

# Vliv materiálu úhlových vodících desek na napjatost a chování u bezpodkladnicového upevnění

The impact of angled guide plates material on the  
strains and behaviours at a sole plate free attachment

Bc. Jan Kolařík

---

Diplomová práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2005/2006

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KOLAŘÍK**

Studijní program: **N 2808 Chemie a technologie materiálů**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství**

Téma práce: **Vliv materiálu úhlových vodících desek na napjatost a chování u bezpodkladnicového upevnění.**

Zásady pro vypracování:

- 1- Úvod do problematiky diplomové práce
- 2- Vypracování literární rešerše, základní východiska pro praktickou a teoretickou část
- 3- Naměření, porovnání a vyhodnocení materiálových charakteristik vodících vložek
- 4- Aplikace numerických metod na řešení stavu napjatosti a deformace ve vodící vložce
- 5- Vyhodnocení a porovnání výsledků s návrhy pro aplikaci v praxi

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- (1) Agarwal, B.D., Broutman, L.J. **Vláknové kompozity**. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1987.
- (2) Bareš, R.A. **Kompozitní materiály**. SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha, 1988.
- (3) Kolář, V., Němec, I., Kanický, V. **Principy a praxe metody konečných prvků**, Praha, 1997.
- (4) Bathe, K.J. **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**, Prantice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1996.
- (5) Bittnar, Z., Šejnoha, J. **Numerické metody mechaniky 1**, ČVUT, Praha, 1992.
- (6) Bittnar, Z., Šejnoha, J. **Numerické metody mechaniky 2**, ČVUT, Praha, 1992.
- (7) Petrtýl, M. **Mechanika kompozitních těles**, ČVUT, Praha, 1991.
- (8) Matthews, F.L., Davies, G.A.O., Hitchings, D., Soutis, C. **Finite element modeling of composite materials and structures**, CRC Press, England, 2000, ISBN 0-8493-0846-1

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Antonín Polášek, CSc.**

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**14. února 2006**

Termín odevzdání diplomové práce:

**31. května 2006**

Ve Zlíně dne 14. února 2006



L.S.

  
prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.  
děkan

  
14.2.2006  
prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.  
ředitel ústavu

Tímto bych chtěl poděkovat společnosti K.P.R. ENGINEERING s.r.o. v Otrokovicích a panu Ing. Antonínu Poláškoví CSc. za odborné vedení, rady, konzultace a poskytnutí softwarového vybavení při tvorbě mé diplomové práce.

Dále děkuji společnosti ŽPSV a.s., Uherský Ostroh za poskytnutí vzorků; Institutu pro testování a certifikaci, a.s. ve Zlíně za přípravu zkušebních tělísek; Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při uskutečnění zkoušek a také děkuji svým rodičům za zázemí a podporu ve studiu.

Tato diplomová práce, která nese název Vliv materiálu úhlových vodících desek na napjatost a chování u bezpodkladnicového upevnění, byla vypracována na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně za pomoci finančního zabezpečení této instituce. Je proto jejím majetkem a jakékoliv údaje v této diplomové práci obsažené mohou být využity literárně, technicky a technologicky jen po společném souhlasu ředitele uvedeného ústavu a vedoucího diplomové práce. V případě publikování výsledků v odborných časopisech budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 29. 05. 2006

.....

podpis

## RESUMÉ

V práci je provedena obecná charakteristika struktury železniční trati, konstrukce bezpodkladnicového upevnění a úhlové vodící desky Wfp 14K. Dále je uveden popis kompozitních materiálů, jejich rozdělení, zkušební metody pro testování, základní princip a rovnice numerické metody konečných prvků (MKP). V praktické části jsou obsaženy výsledky řady experimentálních zkoušek a numerických výpočtů. Experimentální hodnoty, získané z tahových zkoušek úhlové vodící desky, jsou aplikovány na numerický diskrétní model analyzovaný v programu Samcef. Diskrétní model je uvažován nejprve pro ortotropní a potom pro isotropní materiálové charakteristiky. Zatížení desky je od přitahovací síly pružné svěrky Skl 14. Výsledky získané numerickou metodou MKP představují rozložení tenzoru napětí a deformace pro oba materiálové modely. V závěru je provedeno vzájemné srovnání výsledků ortotropního a isotropního kompozitu a porovnání výsledků získaných experimentálně a numericky. Na základě výsledků je vyhodnoceno chování úhlové vodící desky u bezpodkladnicového upevnění s návrhy pro další možné aplikace v praxi.

In the work there has been carried out a general characteristic of a railway line structure, of a sole plate free attachment and an angled guide plate Wfp 14K. Further there is given a description of composite materials, their classification, testing methods, basic principle and equation of a numerical finite elements method (FEM). The practical part contains results of numbers of experimental tests and numerical computations. Experimental values gained from the tensile tests of the angled guide plate have been applied on a numerical discrete model analyzed in the Samcef program. The discrete model has been considered first for the orthotropic and then for isotropic material characteristics. The loading of the plate is from tightening force of the elastic clamp Skl 14. The results gained by the numerical method FEM represent distribution of a stress tensor and strain for both of the material models. In conclusion part there has been carried out mutual comparison of results for orthotropic and isotropic composites and comparison of results gained in an experimental and numerical way. Based on the results there has been evaluated behaviour of the angled guide plate at a sole plate free attachment with projects for next possible applications in practice.

# OBSAH

ÚVOD.....	8
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
<b>1 STRUKTURA ŽELEZNIČNÍ TRATI.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Železniční spodek.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Železniční svršek.....</b>	<b>12</b>
1.2.1 Kolejnice.....	12
1.2.2 Pražce .....	12
1.2.3 Upevňovadla.....	12
1.2.4 Kolejové lože.....	12
<b>2 BEZPODKLADNICOVÉ UPEVNĚNÍ.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Konstrukce bezpodkladnicového upevnění.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Úhlová vodící deska Wfp 14K .....</b>	<b>16</b>
<b>3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Definice kompozitů .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Charakteristické vlastnosti .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 Rozdělení kompozitních materiálů.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4 Charakteristika vláknových kompozitů .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5 Krátkovláknové kompozity.....</b>	<b>21</b>
3.5.1 Teorie přenosu napětí.....	23
3.5.2 Modul pružnosti a směšovací pravidlo Poissonova poměru.....	26
<b>4 ZKUŠEBNÍ METODY PRO TESTOVÁNÍ KOMPOZITŮ .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Stanovení tahových vlastností.....</b>	<b>29</b>
<b>4.2 Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy.....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 Stanovení tvrdosti podle Brinella - metoda vtláčením kuličky .....</b>	<b>31</b>
<b>5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>33</b>
<b>II. PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>34</b>
<b>6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....</b>	<b>35</b>
<b>6.1 Zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek.....</b>	<b>35</b>
<b>6.2 Zkušební tělesa ve tvaru trámečku .....</b>	<b>36</b>
<b>6.3 Zkušební tělesa části desky ve tvaru hranolu.....</b>	<b>36</b>
<b>7 TAHOVÁ ZKOUŠKA .....</b>	<b>37</b>

