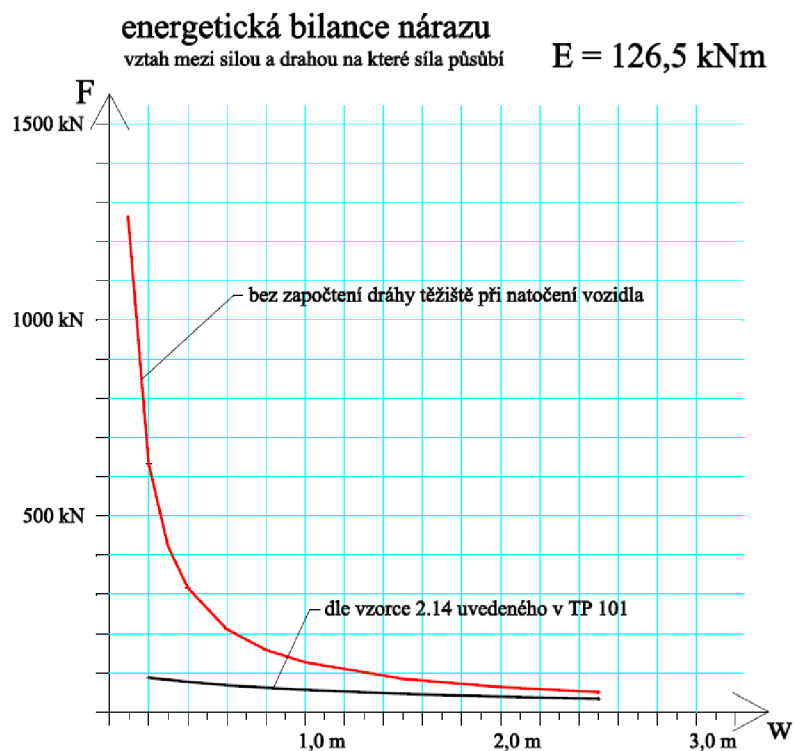
V TP 101 je velikost síly  $F$  odvozena z vyobrazeného schématu a definována následujícím vztahem (s veličinami dle obr. 4.2)

$$F = (m/2) * ((v * \sin \varphi)^2 / (w_{max} + a_g * \sin \varphi - b * (1 - \cos \varphi))) \quad (4.2)$$



Obr. 4.2 Poloha vozidla v průběhu nárazu a zadržení [6]

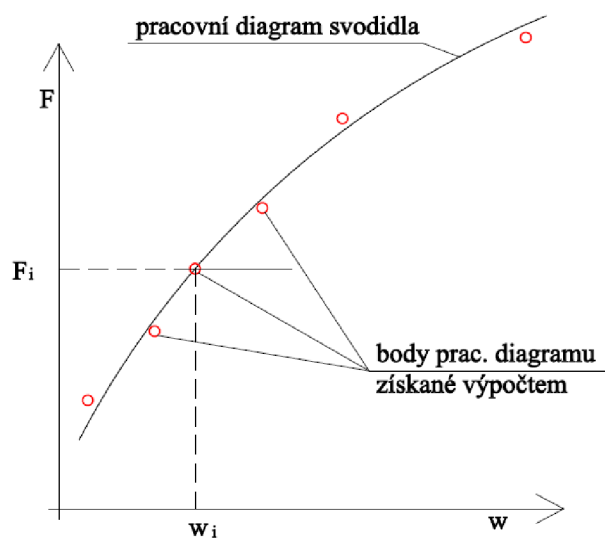
Vztah pro výpočet síly je odvozen k těžišti vozidla a zahrnuje i část dráhy, při které se vozidlo natáčí kolem bodu kontaktu do polohy rovnoběžné s osou svodidla. Natočení vozidla kromě případného tření pneumatik o povrch vozovky nic nebrání. Energie potřebná k natočení vozidla do paralelního postavení s osou svodidla musí být řádově nižší, než energie odebraná svodidlem při jeho deformaci. Uplatnění části dráhy, při které se realizuje natočení vozidla ve výpočtu je kontraproduktivní (obr. 4.3). Náhradní síla  $F$  má „simulovat“ účinky nárazu vozidla na svodidlo. Pro posouzení je důležitá její práce na dráze spojené s deformací svodidla. Prodloužením dráhy o „srovnání“ vozidla s linií svodidel (při zachování požadavku  $E = F * w$ ) je výsledkem síla menší intenzity, která nemůže účinky nárazu nahradit ani v míře, kterou předpis předpokládá. Pro stanovení náhradní síly, která má být použita pro zatěžování svodidla je rozhodující hodnota „průhybu“ svodidla  $w_{max}$ .



Obr. 4.3 Energetická bilance nárazu – velikost náhradní síly v závislosti na průhybu

### 4.3 PRACOVNÍ DIAGRAM SVODIDLA

Statický model daného svodidla budeme v místě simulovaného nárazu opakovaně zatěžovat příčnou silou  $F$ . V každém kroku budeme analyzovat její účinky na danou konstrukci svodidla (napětí a deformace jednotlivých částí). Vytvoříme graf (či tabulku) závislosti mezi zatížením  $F$  a „průhybem“  $w$ , v TP 101 [6] nazvaný jako „pracovní diagram“ svodidla.



Obr. 4.4 Sestavení pracovního diagramu svodidla

## 5. ROZBOR METODIKY PRO NAVRHOVÁNÍ SVODIDEL A ZÁBRADLÍ V GARÁŽÍCH DLE ČSN EN 1991-1-1

### 5.1 USTANOVENÍ NORMY

Zatížení svodidel a zábradlí v garážích je stanoveno v ČSN EN 1991-1-1 [9]. Konstrukce se mají navrhovat na vodorovná zatížení uvedená v textu přílohy B.

Vodorovná charakteristická síla  $F$  (v kN), působící kolmo na svodidlo a rovnoměrně rozdělená po délce 1,5 m na libovolné části svodidla v garáži, které má odolat nárazu vozidla, je dána vztahem:

$$F = 0,5 mv^2 / (\delta_c + \delta_b) \quad (5.1)$$

kde  $m$  je celková hmotnost vozidla, v kg;

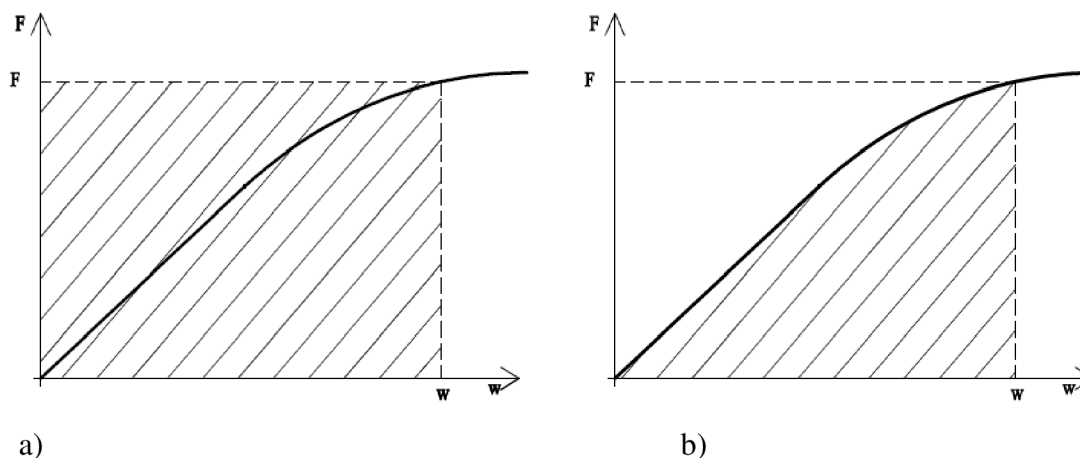
$v$  rychlost vozidla kolmo na svodidlo, v m/s;

$\delta_c$  deformace vozidla, v mm;

$\delta_b$  deformace svodidla v mm.

### 5.2 ANALÝZA VZTAHU PRO STANOVENÍ NÁHRADNÍ SÍLY A KINETICKÉ ENERGIE UVEDENÉHO V ČSN EN 1991-1-1

Vztah (5.1) popisuje skutečnost, že energie pohybujícího se vozidla bude pohlcena deformací vozidla a deformací svodidla. Na základě daných deformací je odvozena síla, kterou zatěžujeme konstrukci svodidla pro ověření jeho způsobilosti nárazu odolávat.



Obr. 5.1 Energie absorbovaná deformací svodidla a) dle ČSN EN 1991-1-1, b) skutečná

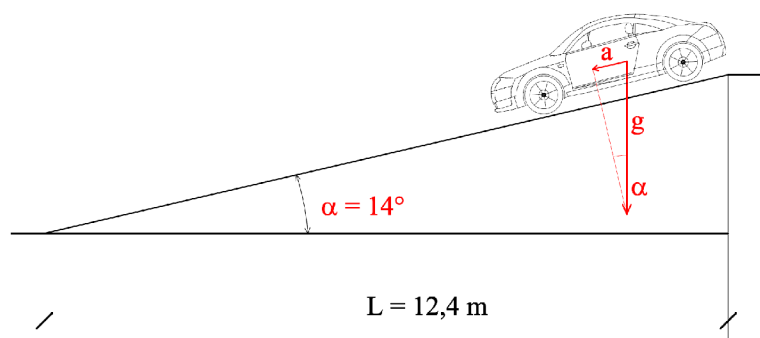
Z formálního hlediska je vztah pro výpočet síly  $F$  přesný a není na místě o něm pochybovat. To ovšem platí pouze v případě, kdy je odpor konstrukce konstantní a po celé délce (průhybu) pracuje stejná síla  $F$  (obr. 5.1 a). Pravděpodobnější je však situace, kdy síla narůstá z nulové hodnoty až do konečné velikosti při dosažení maximální výchylky (obr 5.1 b).

### 5.3 ANALÝZA VSTUPŮ

Před použitím vztahu v konkrétním výpočtu je vhodné si ověřit jakým způsobem mohou návrh ovlivnit normou doporučené hodnoty rychlosti vozidla ( $v = 4,5 \text{ m/s}$ ) a jeho deformace ( $\delta_c = 100 \text{ mm}$ ) [9].

#### 5.3.1 RYCHLOST VOZIDLA

Předpokládejme přímou rampu, která překonává výšku jednoho podlaží (3,0 m). Délka rampy při sklonu  $10^\circ$  bude 17 m, při sklonu  $14^\circ$  bude její délka 12,4 m (obr 5.3). Dále předpokládejme, vozidlo, na které působí pouze místní tíhové zrychlení ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ). Na počátku rampy má vozidlo nulovou rychlost, gravitace jej na skloněné rampě uvádí do rovnoměrně zrychleného pohybu. Rychlost vozidla na konci rampy bude 7,66 m/s.