<b>8 ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY.....</b>	<b>41</b>
<b>9 ZKOUŠKA STANOVENÍ TVRDOSTI PODLE BRINELLA.....</b>	<b>42</b>
<b>10 VLASTNOSTI KOMPOZITU ÚHLOVÉ VODÍCÍ DESKY .....</b>	<b>43</b>
<b>10.1 Výpočet hodnot charakterizující ortotropní materiál úhlové vodící desky.....</b>	<b>43</b>
<b>10.2 Stanovení hodnot charakterizující isotropní materiál úhlové vodící desky .....</b>	<b>45</b>
<b>11 STANOVENÍ ZATĚŽUJÍCÍCH SIL ÚHLOVÉ VODÍCÍ DESKY .....</b>	<b>46</b>
<b>12 APLIKACE METODY KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP) PRO ŘEŠENÍ ÚLOHY NAPJATOSTI ÚHLOVÉ VODÍCÍ DESKY.....</b>	<b>48</b>
<b>12.1 Teoretický úvod .....</b>	<b>48</b>
<b>12.2 Numerické řešení s praktickou aplikací .....</b>	<b>50</b>
<b>12.3 Výsledky numerické analýzy pro ortotropní těleso úhlové vodící desky.....</b>	<b>55</b>
<b>12.4 Výsledky numerické analýzy pro isotropní těleso úhlové vodící desky .....</b>	<b>62</b>
<b>13 DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>69</b>
<b>13.1 Výsledky získané experimentálním měřením.....</b>	<b>69</b>
<b>13.2 Výsledky získané numericky pomocí MKP.....</b>	<b>70</b>
13.2.1 Ortotropní materiál úhlové vodící desky .....	70
13.2.2 Isotropní materiál úhlové vodící desky .....	70
<b>13.3 Porovnání výsledků ortotropního a isotropního materiálu úhlové vodící desky .....</b>	<b>71</b>
<b>13.4 Porovnání výsledků získaných experimentálně a pomocí MKP.....</b>	<b>71</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>73</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>74</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>76</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>79</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>82</b>

## ÚVOD

Železniční doprava je rozsáhlou a závažnou oblastí činnosti lidského společenství, která ve svých důsledcích ovlivňovala, a v současné době ovlivňuje, život každého z nás (1).

Úkoly v železniční dopravě vycházely nejprve z požadavků a snahy nahradit novými hmotami úzkoprofilové a málo dostupné barevné kovy a deficitní materiály. Poté co se zjistilo, že nové hmoty mají řadu funkčních vlastností lepších než jaké jsou běžné u klasických materiálů, řešilo se jejich využití i pro konstrukci (1).

Velmi progresivními materiály se postupem času staly polymery a polymerní kompozity, které se začaly používat především v oblasti konstrukce železničního svršku. Výborné vlastnosti tyto materiály předurčovaly nejen pro některé speciální aplikace, ale zejména pro široké použití v koleji. Vedle výhodných mechanických vlastností to byla velmi dobrá odolnost proti korozi, dlouhá životnost při dynamickém zatěžování i v tvrdých povětrnostních podmínkách, dobrá odolnost vůči ropným produktům a výborné elektroizolační vlastnosti. K těmto vlastnostem často přistupovala i příznivá cenová úroveň ve srovnání s tradičními materiály (1).

Železniční svršek představuje od doby vzniku železnice jednu z nejpodstatnějších stavebních částí železniční tratě. V podmínkách železniční sítě České republiky prošly jednotlivé konstrukce železničních svršků dlouholetým vývojem a byly prověřeny provozní praxí. Jejich vývoj a změny byly ovlivněny neustálým rozvojem technických poznatků, růstem provozního zatížení, účinky nových těžších vozidel a snahou zvyšovat rychlosti (2).

V průběhu 20. století se v České republice vystřídal několik typů sestav železničních svršků. Až do roku 1995 se výhradně používalo podkladnicového upevnění kolejí (2).

V roce 1929 byl zaveden pro hlavní koleje železniční svršek soustavy T s rozponovými podkladnicemi (2).

V roce 1961 se začala používat sestava železničního svršku typu R65 s rozponovými podkladnicemi (2).

V roce 1971 byly zavedeny sestavy železničních svršků R65, UIC 60 a S49 s žebrovými podkladnicemi (2).



Zejména v souvislosti se zahájením modernizace vybraných koridorových tratí železniční sítě ČR se podstatně urychlila potřeba ověřit a zavést nové typy konstrukcí železničních svršků, které by umožnily dodržet požadované parametry – zajistit bezpečnost, jízdní komfort, dlouhodobou životnost a provozní spolehlivost. V roce 1995 a 1998 byly proto zavedeny nové bezpodkladnicové systémy upevnění kolejnic (2).

V roce 1995 byla uvedena nová konstrukce železničního svršku VOSSLOH. Jedná se o pružné bezpodkladnicového upevnění kolejnic UIC60 a S49 s označením W14 (2).

V roce 1998 bylo zavedeno bezšroubové upevnění PANDROL FASTCLIP. Jde o bezpodkladnicové upevnění kolejnic UIC60 (2).

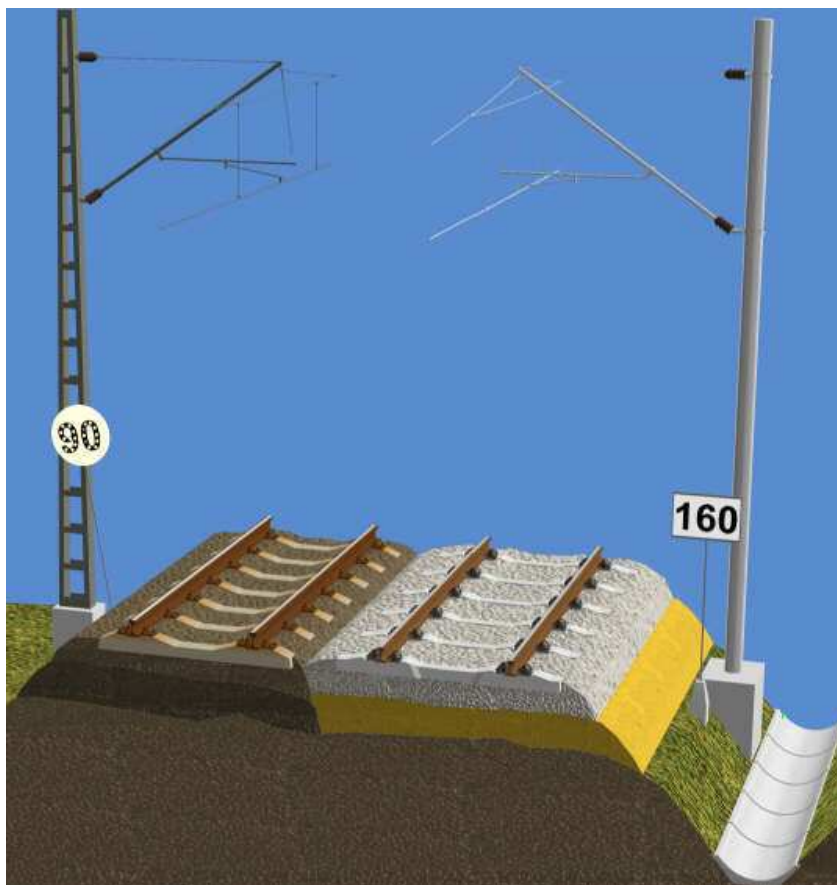
Bezpodkladnicového upevnění kolejnic je v současné době využíváno především při výstavbě koridorů a modernizaci tratí. Upevnění VOSSLOH bylo např. použito při rekonstrukci trati Břeclav - Brno hl.n. Upevnění PANDROL FASTCLIP zase nalezneme na hlavním tahu Břeclav - Přerov (2).

Důležitou součástí konstrukce bezpodkladnicového upevnění VOSSLOH je úhlová vodící deska, kterou se zabývá tato práce.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 STRUKTURA ŽELEZNIČNÍ TRATI

Železniční trať se ze stavebního hlediska dělí na železniční spodek a železniční svršek (3).



Obr. 1 Železniční svršek a spodek u elektrifikované dvoukolejné trati (5)

### 1.1 Železniční spodek

Železniční spodek je konstrukce vybudovaná z největší části stavební úpravou terénu. Je jednou ze základních částí tratě. Jeho tvary a rozměry, požadovaná únosnost a stabilita jsou rozhodující pro zajištění trvalé polohy koleje a tím i bezpečnosti a plynulosti železničního provozu. Trať může být v náspu – nad stávajícím terénem nebo v zářezu – pod stávajícím terénem (3, 4).

Základem je těleso železničního spodku, stavby železničního spodku, dopravní plochy a komunikace, drobné stavby a zařízení železničního spodku a železniční přejezdy (3, 4).

## 1.2 Železniční svršek

Železniční svršek je konstrukce, která tvoří jízdní dráhu pro kolejová vozidla. Hlavní funkcí je bezpečné vedení vozidel a přenášení zatížení ze svršku na spodek. Jeho konstrukce musí vyhovovat dovolené hmotnosti na nápravu, rychlosti a intenzitě provozu (3).

Základní součástí železničního svršku jsou kolejnice, kolejnicové podpory (pražce), upevňovadla a kolejového lože (4).

### 1.2.1 Kolejnice

Je nejdůležitější a nejdražší součástí železničního svršku. Tím, že nese a vede vozidlo, má přímý vliv na bezpečnost dopravy a na jízdní komfort. Nejrozšířenější jsou kolejnice širokopatní, jejichž základní částí je hlava, stojina a pata. Tvar použité kolejnice vychází ze zatížení konkrétní trati. Dnes se v ČR používají převážně kolejnice tvaru UIC 60 (hlavní tratě) a S 49 (3, 4).

### 1.2.2 Pražce

Jejich význam spočívá v přenosu provozních tlaků z kolejnice do kolejové lože a na železniční pláň. Zároveň také zajišťují stálý rozchod kolejnic. Nejdéle používaným typem pražců jsou pražce dřevěné, které jsou dlouhé 2600 mm. Betonové pražce se u ČD (ČSD) používají od roku 1950. V současné době se používají železobetonové předem předpjaté monolitické pražce o délce 2400 mm ( pražec SB 8 P pro podkladnicové upevnění) nebo 2600 mm (pražec B 91 S pro bezpodkladnicové upevnění) (3, 4).

### 1.2.3 Upevňovadla

Slouží k upevnění kolejnic na pražce a zajišťují stálou polohu a rozchod koleje (3).

### 1.2.4 Kolejové lože

Slouží k roznášení tlaků pražců na pláň železničního spodku, k výškové a směrové regulaci koleje a k odvodnění železničního svršku (3).

## 2 BEZPODKLADNICOVÉ UPEVNĚNÍ

K upevnění kolejnic na pražce se používá podkladnicového nebo bezpodkladnicového upevnění. Zatímco u podkladnicového upevnění je mezi kolejnicí a pražcem vložena ocelová deska s upínacími prvky – podkladnice, tak u bezpodkladnicového upevnění je mezi kolejnicí a pražcem pouze pružná podložka z pryže nebo plastu (2, 4).

Bezpodkladnicového upevnění se používá v kolejích s větší provozní rychlostí a zatížením (např. na železničních tranzitních koridorech) (4).