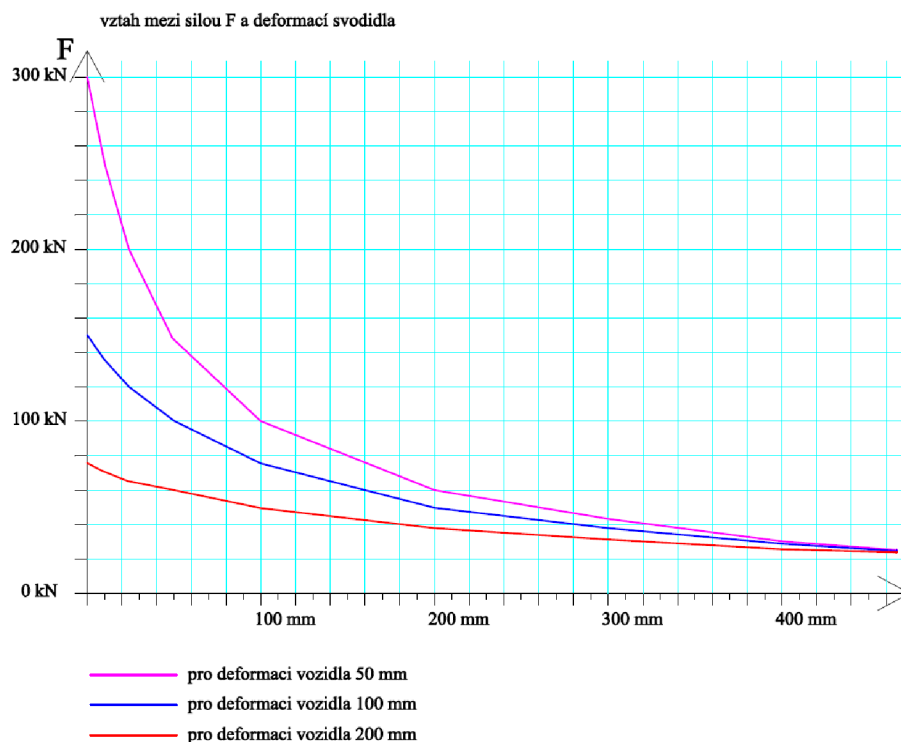
Obr. 5.3 Nájezdová rampa, odvozený rychlosti vozidla

**Kinetická energie** vozidla jedoucího rychlostí 7,66 m/s **je téměř třikrát větší**, než energie téhož vozidla při rychlosti 4,5 m/s.

#### 5.3.2 DEFORMACE VOZIDLA

Část energie nárazu je pohlcena „deformací vozidla“. V textu normy je doporučení uvažovat deformaci vozidla hodnotou 100 mm, pokud nejsou k dispozici přesnější údaje [9]. Je však nutné si uvědomit rizika s tím spojená, zvláště v případě tuhých (nepoddajných) konstrukcí svodidel. Na obrázku 5.4 je graf závislosti náhradní síly na velikosti deformace svodidla pro tři

hodnoty deformace vozidla. Vyobrazené hodnoty jsou pro vozidlo o hmotnosti 1500 kg, které se pohybovalo rychlostí 4,5 m/s. Pokud bude předmětem posouzení „svodidlo tuhé“ je zvýšená pozornost při aplikaci vztahu uvedeného v normě zcela na místě.



Obr. 5.4 Závislost náhradní síly na deformaci svodidla

## 6. NÁVRH METODIKY POSUZOVÁNÍ SVODIDEL.

### 6.1 NORMY K POSUZOVÁNÍ SVODIDEL

Stávající normy k posuzování svodidel TP 101 a ČSN EN 1991-1-1 obsahují základní principy posuzování svodidel, ale z praktického hlediska jsou uvedené postupy zcela nepoužitelné. Navržené postupy jsou velmi zjednodušené, vyžadují značnou pracnost a dosažené výsledky jsou velmi nejisté.

### 6.2 NÁVRH ZÁKLADNÍCH VZTAHŮ A ALGORITMŮ PRO POSUZOVÁNÍ SVODIDEL POMOCÍ NÁHRADNÍ SÍLY

Cílem zde prezentované metodiky posuzování je vytvoření jednoduchého a srozumitelného nástroje posuzování svodidel. Algoritmu s jednoduchým zadáváním parametrů, který

s dostatečnou přesností respektuje dynamický charakter úlohy, je v souladu s platnou ČSN EN a s využitím běžně dostupných softwarových produktů je schopen poskytnout použitelné výsledky.

### 6.2.1 ZÁKLADNÍ ENERGETICKÝ PRINCIP

Vycházíme z požadavku rovnosti kinetické energie vozidla před nárazem s velikostí součtu energií absorbovaných vozidlem a svodidlem v okamžiku zastavení vozidla. To je základní podmínka, kterou vyžaduje i TP 101 a ČSN EN 1991-1-1

$$E_k = E_d \quad (6.1)$$

### 6.2.2 KINETICKÁ ENERGIE VOZIDLA

Kinetická energie vozidla v okamžiku nárazu je dána vztahem 3.2 ( $E_k = 1/2 mv^2$ ).

### 6.2.3 ENERGIE DEFORMACE

Množství energie absorbované deformací svodidla i vozidla stanovujeme na základě velikosti deformace odpovídající velikosti náhradní síly.

Zatížení konstrukce je parametrem, který při navrhování svodidel a zábradlí atakovaných nárazem vozidla vnáší do systému řešení největší nejistoty a významným způsobem ovlivňuje použitelnost výsledků

Přesnost stanovení velikosti náhradní síly, kterou konstrukci svodidla zatěžíme výrazným způsobem ovlivňuje použitelnost získaných výsledků. Proto je důležité stanovit reálný poměr, kterým se rozděluje velikost absorbované energie mezi svodidlo a vozidlo a současně zpřesnit vztah pro stanovení množství svodidlem absorbované energie.

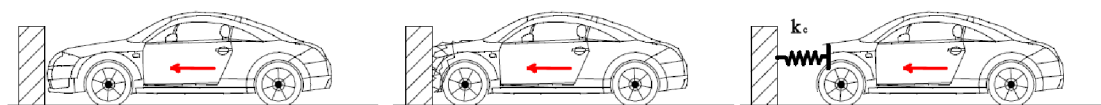
### 6.2.4 ZPŘESNĚNÍ VÝPOČTU NÁHRADNÍ SÍLY

Odezva svodidla i vozidla závisí na množství energie, které musí být při nárazu absorbováno. Poměr deformací svodidla a vozidla závisí na poměru jejich tuhostí. Tomu pak také odpovídá i poměr množství absorbované energie a v případě statického přístupu k řešení i velikost náhradní síly  $F$ .

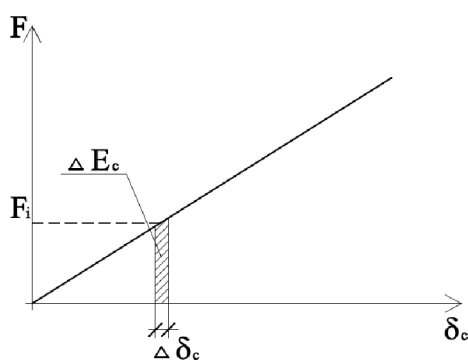
## 6.2.5 TUHOST VOZIDLA

Deformační zónu vozidla tvoří jeho přední část. Prvky, které vstupují do kontaktu nejdříve (nárazník, kapota, ...) nevykazují takovou tuhost jako části, které je následují. Je samozřejmé, že se tyto charakteristiky pro různé typy a třídy vozidel velmi liší a je poměrně složité je zobecnit. S vědomím velmi hrubé idealizace předpokládáme jen konstantní tuhost deformační zóny vozidla tak, jak vyplývá z obr. 6.2. Deformace je lineárně závislá na velikosti síly, která ji způsobuje.

$$F = k_c \cdot \delta_c$$



Obr. 6.1. Schéma nahrazení deformační zóny vozidla pružinou.



Obr. 6.2 Závislost mezi působící silou a deformací vozidla

Energie spotřebovaná při deformaci vozidla je dána vztahem:

$$E_c = \int F d\delta_c \quad (6.2)$$

$$E_c = \int k_c \cdot \delta_c d\delta_c.$$

Pro uvedený případ lineární závislosti ( $F = k_c \cdot \delta_c$ ) je energie absorbovaná deformací vozidla dána vztahem:

$$E_c = \frac{1}{2}(k_c \delta_c^2)$$

po úpravě je vztah pro tuhost deformační zóny vozidla následující:

$$k_c = 2E_c / \delta_c^2$$

Konkrétní hodnotu tuhosti vozidla  $k_c$  získáme z dostupných výsledků crash testů vozů různých tříd.

## 6.2.6 VÝPOČET ENERGIE ABSORBOVANÉ SYSTÉMEM VOZIDLO SVODIDLO

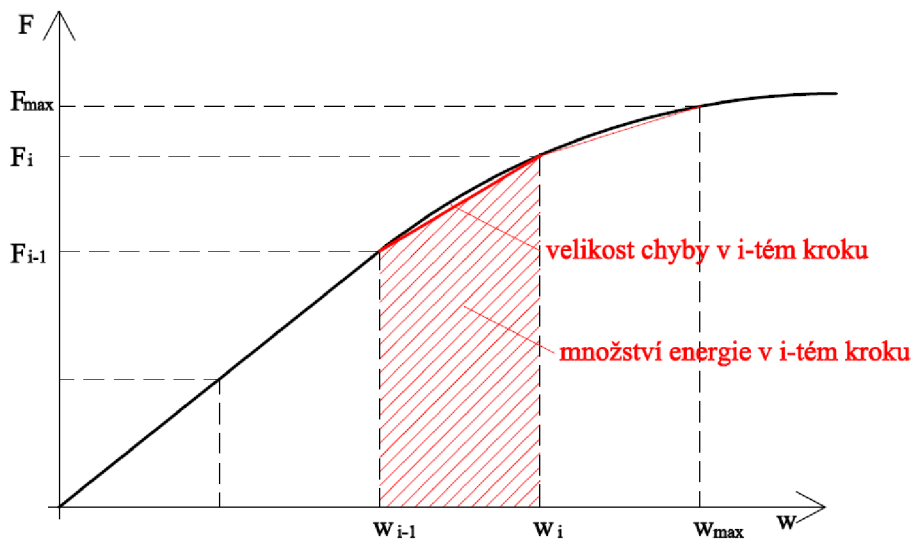
Nelineární chování zádržných systémů v důsledku nárazu vozidla je zcela obvyklé. Ve výpočtu je nutné nelinearitu akceptovat a zajistit, aby nebyla zdrojem chyb nad technicky přípustnou mez.

Vyčíslení množství energie absorbované konstrukcí provedeme pomocí přírůstků zatížení. Jak už bylo uvedeno, vztah mezi velikostí náhradní síly a deformací je nelineární. Je znázorněn na obrázku 6.3.

Množství energie absorbované deformací konstrukce  $i$ -tého přírůstku zatížení je dáno vztahem:

$$E_{di} = (F_i + F_{i-1}) * (w_i - w_{i-1}) / 2 \quad (6.3)$$

V případě nelineárního chování konstrukce závisí velikost chyby na míře nelinearity a na zatěžovacím „kroku“. V grafickém vyjádření na obrázku 6.3 je velikost chyby dána plochou vymezenou mezi úsečkou a křivkou spojující dva následující body grafu.



Obr. 6.3 Závislost mezi náhradní silou a deformací svodidla, vyčíslení absorbované energie

## 6.2.7 OBECNÝ ALGORITMUS POSOUZENÍ SVODIDLA

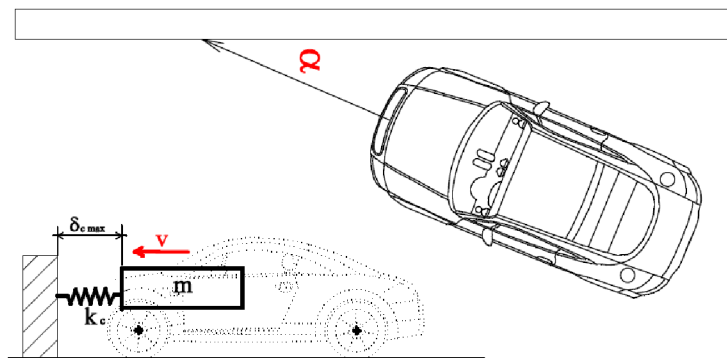
1. Na základě daných parametrů návrhové situace určíme referenční vozidlo jeho parametry. Vyčíslíme množství kinetické energie, které se uplatní při nárazu

### Parametry vozidla:

hmotnost  $m$  kg



rychlost	$v$	m/s
úhel nárazu	$\alpha$	stupně
tuhost deformační zóny	$k_c$	kN/m



Obr. 6.4 Parametry vozidla

Vypočteme kinetickou energii

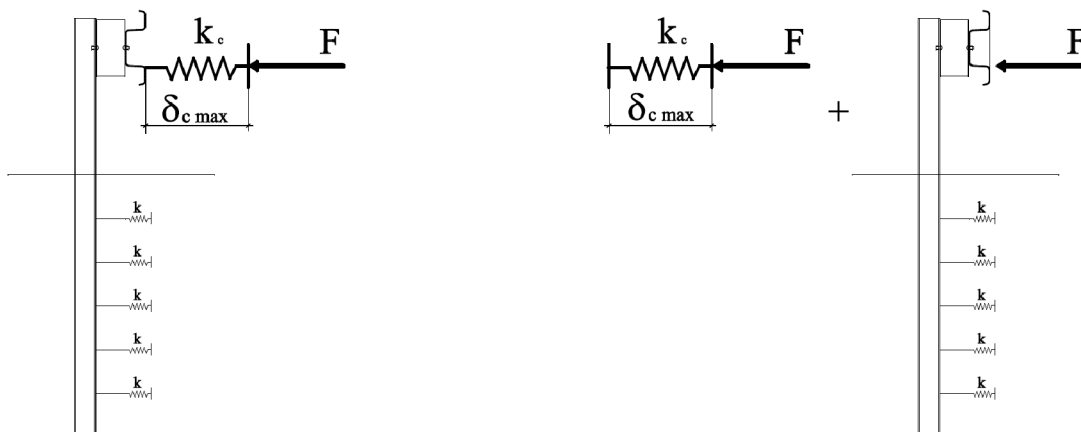
v okamžiku nárazu (resp. její kolmou složku)  $E_k$  kNm.

2. Vytvoříme model svodidla včetně podepření, vzájemných vazeb a dalších parametrů. V obrázku 6.5 je sloupek uložen v zemině. Podepření je modelováno pomocí soustavy pružin. Odvození tuhosti pružiny  $k$  je uvedeno v části 7.2.1.

3. Model konstrukce doplníme o pružinu nahrazující deformační zónu vozidla o tuhosti  $k_c$  a délce deformační zóny vozidla  $\delta_{c\ max}$ . V jednotlivých zatěžovacích krocích vyčíslujeme energie absorbovanou deformací soustavy svodidlo-vozdlo (obr. 6.5 vlevo) nebo energie absorbované deformací vozidla a deformací svodidla vyčíslíme odděleně (obr. 6.5 vpravo).

$$E = F * (\delta_c + \delta_b)$$

$$E_c = F * (\delta_c) + E_b = F * (\delta_b)$$



Obr. 6.5 Model svodidla včetně podepření a deformační zóny vozidla

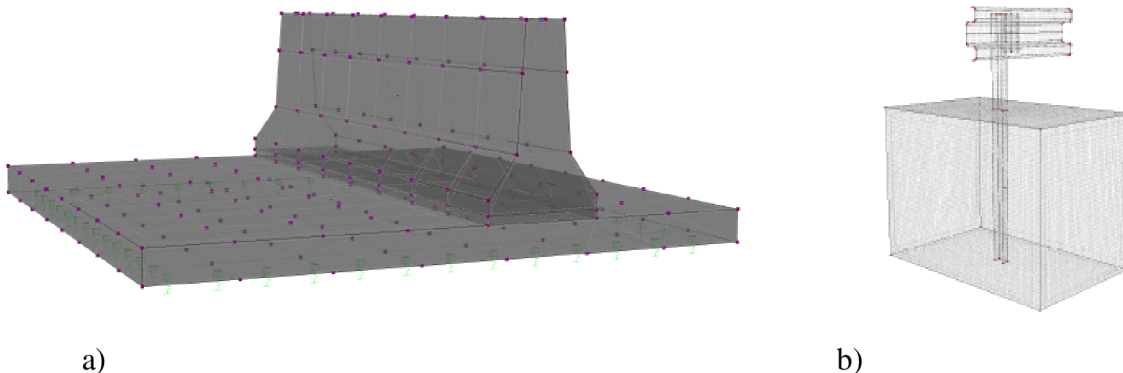
4. Konstrukci v postupných krocích zatěžujeme „náhradní silou“  $F$ , v každém kroku zjišťujeme velikost deformace konstrukce i vozidla a přírůstek absorbované energie. Cyklus opakujeme vždy s vyšší hodnotou zatížení až do doby, kdy je množství energie absorbované deformací rovno kinetické energii vozidla v okamžiku nárazu  $E_k = E_d$ .

## 7. POZNÁMKY K TVORBĚ MODELU SVODIDLA

Základem vytvoření vhodného modelu je nalezení odpovídajícího stupně idealizace konstrukce. Model musí dostatečně přesně „popisovat“ tvar konstrukce, fyzikální charakteristiky materiálů, ze které je vytvořena, a odpovídající způsob podepření. Současně je vhodné využívat možností zjednodušení modelu jak z hlediska jeho geometrie, tak z hlediska popisu fyzikálních charakteristik. Samozřejmě jen v míře, která nepředstavuje nebezpečí zhoršení kvality a použitelnosti výstupů numerického řešení. Dále musíme vzít v úvahu možnosti programu, pro který model vytváříme, jak z hlediska jeho kapacity, tak z hlediska způsobu a metody řešení. Program musí být schopen požadovaný případ vyřešit a ve výstupech poskytnout použitelné výsledky.

### 7.1 GEOMETRIE KONSTRUKCE

Konstrukci je možné ve většině případů modelovat v jejím reálném tvaru s využitím prutových, plošných i prostorových prvků.



a) b)  
Obr. 7.1 Ilustrace numerických modelů: a) betonové svodidlo s podkladní plochou, b) svodnicové svodidlo – sloupek v zemině

## 7.2 PODEPŘENÍ

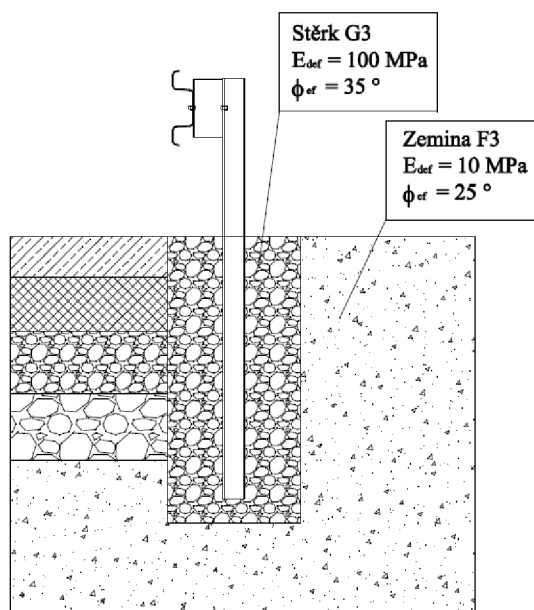
### 7.2.1 MODEL SVODNICOVÉHO SVODIDLA ULOŽENÉHO V ZEMINĚ

Chování svodidla je značně ovlivněno způsobem jeho podepření. Poddajností kotevních prvků či vlastnostmi zemin ve kterých jsou sloupky vetknuty.

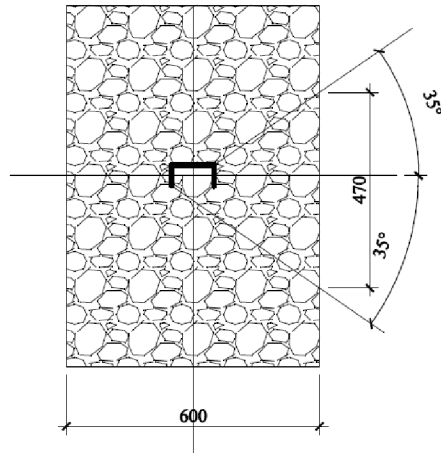
Pružné vetknutí sloupku v zemině je možné interpretovat pomocí soustavy pružných vazeb. Stanovení tuhosti pružin simulujících odpor zeminy proti naklonění sloupku provedeme následujícím způsobem:

Vydeme z charakteristik zemin obklopujících sloupek a jejich vzájemného uspořádání. Příklad je uveden na obrázcích 7.2 a 7.3.