### 2.1 Konstrukce bezpodkladnicového upevnění

Kolejnice je uložena na pryžové podložce. Tato podložka je umístěna na úložné ploše předem předpjatého betonového pražce B91 S/1. Pata kolejnice je fixována ve správné poloze pomocí úhlových vodících desek Wfp 14K, které přenášejí příčné síly z paty kolejnice přímo do betonu pražce. Kolejnice je přitlačována vnějšími pracovními rameny bezpodkladnicové pružné svěrky Skl 14. Přítlačná síla jedné svěrky se pohybuje v rozmezí 9-11 kN. Střední rameno pružné svěrky leží v lůžku úhlové vodící desky nad patou kolejnice a tím zajišťuje její ochranu před naklopením či přizvednutím. Upnutí kolejnice k pražci se provádí dotažením vrtule R1, jejíž hlava působí prostřednictvím ploché podložky Uls 7 na pružnou svěrku Skl 14. Vrtule je upevněna v pražci pomocí plastové hmoždinky (2, 1, 7, 5).

Cílem pružného bezpodkladnicového upevnění je dosáhnout plynulejší jízdy, nižšího opotřebení svršku, snížení příčných tlaků a celkové hlučnosti konstrukce (5).

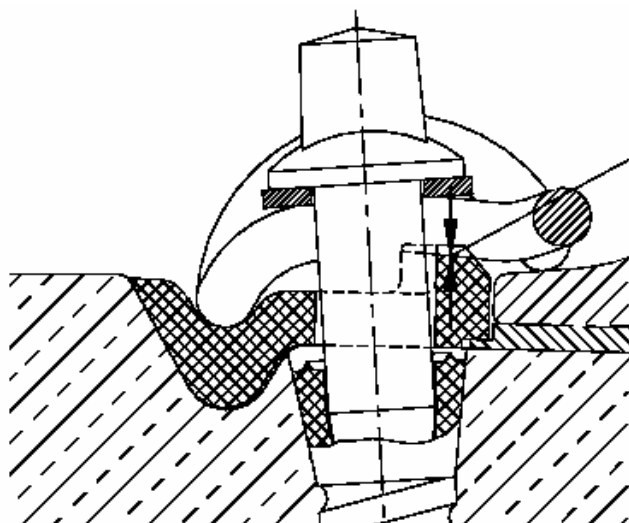
Bezpodkladnicové upevnění, vkládané v poslední době při rekonstrukcích do koridorových tratí ČD, potvrzuje stejný trend vývoje i u zahraničních správ tratí. Tento typ upevnění využívá konstrukčních plastů pro funkčně velmi exponované prvky upevnění, které přímo ovlivňují spolehlivost i životnost uzlu upevnění (1).



*Obr. 2 Struktura bezpodkladnicového upevnění Vossloh (5)*

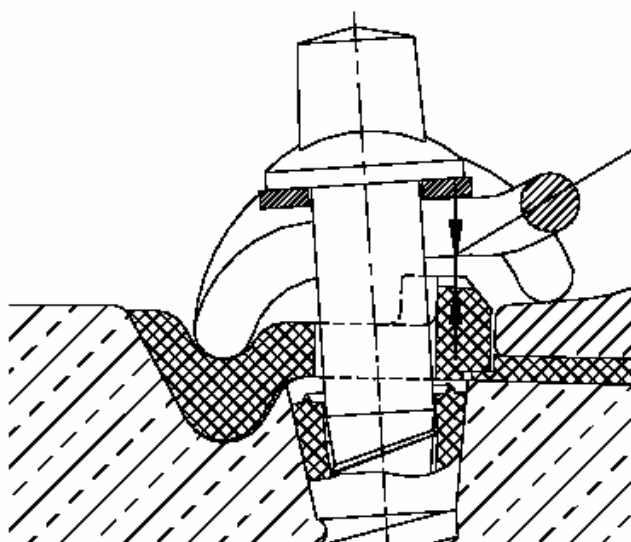
*Tab. I Přehled svrškového materiálu potřebného pro upevnění kolejnic (2)*

Upevnění	Materiál potřebný pro upevnění kolejnic na jednom pražci		
	Popis	Počet kusů	Celkem
W14	pružné svěrky Skl 14	4	14
	vtule	4	
	podložky pod hlavu vrtule	4	
	pryžová podložka pod patu kolejnice	2	
	úhlová vodící deska	4	

**Správně**

Svěrka je správně namontována do pracovní polohy, když střední rameno dosedá do lůžka úhlové vodící vložky

Při montáži nesmí být překročen uťahovací moment 220 Nm.

**Chybně**

Střední rameno svěrky nedosedá do lůžka úhlové vodící vložky, případně je zde mezera.

Potřebná přítlačná síla svěrky není dosažena.

Obr. 3+4 Technologie montáže upevnění W 14 (6)

## 2.2 Úhlová vodící deska Wfp 14K



*Obr. 5 Úhlová vodící deska*

Plastová úhlová vodící deska v upevnění Vossloh je vyrobena z PA 6 a ze 30% plněna sekaným skleněným vláknem. Tyto vlákna jsou typu E-skla. Výrobní a tvarovací metodou je vstřikování do forem. Jedná se tedy o konvenční, krátkovláknový kompozit s termoplastovou matricí (1, 8).

Pro úhlovou vodící desku je dále provedena materiálová a strukturální analýza jak po stránce teoretické, tak i praktické.



### 3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

#### 3.1 Definice kompozitů

Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi. Dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoliv složkou (fází) samostatně nebo ani jejich prostou sumací (9).

Materiál mající dvě nebo více odlišných materiálových složek je podle toho tedy složeným materiálem. Avšak jen tehdy, když mají vytvářející fáze značně rozdílné fyzikální vlastnosti, a tudíž i vlastnosti složeného materiálu jsou zřetelně odlišné od vlastností jeho složek. Ačkoliv plasty obsahující z cenových důvodů plniva a malá množství příměsí jsou složenými materiály, nesmí být pokládány za kompozity, pokud jejich fyzikální vlastnosti nejsou podstatně ovlivněny těmito příměsemi. Proto se za kompozitní materiály považují ty, u kterých se změny vlastností objevují jako výsledek kombinace složek. Tyto změny budou patrné, bude-li jedna z fází v destičkové nebo vlákněné formě, objemový podíl jedné ze složek větší než 10% a její vlastnost výraznější ( $\geq 5$ krát) než druhé (8, 9).

#### 3.2 Charakteristické vlastnosti

Kompozity tvoří jedna nebo více nespojitých fází, ponořených ve spojitě fázi. Diskontinuitní fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se vyztužení nebo vyztužovací materiál, zatímco spojitá fáze se nazývá matrice. Výjimkou z tohoto pravidla je skupina materiálů známých jako polymery modifikované kaučukem, skládající se z tuhé polymerní matrice, plněné kaučukovými částicemi (8).