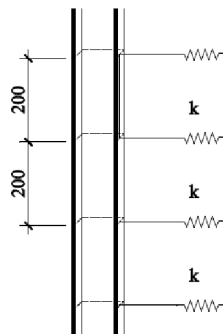
Modul deformace štěrku zpevněné krajnice je řádově vyšší než modul deformace okolní zeminy. Předpokládejme, že se zatížení přenášené sloupkem ve štěrku roznáší do styčné plochy mezi štěrkem a zeminou pod úhlem vnitřního tření štěrku (35 stupňů). V případě uplatnění geometrie uspořádání vyobrazené na uvedených obrázcích to bude do svislého pásu o šířce cca 0,5 m. Předpokládáme-li, že se v horizontálním směru rozdělí zatížení na styku štěrku a zeminy rovnoměrně a že se zemina chová v souladu s Winklerovým modelem, můžeme odpor zeminy nahradit pružnými vazbami, jejichž tuhost odvodíme z modulu deformace zeminy a velikosti plochy, kterou vazba reprezentuje tak jak je znázorněno na obrázku 7.4 a popsáno v dalším textu.



Obr. 7.2 Typický řez krajnicí vozovky – sloupek v zemině.



Obr. 7.3 Půdorysné schéma uložení sloupku



Obr. 7.4 Pružné podpory reprezentující odpor zeminy

Tuhost jedné pružiny je dána vztahem:

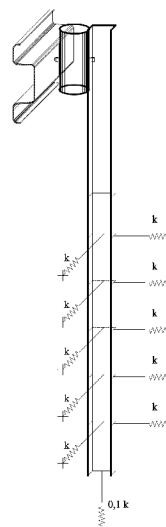
$$k = b \cdot h \cdot E_{def}$$

kde  $b$  je osová vzdálenost pružin ve vertikálním směru (v našem případě 0,2m);

$h$  šířka roznosu ve styku šterk zemina (v našem případě 0,5m);

$E_{def}$  modul deformace zeminy ( v našem případě 10 Mpa);

Pružiny aplikujeme ve dvou vzájemně kolmých směrech.



Obr. 7.5 Sloupek uložený v zemině – model podepření pomocí pružin

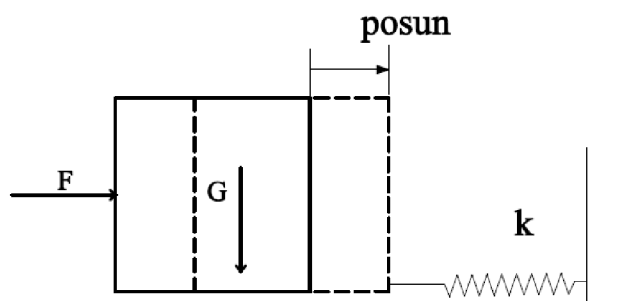
## 7.2.2 MODEL KONSTRUKCE VOLNĚ ULOŽENÉ NA PODLOŽCE

### Konstrukce volně uložené na podložce – tření mezi prvkem a podložkou

Zadržný systém může tvořit například i betonový blok volně uložený na podkladu. Při sestavování modelu konstrukce a jejího podepření nesmíme zapomínat na charakter zatížení. Těleso (vozidlo) o hmotnosti  $m$  se pohybovalo rychlostí  $v$  a narazilo do stojící překážky. Překážka se odsouvá. V okamžiku, kdy je energie pohlcená odsunutím překážky rovna kinetické energii vozidla před nárazem, dojde k zastavení vozidla. Součástí systému, který „pohlcuje“ energii vozidla je pohyb bariéry po podložce. Tomuto pohybu brání tření. Množství energie spotřebované třením je dáno velikostí síly bránící pohybu bariéry po podložce a posunu ve směru uvažované síly.

Při tvorbě modelu je nutné vycházet z fyzikální podstaty děje, který chceme modelovat a řešit. V případě deformované konstrukce jsme hledali statickou sílu takové velikosti, jejíž deformační účinky byly srovnatelné s účinky energie nárazu vozidla. Kinetická energie vozidla v okamžiku nárazu byla stejná jako práce síly na průhybu konstrukce.

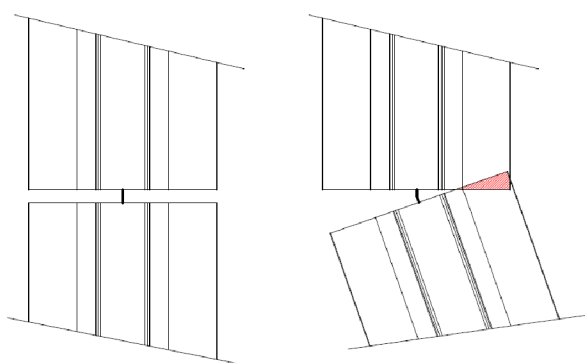
V úvaze o odsouvání překážky musíme postupovat odlišně. Jestliže pro jednoduchost uvažujeme, že těleso nemá žádné jiné vazby než tření o podložku, bude potom energie nutná k jeho posunutí o jednotku délky rovna velikosti odporu třecí síly  $T$ . Tření mezi tělesem a podložkou musíme modelovat tak, aby byla splněna energetická bilance. Nabízí se jednoduchý model, kdy zatížení tělesa na podložce je reprezentováno energií nárazu a odpor tření je modelován třením spotřebovanou energií. Jakmile se vyrovná velikost energie nárazu s množstvím energie spotřebované třením, pohyb tělesa se zastaví. Statické schéma je vyobrazeno na obrázku 7.6.



Obr. 7.6 Modelování tření pomocí „pružné vazby“

### 7.2.3 ZABEZPEČENÍ VZÁJEMNÉHO POSTAVENÍ DÍLCŮ (KONTAKT)

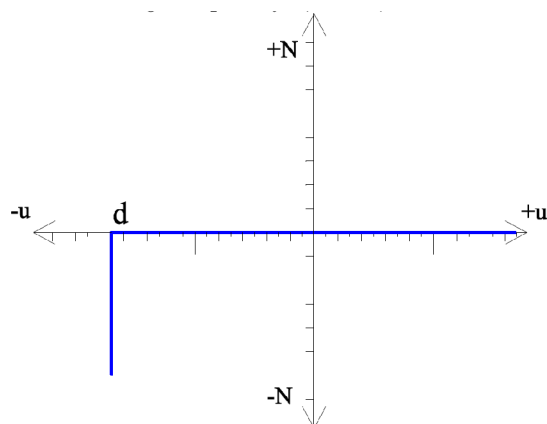
Bariéru složenou z betonových dílců modelujeme pomocí 3D objektů, kde respektujeme jejich geometrii. Propojení mezi jednotlivými díly většinou zajišťuje kovový prvek. Ten lze modelovat vertikálním liniovým kloubem, který umožňuje vzájemné pootočení svodidel kolem vertikální osy v místě jejich styku. Úhel, který svírají osy svodidel po odsunutí způsobeném atakem vozidla může nabývat hodnot, kdy dojde ke kontaktu mezi čely sousedních prvků (obr. 7.7). Pro tyto případy musíme zajistit, aby model konstrukce respektoval skutečnost, že mezi jednotlivými prvky nemůže dojít k průniku.



Obr. 7.7 a) postavení bloků před zatížením, b) průnik jejich částí po natočení

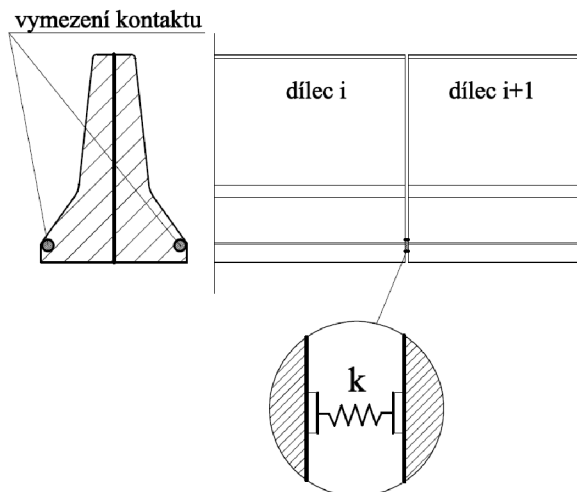
#### **Kontaktní úloha – změna podmínek podepření nebo vzájemných vazeb mezi prvky**

Kontakt můžeme modelovat například pomocí „pružiny“ s nelineárním chováním. Při stlačení do hodnoty odpovídající vzdálenosti  $d$  neklade žádný odpor, po dosažení uvedené hodnoty se již dále nedeformuje a chová se jako tuhá podpora. Pracovní diagram pružiny je na obrázku 7.8.



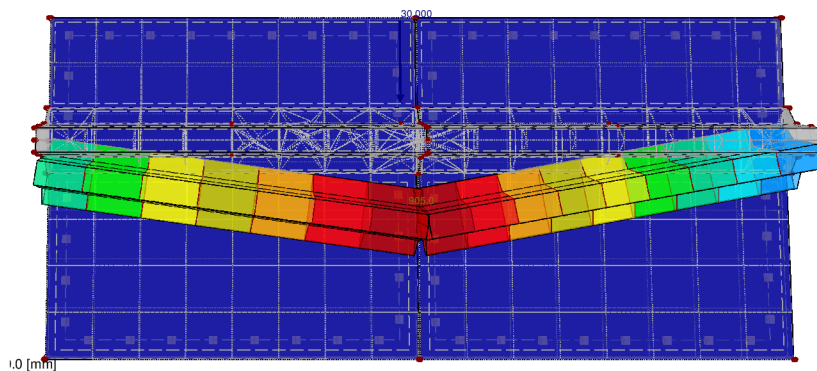
Obr. 7.8 Pracovní diagram „nelineární pružiny“

Nelineární pružinu výše popsaných charakteristik použijeme k zajištění vzájemného nepronikání jednotlivých dílců, které tvoří zádržný systém v celé jeho délce. Mezi krajní uzly sousedních dílců ohrožených kontaktem umístíme „pružinu“ s definovaným prokluzem a omezeným rozsahem deformace, obrázek 7.9.