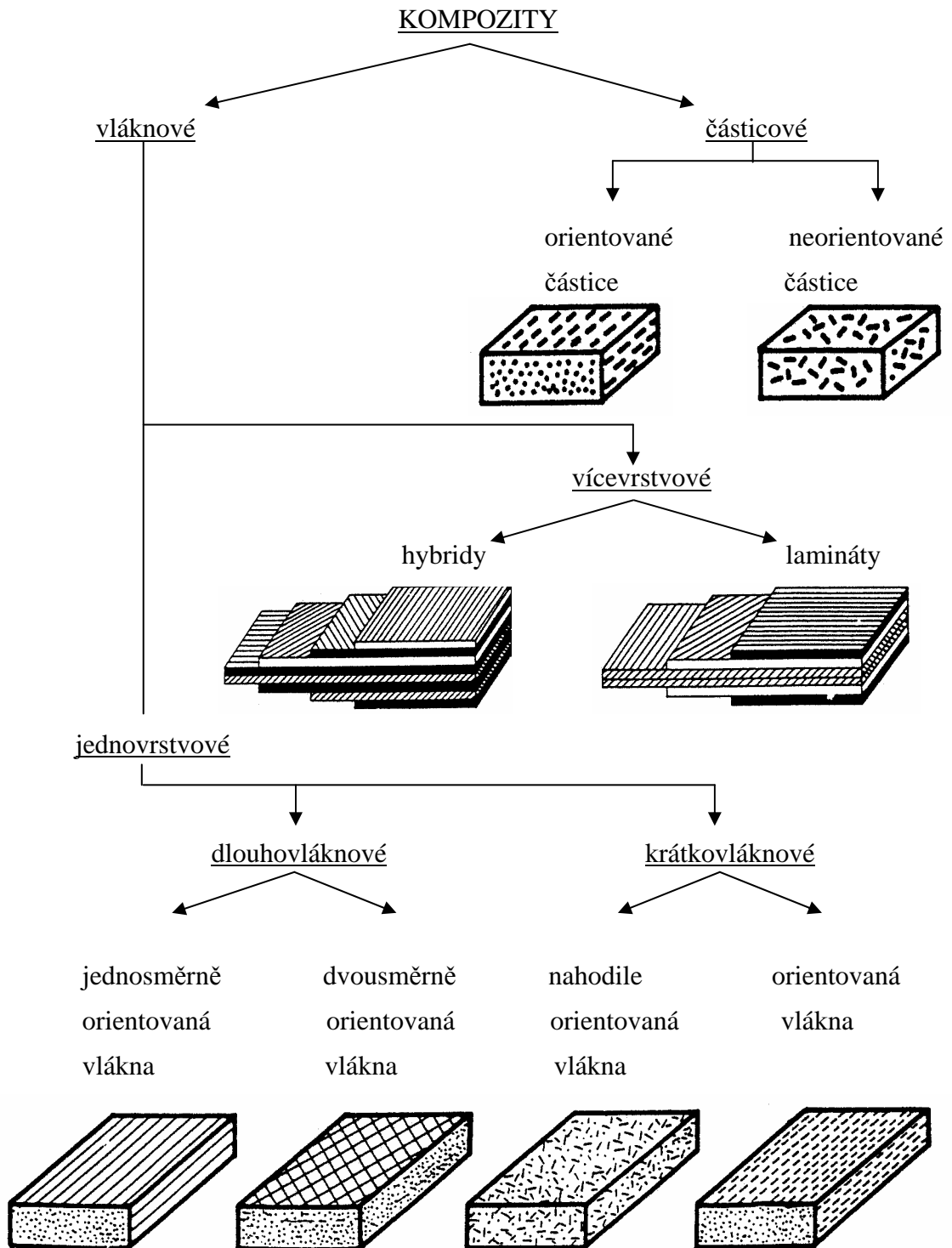
Vlastnosti kompozitů jsou silně ovlivňovány vlastnostmi svých materiálových složek, jejich distribucí a interakcí mezi nimi. Kompozit je charakterizován součtem vlastností složek podle jejich objemových podílů, které na sebe mohou vzájemně synergicky působit. Pro popis kompozitu jako materiálového systému je potřeba vedle specifikace materiálů složek a jejich vlastností určit i geometrii vyztužení vzhledem k systému. (8, 9).

Geometrie vyztužení může být popsána tvarem, velikostí a jejich distribucí. Systémy s vyztužením se mohou lišit při shodné geometrii jeden od druhého např. v koncentraci, koncentrační distribuci a orientaci. Všechny tyto faktory jsou důležité v určování vlastností kompozitů. Při odvozování teoretických vztahů pro kompozity nebývají všechny uvažovány (8).

### **3.3 Rozdělení kompozitních materiálů**

Většina dosud kompozitních materiálů je vyráběna pro zlepšení mechanických vlastností, jako je pevnost, tuhost a tažnost nebo pro zvýšení vysokoteplotní odolnosti. Mechanismus pevnostního chování je závislý na geometrii vyztužení. Z toho důvodu třídíme kompozitní materiály na základě geometrie vyztužení, tak jak je uvedeno na obr.6 (8).

Podle tohoto třídění rozdělujeme kompozity na vláknové a částicové. Vlákno je charakterizováno svou délkou, která je mnohem větší v porovnání s jeho průřezovými rozměry. Kompozity vyztužené vlákny se nazývají vláknové kompozity. Kompozity vyztužené částicovými složkami jsou označovány jako částicové kompozity. Vlákno lze dále třídit na jednovrstvové a vícevrstvé. Vícevrstvé kompozity se dělí na hybridy a lamináty. Jednovrstvé kompozity na dlouhovláknové a krátkovláknové (8, 9, 10).



Obr. 6 Obecné schéma pro rozdělení kompozitních materiálů (10).

### 3.4 Charakteristika vláknových kompozitů

Naměřené hodnoty pevnosti většiny materiálů jsou mnohem menší než jejich teoretické hodnoty. Rozpor v hodnotách pevnosti se přičítá vrozeným nedokonalostem a vadám v materiálu. Pevnost poškozují zvláště vady ve tvaru trhlin, které leží kolmo ke směru působícího zatížení. Plastová vlákna nebo vlákna z nepolymerních materiálů proto mají v porovnání s kompaktem z téhož materiálu mnohem větší pevnost ve směru délky. Velké nečistoty, které mohou být přítomny v kompaktu materiálu, jsou minimalizovány v důsledku malých průřezových rozměrů vlákna (8).