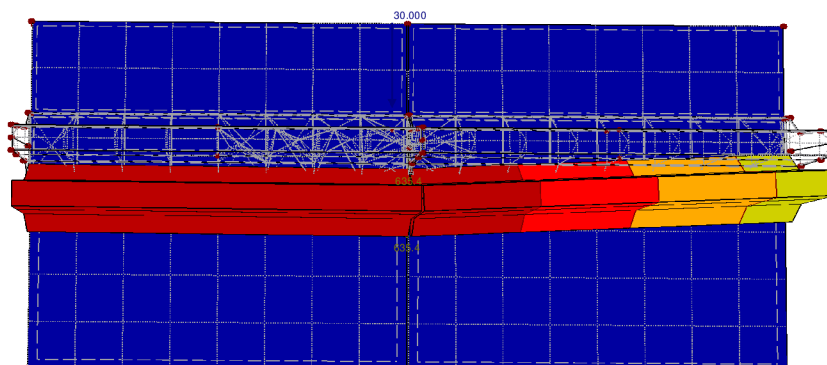


Obr. 7.9 Vymezení kontaktu mezi dílci svodidla

Jak se změna modelu projeví ve vzájemném postavení prvku při odsouvání bariéry je zřejmé ze srovnání na obrázku 7.10. Zatížení je v obou případech totožné ve všech parametrech.



a) vzájemná poloha prvků bez zajištění proti vzájemnému průniku



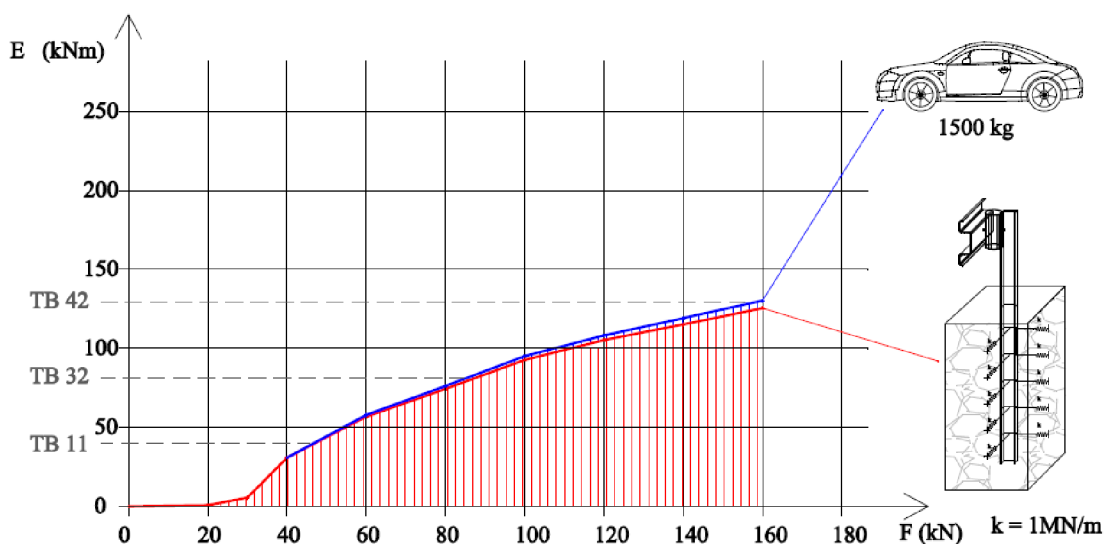
b) vzájemná poloha prvků se zajištěním proti průniku „nelineární pružinou“

Obr. 7.10 Srovnání polohy prvků při modelování kontaktu

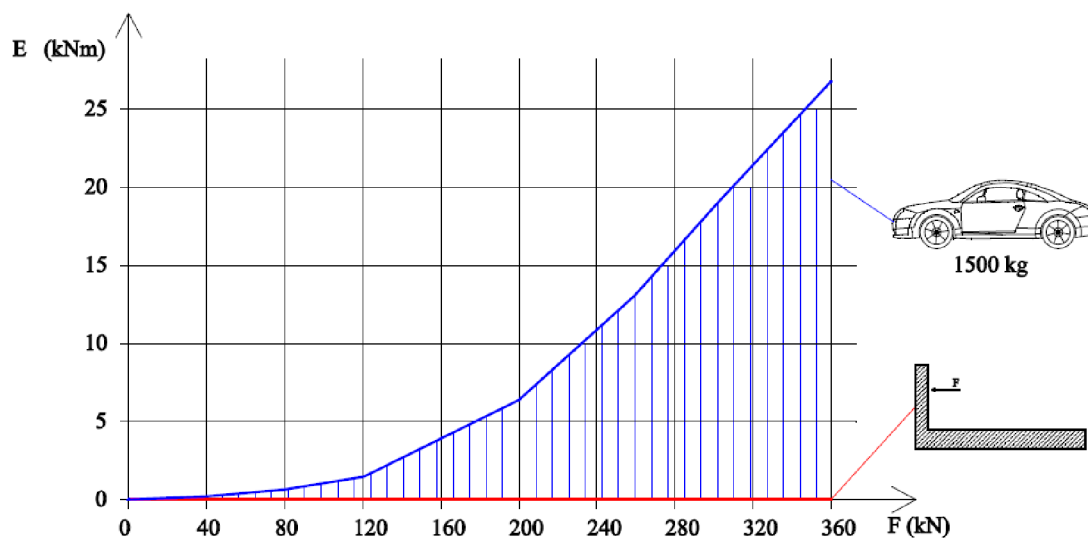
## 8. ZHODNOCENÍ VÝLEDKŮ ŘEŠENÝCH PŘÍKLADŮ, ZOBECNĚNÍ, ZÁVĚRY

### 8.1 DEFORMAČNÍ ZÓNA VOZIDLA A JEJÍ TUHOST

Význam přesného zjištění parametrů deformační zóny vozidla narůstá s tuhostí bariéry do které vozidlo naráží. Při řešení poddajných bariér je podíl energie absorbované deformací vozidla tak malý, že jeho případné zanedbání kvalitu výsledků téměř neovlivní. U tuhých konstrukcí představuje významný parametr, který může být zdrojem chyb v řádu stovek procent. To demonstrují grafy na obrázcích 8.1, 8.2 a 8.3. Pořadnice absorbované energie náležející svodidlu jsou červené, náležející vozidlu modré.

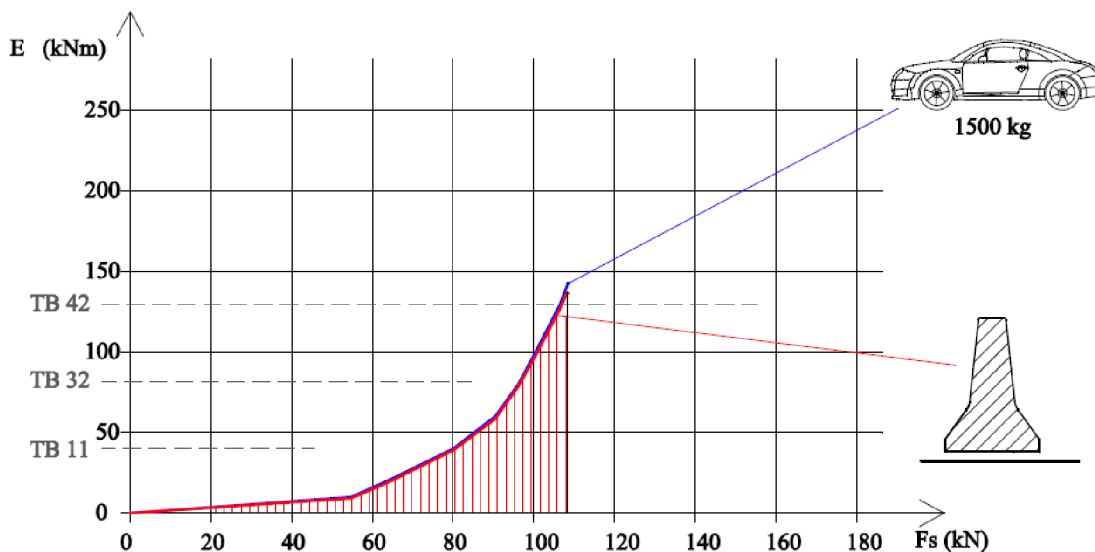


Obr. 8.1 Závislost mezi náhradní silou a absorbovanou energií – svodnicové svodidlo



Obr. 8.2 Závislost mezi náhradní silou a absorbovanou energií – betonová stěna

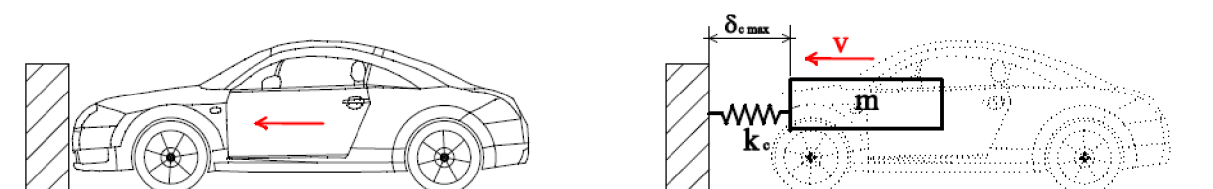




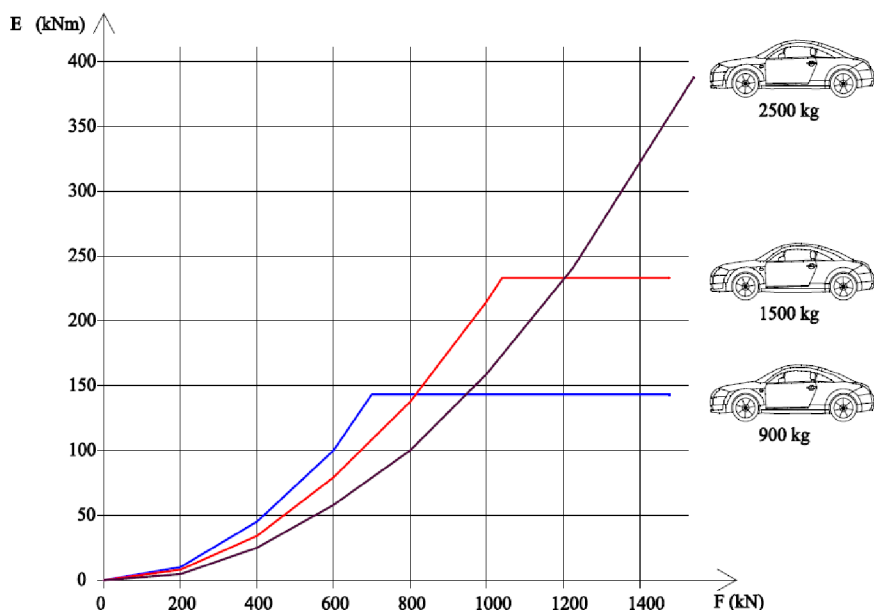
Obr. 8.3 Závislost mezi střední hodnotou náhradní síly a absorbovanou energií – betonové svodidlo volně uložené na podložce

Je tedy vhodné, v případě tuhých bariér dokonce nutné, do výpočtu zavádět reálné hodnoty tuhosti deformační zóny vozidel. Nejsou-li k dispozici přesnější údaje, provedeme alespoň odborný odhad na základě dostupných výsledků crash testu.

Deformační zóna vozidla, tj. přední část vozu, je jediná část, u které ve výpočtu předpokládáme podíl na absorbování energie nárazu. Konstrukce vozu je navržena tak, aby byla chráněna posádka v kabině. Pohybující se hmota vozu tlačí deformační zónu na překážku. Po dosažení mezní deformace přední části vozidla  $\delta_{c \max}$  vozidlo již další energii neabsorbuje. Schéma modelu deformační zóny vozidla je na obrázku 8.4. Závislost energie absorbované svodidlem na velikosti náhradní síly je pro vozidla o hmotnosti 900 kg, 1500 kg a 2500 kg uvedena na obrázcích 8.5.



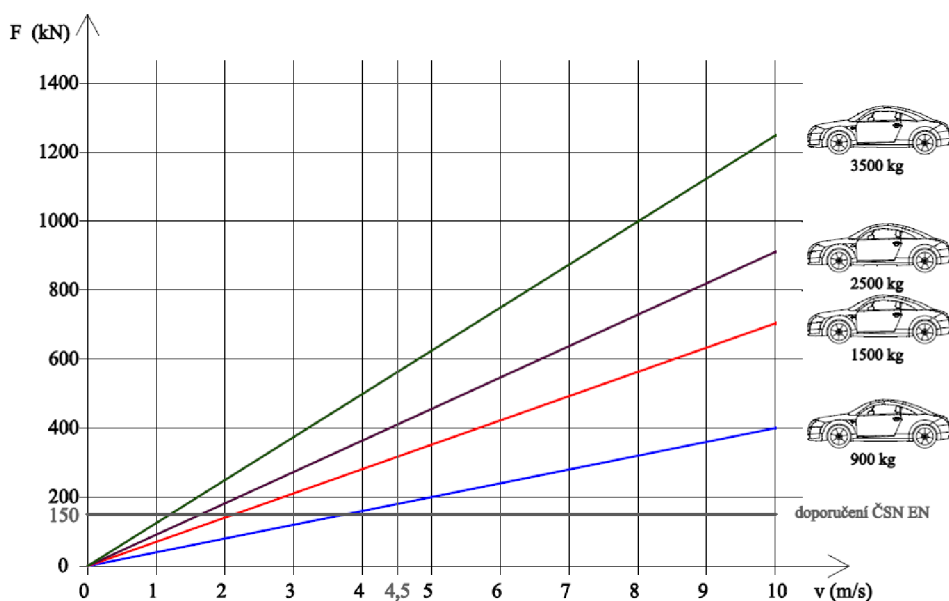
Obr. 8.4 Model deformační zóny vozidla



Obr. 8.5 Energie absorbovaná vozidlem v závislosti na náhradní síle

### 8.1.1 VLIV TUHOSTI DEFORMAČNÍ ZÓNY VOZIDLA NA VELIKOST NÁHRADNÍ SÍLY U TUHÝCH SVODIDEL

Velikost náhradní síly  $F$  závisí na energii nárazu a velikosti deformace svodidla a vozidla. S narůstající tuhostí vozidla nebo svodidla nutně narůstá i velikost náhradní síly. ČSN EN 1991-1-1 v případě tuhých svodidel doporučuje charakteristickou hodnotu síly  $F$  odpovídajícím vozidlům do hmotnosti 2500 kg uvažovat hodnotou 150 kN [9]. Jak je zřejmé z grafu na obrázku 8.6, je doporučení normy ve značném rozporu s možnou realitou. Velikost náhradní

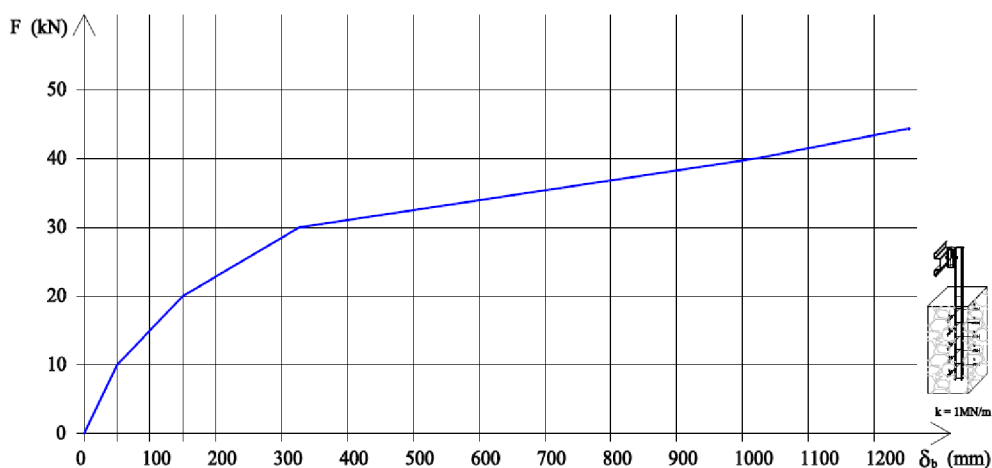


Obr. 8.6 Závislost náhradní síly na rychlosti a typu vozidla

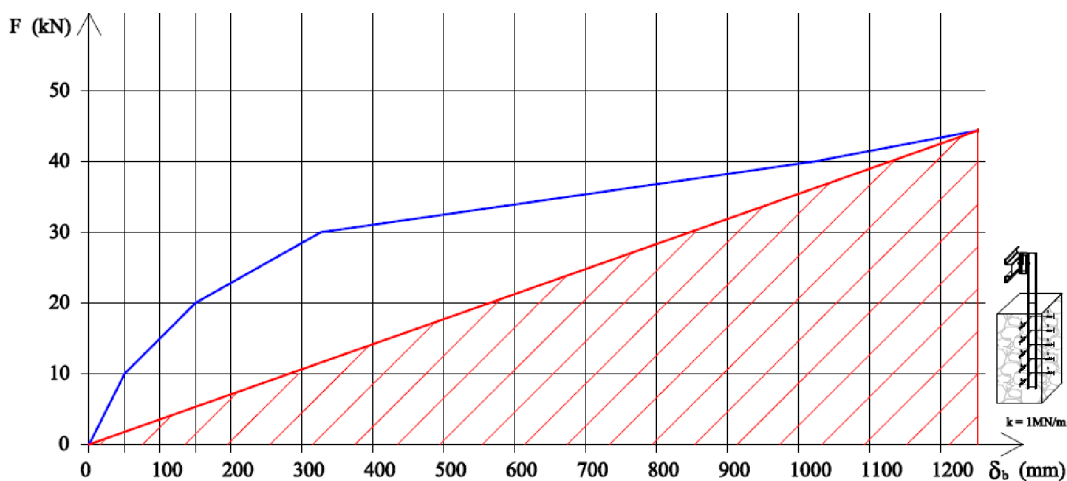
síly je podhodnocena i pro normou doporučenou hodnotu rychlosti ( $v = 4,5 \text{ m/s}$ ). Navíc na některých parkovištích je dovolená rychlost  $20 \text{ km/hod}$  ( $5,55 \text{ m/s}$ ). Jestliže uvážíme zrychlení neovládaného vozidla na nájezdové rampě, může být rychlost vozidla na patě rampy vyšší než  $10 \text{ m/s}$ . Odpovídající hodnota náhradní síly může nabývat podstatně vyšších hodnot.

## 8.2 ZPŮSOB VÝPOČTU ABSORBOVANÉ ENERGIE

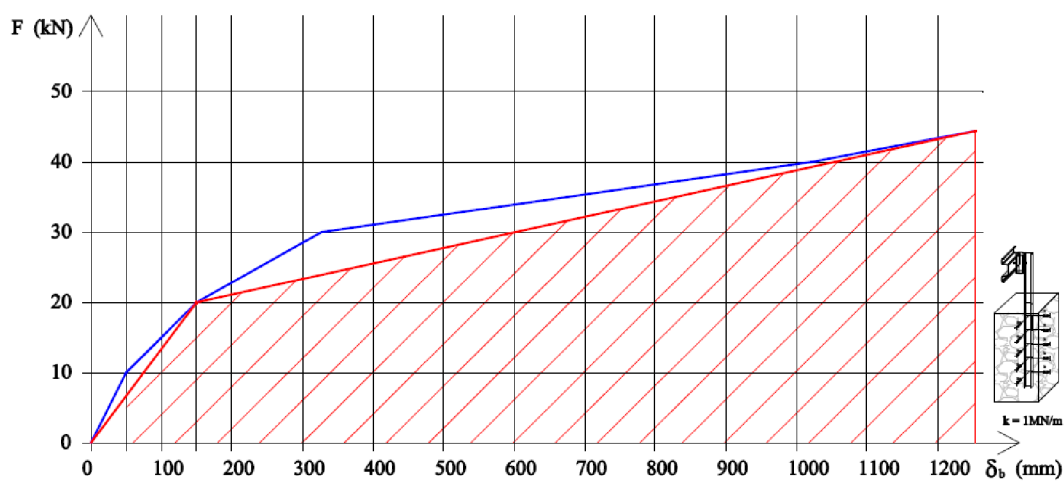
Čím větší je nelinearita vztahu mezi zatížením a deformací svodidla tím vyšší je nutnost řešit úlohu postupně po zatěžovacích krocích. Následující obrázky 8.7 až 8.10 ukazují srovnání „kvality“ výpočtu energie absorbované v deformaci soustavy v závislosti na počtu zatěžovacích kroků. Červeně vyšrafovaná plocha v grafu představuje množství absorbované energie zjištěné v jednotlivých výpočtech. Už rozložení výpočtu do dvou zatěžovacích kroků (obr.8.9) poskytuje mnohem výstižnější a použitelnější výsledky než výpočet v jednom kroku. Výpočet pomocí čtyř a více zatěžovacích kroků poskytuje výsledky se zanedbatelnou chybou. Pro srovnání je ještě uveden obrázek 8.11 se stanovením množství absorbované energie s využitím vztahu uvedeného v ČSN EN 1991-1-1 příloha B (svodidla a zábradlí v garážích) [9].