Nejrozšířenější a jedno z nejlevnějších je vlákno z E-skla. Základem E skla je soustava oxidů  $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$  (8, 11).

Mezi vlákna s vysokými hodnotami tuhosti patří vlákna bórová, karbonová a aramidová např. (polymerové vlákno Kevlar 49) (8, 11).

Tab. II Typické vlastnosti vláken (8, 11)

Materiál	Hustota $\rho$ [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]	Axiální tahový modul E [GPa]	Axiální tahová pevnost $\sigma_p$ [GPa]
E-sklo	2,54	72	1,5-3,5 <sup>1)</sup>
S-sklo	2,49	86	1,9-4,6
Karbon HTS	1,79	230	3,2
Karbon HM	1,86	340	2,5
Karbon UHM	1,95	480	1,8
Aramid (Kevlar-49)	1,45	124	2,8

1) ihned po vyrobení

Z důvodu malých průřezových rozměrů se vlákna nemohou používat přímo v technických aplikacích. Vkládají se proto do matricových materiálů, aby vytvořily vláknové kompozity. Matrice spojuje vlákna dohromady, slouží k přenosu namáhání do vláken a chrání je proti narušení okolím a poškození při zpracování. V kompozitech s krátkými vyztužovacími vlákny je přenosová funkce matrice závažnější než v kompozitech se spojitými vlákny. Vláknové kompozity jsou důležitou skupinou kompozitních materiálů, protože jsou schopny dosahovat vysokých pevností (8).

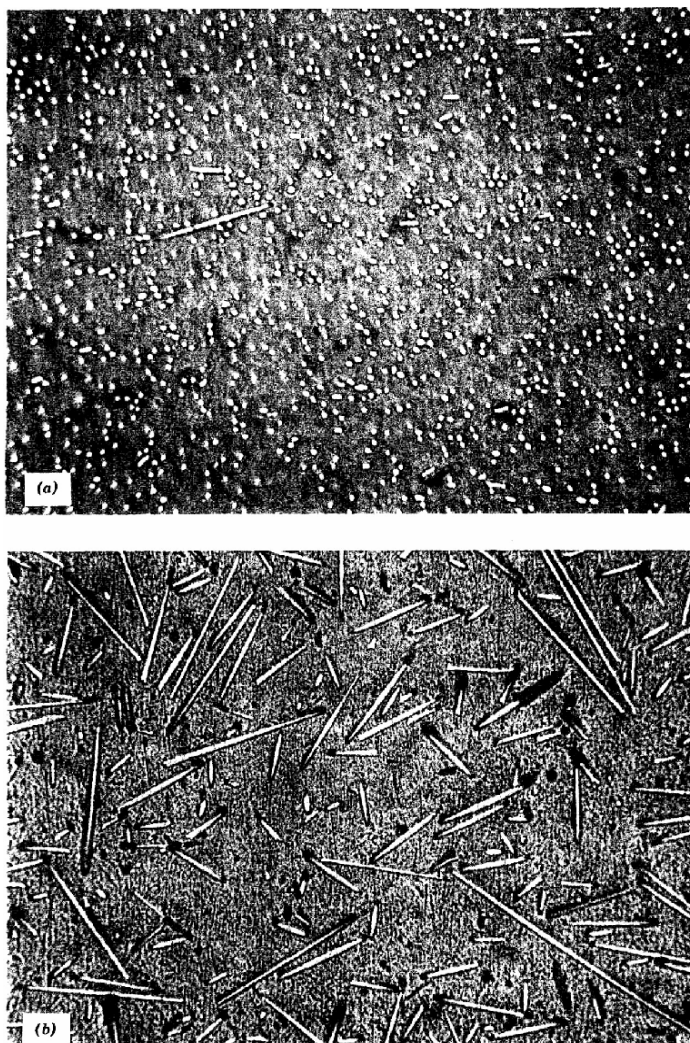
Tab. III Některé vlastnosti používaných termoplastových matic (11)

Matrice	Hustota $\rho$ [g.cm <sup>-3</sup> ]	Axiální tahový modul E [GPa]	Axiální tahová pevnost $\sigma_p$ [MPa]	Deformace do lomu [%]
termoplasty	0,90-1,45	1,0-4,0	20-250	5-150
PP	0,90	1,1-1,5	28-41	10-700
PA	1,42	2,8-3,4	76-83	60-300
PC	1,21	2,1-2,8	62-76	110-130
PEEK	1,31	3,8	70	50-150

### 3.5 Krátkovláknové kompozity

Vyztužovací vlákna v jednovrstvovém kompozitu jsou krátká nebo dlouhá vzhledem k jejich průřezovým rozměrům. Kompozity vyztužené dlouhými spojitými vlákny se nazývají dlouhovláknové a kompozity vyztužené krátkými diskontinuitními vlákny se nazývají krátkovláknové (8).

Orientaci krátkých diskontinuitních vláken v kompozitním materiálu nelze snadno řídit. Ve většině případů se předpokládá, že vlákna jsou v kompozitu orientována nahodile. Při vstřikovacím tvarování kompozitu vyztuženého vlákny se může objevit výrazná orientace ve směru tečení podle obr.7a. V jiných oblastech téhož výrobku může být orientace zcela rozdílná podle obr.7b (8).



Obr. 7 Nylon tvarovaný vstřikováním, vyztužený skleněnými vlákny (100×) (8)

a – řez částí, kde mají vlákna preferovanou orientaci;

b – řez částí, kde mají vlákna náhodnou orientaci;

Krátká vlákna, někdy označovaná jako sekaná vlákna, mohou být vstřikována do formy zároveň s kapalnou matricí, aby se vytvořila vyztužená plastová struktura. Při tomto procesu leží sekaná vlákna v rovnoběžných rovinách s povrchem formy a jsou náhodně orientována v rovinách rovnoběžných s povrchem. Vlastnosti krátkovláknového kompozitu mohou být proto isotropní (8).