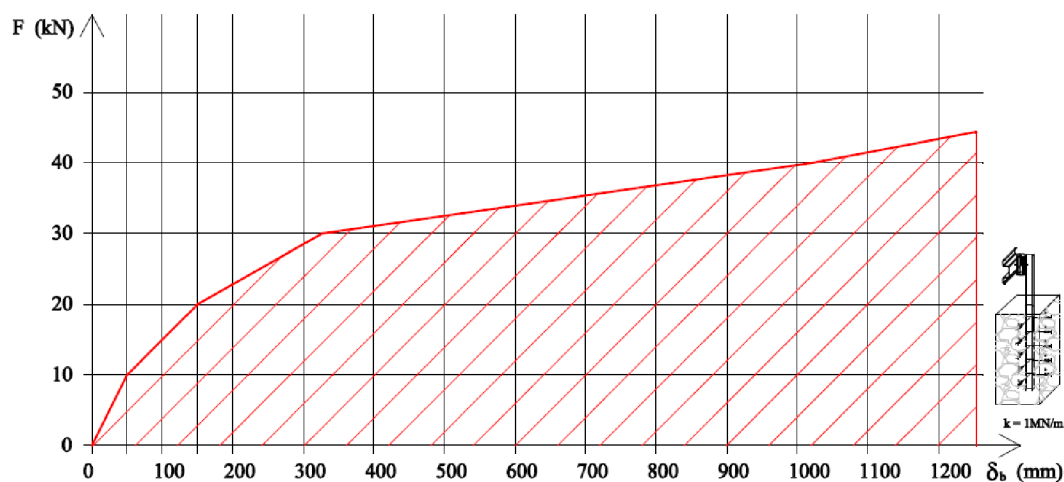
Obr. 8.7 Graf závislosti deformace svodidla na velikosti náhradní síly



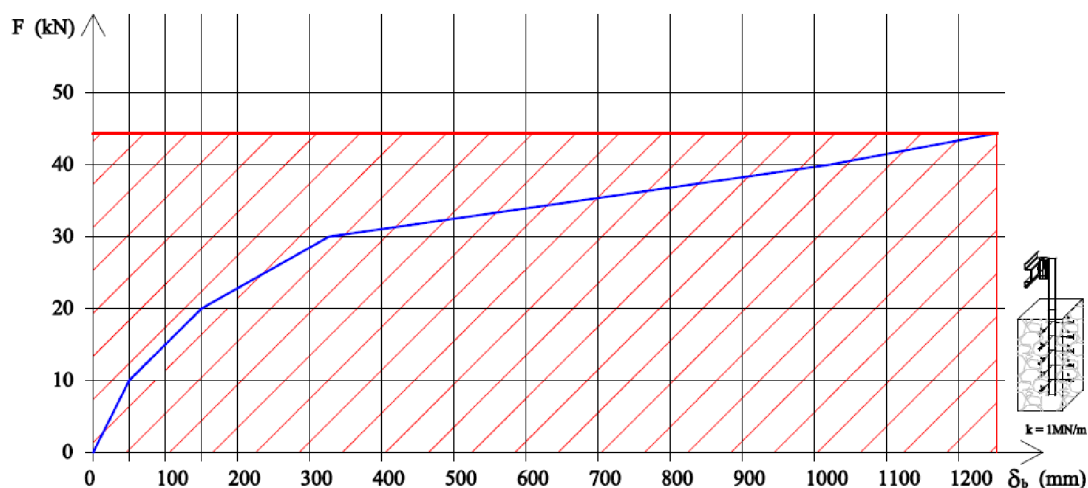
Obr. 8.8 Absorbované energie  $E = 28,86 \text{ kNm}$  (výpočet v jednom kroku)



Obr. 8.9 Absorbovaná energie  $E = 39,08 \text{ kNm}$  (výpočet ve dvou krocích)



Obr. 8.10 Absorbovaná energie  $E = 40,89 \text{ kNm}$  (výpočet ve čtyřech krocích)



Obr. 8.11 Absorbovaná energie  $E = 57,72 \text{ kNm}$  (dle vztahu uvedeného v ČSN EN 1991-1-1)

## 9. ZÁVĚR

Ve srovnání s TP 101 i ČSN EN 1991-1-1, kde se také k řešení užívá prostředků statiky, nabízí zde prezentovaná metodika mnohem jednodušší a ucelený systém přípravy a zadávání vstupů, kde není nutné předem rozlišovat, jaký typ svodidla bude posuzován.

Výpočtu předchází analýza návrhové situace, ve které je nutné zohlednit všechny aspekty, které mohou ovlivnit řešení. Typ vozidla, hmotnost, rychlost, tuhost a délku deformační zóny, výšku nárazníku. Postavení vozidla vzhledem ke svodidlu, úhel nárazu. Typ svodidla, způsob jeho podepření, použitý materiál, vzájemné vazby (kontakt). Stanoví se složka kinetické energie vozidla působící kolmo k překážce. Výpočet je realizován po zatěžovacích krocích, což výrazně omezilo vznik chyb, jejichž zdrojem bylo nelineární chování konstrukce. V každém kroku se zjistí přírůstek energie absorbovaný deformací svodidla a vozidla. Výpočet je ukončen v okamžiku, kdy je energie absorbovaná deformací soustavy rovna kinetické energii vozidla v okamžiku nárazu.

Navrhovaná metodika zohledňuje deformaci vozidel, což se projevuje přesnějším „převodem“ energie nárazu do náhradní síly. V případě tuhých překážek má zavedení deformace vozidla do výpočtu nezanedbatelný význam. Předložený algoritmus je nadále otevřený dalším modifikacím, umožňuje další zpřesňování, z hlediska přesnějších interpretací konstrukcí, materiálu, nelinearit i podepření. Není vázán na konkrétní typ software. K řešení je možné použít běžně dostupnou výpočetní techniku a programové vybavení, kterými disponuje téměř každý statik.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN 1317-1 Silniční záchytné systémy - Část 1: Terminologie a obecná kritéria pro zkušební metody. Praha: ČNI, 1999.
- [2] ČSN EN 1317-2 Silniční záchytné systémy - Část 2: Svodidla - Funkční třídy, kritéria přijatelnosti nárazových zkoušek a zkušební metody. Praha: ČNI, 2010.
- [3] ČSN EN 1317-5 Silniční záchytné systémy - Část 5: Požadavky na výrobky a posuzování shody záchytných systémů pro vozidla. Praha: ČNI, 2008.
- [4] TP 167/2008 Ocelové svodidlo NH4. Ministerstvo dopravy ČR, 2008.
- [5] TP 139 Betonové svodidlo. Ministerstvo dopravy a spojů ČR, 2000.
- [6] TP 101 Výpočet svodidel. Ministerstvo dopravy a spojů České republiky, 1997.
- [7] TP 114 Svodidla na pozemních komunikacích. Ministerstvo dopravy České republiky, 2005.
- [8] BREPTA R, PUST, L., TUREK, F. Mechanické kmitání. Praha: SOBOTÁLES, 1994.
- [9] ČSN EN 1991-1-1 Zatížení konstrukcí. Praha: ČNI, 2004.
- [10] VESENJAK M, BOROVIŠEK M, REN Z. Computational simulations of road safety barriers using LS-DYNA. LS-DYNA Anwenderforum. Frankenthal: University of Maribor, 2007.
- [11] FERDOUS MR, ABU-ODEH A, BLIGH RP, JONES HL, SHEIKH NM. Performance limit analysis for common roadside and median barriers using LS-DYNA. International Journal of Crashworthiness 2011;16:691.
- [12] BONING G, CANTISANI G, LOPRENCIPE G. Development of a HGV FEM for Road Safety Analysis. 8th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. Johannesburg, South Africa, 2004.
- [13] BOROVKOV A, KLYAVIN O, MICHAILOV A. Finite Element Modeling and Analysis of Crash Safe Composite Lighting Columns, Contact-Impact Problem. 9th International LS-DYNA Users Conference. Dearborn, Michigan USA, 2006.
- [14] NELSON EA, HONG L. Curved Barrier Impact of a NASCAR Series Stock Car. In: Engineering A, editor. 8th International LS-DYNA Users Conference. Hyatt Regency Dearborn, 2004.
- [15] CONSOLAZIO GR, CHUNG JH, GURLEY KR. Impact simulation and full scale crash testing of a low profile concrete work zone barrier. Computers and Structures 2003;81:1359.

- [16] REN Z, VESENJAK M. Computational and experimental crash analysis of the road safety barrier. *Engineering Failure Analysis* 2005;12:963.
- [17] BOROVIŇSEK M, VESENJAK M, REN Z. Improving the crashworthiness of reinforced wooden road safety barrier using simulations of pre-stressed bolt connections with failure. *Engineering Failure Analysis* 2013;in press.
- [18] HRADIL P, SALAJKA, V., KALA, J. Odezva konstrukce mobilní protihlukové stěny na náraz vozidla. 7th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings. Bratislava VUT FAST, 2009.
- [19] PIRNER M, FISCHER, O. , editor *Dynamika ve stavební praxi*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2010.
- [20] NĚMEC I, et al. *Finite element analysis of structures*. Aachen: Shaker Verlag, 2010.
- [21] BUCALEM ML, BATHE, K. J. *The Mechanics of Solid and Structures - Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution*. Heidelberg: Springer, 2011.
- [22] BELYTSCHKO T, LIU, W. K., MORAN, B. *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. West Sussex: John Wiley and Sons Ltd., 2001.

## PŘEHLED PUBLIKOVANÝCH PRACÍ

### *Článek v recenzovaném časopise*

1. KOUDELKA, I. Havárie střechy rodinného domu a její příčiny. Časopis stavebnictví 01/2011, EXPO DATA spol. s r.o., Výstaviště 1, 648 03 Brno, 2011, ISSN 1802-2030

### *Sborník konference/odborné akce*

2. BRAŤKA, M., MRÓZEK, M., FRIEDL, M., KOUDELKA, I. Integrace praktických experimentů do výuky stavební dynamiky. Sborník/CD-ROM *JUNIORSTAV 2010*, 12. Odborná konference doktorského studia, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Brno, 2010, s. 231, ISBN 978-80-214-4042-5

### *Inženýrské práce*

3. KOUDELKA, I. Založení konstrukce skladu Bučovice, JKZ Bučovice, a.s., Bučovice (z.č. 14 0005), 2014
4. KOUDELKA, I. Penzion Laa Natura Rakousko – statické posouzení objektu, TRIGNIS, Brno (z.č. 14 014), 2014
5. KOUDELKA, I. Polyfunkční dům Podolská ulice, Brno-Líšeň – statický výpočet zastřešení, ing. arch. Pavel Strážnický, Letovice (z.č. 14 015), 2014
6. KOUDELKA, I. Rekonstrukce prodejny Tiger, Masarykova ul. Brno – statický výpočet, Tiger Stores, Brno (z.č. 14 025), 2014
7. KOUDELKA, I. Prodejna automobilů HYUNDAI, Hodonín, VISTA car, spol s r.o., Hodonín (z.č. 14 026), 2014



8. KOUDELKA, I. Přístavba Expediční haly Sloup 74 – statický výpočet založení, Karnet a.s., Brno (z.č. 14 027), 2014
9. KOUDELKA, I. Nástavba Orlovny Ivančice – statický výpočet, ing. Roman Chvátal, Moravský Krumlov (z.č. 13 006), 2013
10. KOUDELKA, I. Olympia centrum Modřice, rekonstrukce Intacto and Bowling (KAJOT) – statický výpočet, Kampara s.r.o., Bučovice (z.č. 13 009), 2013
11. KOUDELKA, I. Nástroje CZ s.r.o., přístavba výrobní haly ve Ždánicích- statický výpočet, Kampara s.r.o., Bučovice (z.č. 13 022), 2013
12. KOUDELKA, I. Vinařství Plešinger, přístavba skladu vína – statický výpočet, ing. Miroslav Čech, Kyjov (z.č. 13 030), 2013
13. KOUDELKA, I. Dostavba autoservisu FORD RAŠINO Brno – statický výpočet, Gebas atelier architects, Hradec Králové (z.č. 13 037), 2013
14. KOUDELKA, I. Novostavba 7 b.j. Arkáda Bučovice- statický výpočet, Sarda MedTech. s.r.o., Slavkov u Brna (z.č. 13 050), 2013
15. KOUDELKA, I. Spodní stavba pod věžové zásobníky – statický výpočet, EDP a.s., Rousínov (z.č. 13 052), 2013
16. KOUDELKA, I. Stavební úpravy objektu smuteční síně v Kyjově – statický výpočet, ing. Miloslav Čech, Kyjov (z.č. 13 055), 2013
17. KOUDELKA, I. Kaple sv. Jana Nepomuckého Rešice, posouzení příčin poruch ve zdivu, Římskokatolická farnost Horní Dubňany, Tulešice (z.č. 13 061), 2013
18. KOUDELKA, I. Adaptace zemědělského objektu Vyškov – statický výpočet nosných konstrukcí objektu a posouzení vlivu přetížení na stávající konstrukce, Pavel Štěpán, Vyškov (z.č. 12 001), 2012

19. KOUDELKA, I. Přístavba průmyslových hal Rousínov, – statický výpočet nosných konstrukcí, EDP Komořany (z.č. 12 007), 2012.
20. KOUDELKA, I. Podnikatelský inkubátor v Brně Zábrdovicích, – statický výpočet nosných konstrukcí, TECH-ARCHITECTS s.r.o. (z.č. 12 008), 2012.
21. KOUDELKA, I. Parkovací dům Kyjov – statický výpočet, TOP CENTRUM car s.r.o. Kyjov (z.č. 12 026), 2012.
22. KOUDELKA, I. Ekofarma Kundratice u Křížanova – statický výpočet nosných konstrukcí, Naresh Kumar Raina (z.č. 12 027), 2012.
23. KOUDELKA, I. Novostavba bytového domu PILOT-3, Hradec Králové – statický výpočet, TECH - ARCHITECTS s.r.o. Hradec Králové (z.č. 12 044), 2012.
24. KOUDELKA, I. Opěrné zdi TOP CENTRUM CAR, Kyjov – statický výpočet , TOP CENTRUM car s.r.o., Kyjov (z.č. 12 047), 2012.
25. KOUDELKA, I. Základ pod stroj VU 3019 JKZ Bučovice – statický výpočet, JKZ Bučovice a.s. (z.č. 12 055), 2012.
26. KOUDELKA, I. Polyfunkční dům Kyjov – statický výpočet, ing. Miloslav Čech, Kyjov (z.č. 12 060), 2012.
27. KOUDELKA, I. Stavební úpravy domu Hlinky č.p. 51, Brno – statický výpočet nosných konstrukcí objektu a posouzení vlivu přetížení na stávající klenby sklepních prostor, KVŽ Brno (z.č. 11 001), 2011.
28. KOUDELKA, I. Stavební úpravy objektu SONEVEND Kyjov – posouzení založení, SONEVEND, v.o.s. Kyjov (z.č. 11 010), 2011.

29. KOUDELKA, I. Průmyslová hala Vážany nad Litavou – statický výpočet, JUKO Vážany nad Litavou (z.č. 11 025), 2011.
30. KOUDELKA, I. Příjezdový tunel EDP Komořany – statický výpočet, EDP Komořany (z.č. 11 029), 2011.
31. KOUDELKA, I. Koupaliště Moravský Krumlov – statický výpočet, img. Roman Chvátal, Jamolice (z.č. 11 076), 2011.
32. KOUDELKA, I. Posouzení chování základu pod strojem s pohyblivým zatížením JKZ Bučovice (z.č. 10 086), 2010
33. KOUDELKA, I. Analýza rozsáhlých poruch na rekreačních objektech v Nových Hvězdlicích a příčiny jejich vzniku (z.č.10 084), 2010
34. KOUDELKA, I. Statický výpočet administrativní budovy Brněnské Ivanovice, NERA spol. s r.o., Brno (z.č. 10 075), 2010
35. KOUDELKA, I. Návrh a posouzení úhlové zdi k zajištění stability místní komunikace ulice Studentská, Město Bučovice (z.č. 10 074), 2010
36. KOUDELKA, I. Statická analýza příčin poruch opěrné zdi a návrh jejího zajištění , Slavíček Vícemilice (z.č. 10 064), 2010
37. KOUDELKA, I. Technologický park Brno – úprava budovy B210 – konstrukční část, FEI Brno (z.č. 10 043), 2010
38. KOUDELKA, I. Revitalizace objektu Ochoz u Brna – konstrukční část, STICO Brno spol. s r.o. (z.č. 10 029), 2010
39. KOUDELKA, I. Založení průmyslové haly MOSY Vracov, Falcon spol. s r.o. Kyjov, (z.č. 10 015), 2010

40. KOUDELKA, I., MIKULKA, O., MIKULKOVÁ, I. Nový pavilon mateřské školy, Město Bučovice, (z.č. 09 039), 2009
41. KOUDELKA, I. Zpráva o předběžném stavebním průzkumu historického objektu Kaple Žarožských, analýza příčin poruch a návrh zabezpečení. Město Bučovice (z.č. 09 031), 2009
42. KOUDELKA, I. Statický výpočet víceúčelového objektu technického zázemí golfového hřiště Skalica, GOLF RESORT Skalica, a.s, Slovensko, (z.č. 08 062), 2008
43. KOUDELKA, I. Návrh a výpočet založení průmyslové haly Čelákovice (z.č. 08 061), 2008
44. KOUDELKA, I. Rekonstrukce střechy s půdní vestavbou Základní školy Bohdalice – konstrukční část, obec Bohdalice (z.č. 08 059),2008
45. KOUDELKA, I. Statický výpočet založení průmyslové haly JAFholtz Vyškov, STAEG spol. s r.o. (z.č. 08 054), 2008
46. KOUDELKA, I. Statický výpočet zastřešení CASINO JR´s – Hatě, EDP Komořany (z.č. 08 047), 2008
47. KOUDELKA, I. Šestipodlažní bytový dům „Mezi mlaty“ Kyjov – konstrukční část, FALCON spol. s r.o., Kyjov (z.č. 08 035), 2008
48. KOUDELKA, I. Založení administrativního objektu EDP Komořany , Rousínov (z.č. 08 028), 2008
49. KOUDELKA, I. Konstrukce pro stabilizaci svahu pod komunikací v ulici Zahradní, Bučovice., Město Bučovice (z.č. 08 015), 2008
50. KOUDELKA, I. Statické posouzení konstrukcí střechy a stropu průmyslové budovy L.A. BERNKOP 1883 a.s. Frenštát pod Radhoštěm (z.č. 08 008), 2008

51. KOUDELKA, I. Návrh a posouzení nosných konstrukcí – rekonstrukce smuteční obřadní síně Kyjov. (z.č. 08 007), 2008
52. KOUDELKA, I. Konstrukční část rekonstrukce bytového domu Vracov, FALCON, spol. s r.o. (z.č. 07 064), 2007
53. KOUDELKA, I. Rekonstrukce školy Ratíškovice – posouzení stropů, FALCON, spol. s r.o. (z.č. 07 062), 2007
54. KOUDELKA, I. Hala pro skladování netkané textilie – konstrukční část, DINA-HITEX, spol. s r.o. Bučovice (z.č. 07 057), 2007
55. KOUDELKA, I. Nástavba 4 bytových jednotek bytového domu č.p. 918, 919 Bučovice – statické posouzení, FRONTON a.s. Bučovice (z.č. 07 048), 2007
56. KOUDELKA, I. Jednolodní průmyslová hala Vyškov – statický výpočet, Štěpán Dědice (z.č. 07 031), 2007
57. KOUDELKA, I. Novostavba obytného domu Praha-Horní Počernice – konstrukční část, V. FITSAY Praha (z.č. 07/028), 2007
58. KOUDELKA, I. Statický výpočet průmyslové haly Královopolské Vážany, Valíček Rousínov (z.č. 07 023), 2007

## ŽIVOTOPIS AUTORA

**Ing. Ivan Koudelka**

### Osobní údaje:

**Datum narození** 19.09.1957  
**Místo narození** Vyškov  
**Státní občanství** Česká republika  
**Rodinný stav** Ženatý

### Kontaktní údaje:

**Trvalé bydliště** Úlehla 1000, 685 01 Bučovice  
**E-mail** [i.ko@atlas.cz](mailto:i.ko@atlas.cz)  
**Telefon** 776 565 161

### Vzdělání:

**2007 – dosud** Doktorský studijní program, Fakulta stavební, VUT v Brně  
Obor: Konstrukce a dopravní stavby, zaměření: Stavební mechanika

**1977-1983** VUT v Brně, Fakulta stavební, obor Konstrukce a dopravní stavby

**1973-1977** Gymnázium Bučovice

### Odborná kvalifikace:

**2005 - dosud** ČKAIT – autorizovaný inženýr pro statiku a dynamiku staveb  
**1989 - dosud** Soudní znalec, obor: Ekonomika, odvětví: Ceny a odhady, specializace:  
Nemovitosti

### Profesní praxe:

**1993 – dosud** OSVČ – statik  
**1989 – 1993** VUT v Brně, Fakulta stavební – odborný asistent  
**1983 – 1989** Státní projektový ústav obchodu Brno - statik