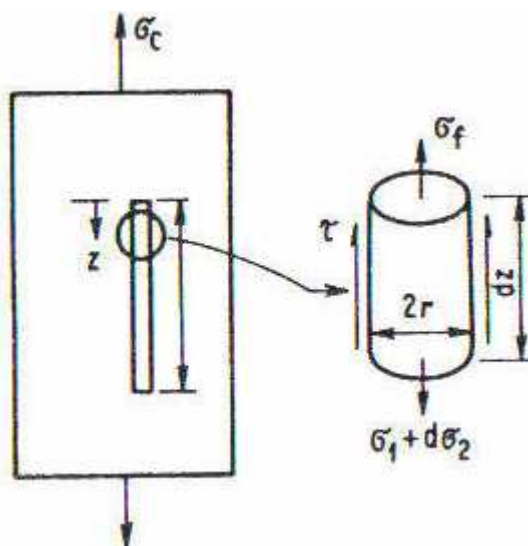
Při přípravě formovací hmoty mohou být sekaná vlákna také zamíchávána do matrice. Tato vlákna mají sklon orientovat se rovnoběžně se směrem toku materiálu ve formovacím procesu vytlačováním nebo vstřikováním, a tak získat preferenční orientaci. Kompozity vyrobené tímto způsobem nejsou isotropní. Jejich vlastnosti závisí na stupni preferované orientace, dosažené během výrobního procesu (8).

Tab. IV Příklady krátkovláknových kompozitů (8)

Typ	Tvarovací metoda	Délky vláken	Orientace vlákna
Termoplasty vyztužené vlákny	Vstřikování	< 1,25 cm	Náhodná nebo závislá na toku ve formě
Směs pro tváření kompaktních prvků	Tlakové formování	< 2,5 cm	Náhodná ve směsi, ale závislá na toku ve formě
Termoplast vyztužený netkanými rohožemi	Lisování desek	< 7,5 cm	Náhodná

### 3.5.1 Teorie přenosu napětí

V kompozitech nepůsobí zatížení přímo na vlákna, nýbrž je zaváděno do matricového materiálu a přenášeno do vláken jednak prostřednictvím jejich konců, jednak též válcovým povrchem vlákna v okolí jeho konců. Je-li délka vlákna mnohem větší než délka, přes niž se přenos napětí děje, mohou být koncové účinky zanedbány a vlákno uvažováno jako spojitě. U krátkovláknových kompozitů nemohou být účinky konců zanedbávány a vlastnosti kompozitu jsou funkcí délky vlákna. Konce ovlivňují významně chování a zpevňovací účinky kompozitů s diskontinuitními vlákny (8).



Obr. 8 Rovnováha na elementu diskontinuitního vlákna uloženého rovnoběžně se směrem zatížení (8).

Rozdělení napětí podél vlákna lze pochopit uvažováním rovnováhy malého prvku vlákna dle obr. 8. Rovnováha sil na elementární délce  $dz$  vyžaduje

$$(\pi r^2) \sigma_f + (2\pi r dz) \tau = (\pi r^2) (\sigma_f + d\sigma_f) \quad (1)$$

neboli

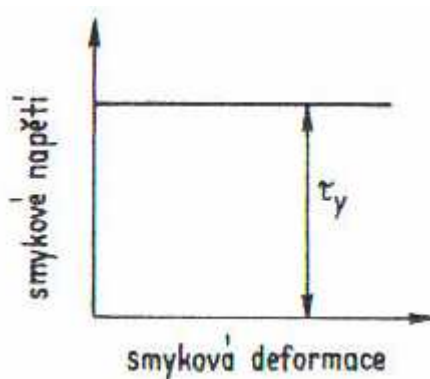
$$\frac{d\sigma_f}{dz} = \frac{2\tau}{r} \quad (2)$$

Rovnice (2) ukazuje, že pro vlákno konstantního poloměru je přírůstek napětí vlákna přímo úměrný smykovému napětí na rozhraní. Napětí vlákna na průřezu ve vzdálenosti  $z$  od konce vlákna, dostaneme integrací:

$$\sigma_f = \sigma_{f0} + \frac{2}{r} \int_0^z \tau dz \quad (3)$$

Mnohdy je  $\sigma_{f0}$  zanedbáváno, neboť dochází ke kluzu matrice přiléhající ke konci vlákna nebo k separaci konce vlákna a matrice v důsledku velkých koncentrací napětí. Je-li  $\sigma_{f0}$  zanedbatelné, lze rovnici (3) psát

$$\sigma = \frac{2}{r} \int_0^z \tau dz \quad (4)$$



Obr. 9 Idealizovaná křivka smykového napětí – smyková deformace pro matrici (8)

U krátkých vláken vzniká maximální napětí vlákna v polovině délky (tj.  $z = l/2$ ).

pak

$$(\sigma_f)_{max} = \frac{\tau_y l}{r} \quad (5)$$



Napětí vlákna má svou mezní hodnotu. Mezní hodnota napětí vlákna je napětí, které by přeneslo spojitě vlákno při zatěžovacím napětí namáhajícím kompozit. Při předpokladu  $\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$  lze ukázat, že maximální napětí vlákna je dáno vztahem

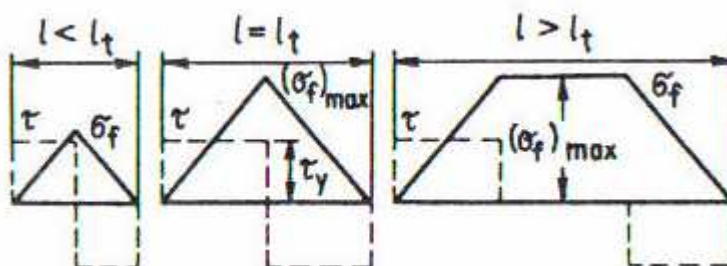
$$(\sigma_f)_{\max} = \frac{E_f}{E_c} \sigma_c \quad (6)$$

Minimální délka vlákna, nezbytná k tomu, aby napětí vlákna dosáhlo svého maxima  $(\sigma_f)_{\max}$ , může být definována jako přenosová délka zatížení,  $l_t$ . Touto délkou vlákna se převede zatížení z matrice do vlákna. Je dána vztahem

$$\frac{l_t}{d} = \frac{(\sigma_f)_{\max}}{2\tau_y} \quad (7)$$

Jelikož  $(\sigma_f)_{\max}$  je funkcí zatěžovacího napětí, je též přenosová délka funkcí zatěžovacího napětí. Kritická délka vlákna  $l_c$ , nezávislá na zatěžovacím napětí, může být definována jako minimální délka vlákna, na které se dosáhne meze pevnosti vlákna  $\sigma_{pf}$ . Je tedy

$$\frac{l_c}{d} = \frac{\sigma_{pf}}{2\tau_y} \quad (8)$$



Obr. 10 Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní pro různé délky vlákna (8)

Kritická délka je maximální hodnota přenosové délky. Kritická délka vlákna je důležitá vlastnost systému a ovlivňuje mezní vlastnosti kompozitu. Někdy se jako přenosová délka a kritická délka rozumí neúčinná délka, neboť na tuto vzdálenost přebírá vlákno menší zatížení než činí jeho maximální napětí. Variace napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní jsou ukázány na obr.10 pro různé délky vlákna. Krátký úsek na konci vlákna je zatěžován nižší hodnotou než činí maximální napětí vlákna. To ovlivňuje pevnost a modul pružnosti kompozitu. Je-li délka vlákna mnohem větší než přenosová délka, blíží se chování kompozitu vyztuženého spojitými vlákny (8).

Rozdělení napětí ukázaná v obr 10 jsou přibližná, neboť byla získána za předpokladu, že materiál matrice je ideálně plastický. Ve skutečnosti většina matricových materiálů vykazuje pružně plastické chování. Přesný průběh napětí lze obdržet za předpokladu, že matrice je pružně plastická. To přináší četné obtíže v provedení teoretické analýzy kompozitu. Pro usnadnění analýzy složitých problémů jsou nejlepší numerická řešení. Numerické metody vyžadují velmi málo zjednodušujících předpokladů a lze snadno dosáhnout přesného řešení (8).

Konce vláken konečné délky jsou namáhány méně než činí maximální napětí vlákna. Pro přibližnou napjatost znázorněnou obr. 10 se nalezne průměrné napětí jako

$$\bar{\sigma}_f = \frac{1}{2}(\sigma_f)_{\max} = \frac{\tau_{yl}}{d}, \quad l < l_t \quad (9)$$

$$\bar{\sigma}_f = (\sigma_f)_{\max} \left(1 - \frac{l_t}{2l}\right), \quad l > l_t \quad (10)$$

Je-li délka vlákna 50ti násobkem přenosové délky, je průměrné napětí vlákna 99 % maximálního napětí vlákna. Převyšuje-li tudíž délka vlákna 50krát svou kritickou délku, blíží se chování kompozitu chování kompozitu se spojitými vlákny se stejnou orientací vláken (8).

Tab. V Maximální napětí vlákna[8]

$l/l_t$	$\bar{\sigma}_f / (\sigma_f)_{\max}$
1	0,50
2	0,75
5	0,90
10	0,95
50	0,99
100	0,995

### 3.5.2 Modul pružnosti a směšovací pravidlo Poissonova poměru

Halpin a Tsai odvodili obecné vztahy jako aproximaci mnohem exaktnější analýzy mikromechaniky kompozitů. Tyto vztahy lze přímo použít i pro konstrukční účely. Prognóza vlastností kompozitů těchto vztahů je docela přesná, nedosahuje-li objemový podíl vláken hodnoty blízké 1 (8).

Rovnice Halpina a Tsaie jsou velmi užitečné pro určování podélného a příčného modulu usměrněných krátkovláknových kompozitů. Tyto rovnice mohou být psány pro podélný a příčný modul ve tvaru

$$\frac{E_L}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta_L V_f}{1 - \eta_L V_f} \quad (11)$$

a

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta_T V_f}{1 - \eta_T V_f} \quad (12)$$

kde

$$\eta_L = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + \xi} \quad (13)$$

a

$$\eta_T = \frac{(E_f / E_m) - 1}{(E_f / E_m) + 2} \quad (14)$$

Veličina  $\xi$  je mírou vyztužení kompozitu a závisí na geometrii vláken. V případě podélného modulu je dáno rovnicí

$$\xi = 2 \frac{l}{d} \quad (15)$$

a pro případ příčného modulu se  $\xi = 2$

Halpinovy a Tsaiovy rovnice také ukazují, že příčný modul usměrněného krátkovláknového kompozitu není ovlivněn tvarovým parametrem  $l/d$  (8, 11).

Hodnota smykového modulu  $G$  se dá vyjádřit vztahem

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (16)$$

kde

$E$  = modul pružnosti v tahu

$\nu$  = Poissonův poměr

Poissonův poměr kompozitu  $\nu$  lze vyčíslit směšovacím pravidlem ve tvaru

$$\nu = \nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot V_m \quad (17)$$

kde

$\nu_f$  = Poissonův poměr skleněného vlákna

$\nu_m$  = Poissonův poměr matrice

$V_f$  = objemový podíl vláken

$V_m$  = objemový podíl matrice

## 4 ZKUŠEBNÍ METODY PRO TESTOVÁNÍ KOMPOZITŮ

Velmi prudký rozmach výroby kompozitů a jejich aplikací v konstrukčních prvcích, letectví, sportovních potřebách a v dalších oblastech vedl ke vzniku značného množství zkušebních metod většinou odrážejících specifika té které oblasti. V důsledku netradičnosti kompozitních materiálů a poměrně krátkodobé zkušenosti s jejich používáním jsou mnohé metody zcela nové a u kovů a jiných tradičních materiálů se vůbec nepoužívají (11).

V některých případech lze použít data získaná ze zkušebních metod i pro konstrukční výpočty, avšak z valné části jsou tato data použitelná pouze pro kontrolu kvality výroby. Pro získání dat relevantních pro konstrukční výpočty je třeba měřit vlastnosti kompozitů při velmi přesně definovaných zatíženích a za přesných a čistých napěťových poměrech ve zkoušeném tělese idealizovaného tvaru. Nejzákladnějším předpokladem dobrého fungování jakéhokoliv kompozitního materiálu je velmi rovnoměrné zatěžování výztuže, které omezuje pravděpodobnost lokální kumulace defektů a poruch v místě nerovnoměrného zatížení vláken. Navíc je pro úspěšné použití takto získaných dat bezpodmínečně nutné znát napěťové poměry v navrhovaném výrobku tak, aby bylo možno využít přednosti kompozitů a maximálně potlačit jejich nedostatky (11).

### 4.1 Stanovení tahových vlastností

Tato metoda se používá k vyhodnocení chování zkušebních těles při tahovém namáhání a pro stanovení meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti při tahovém namáhání a dalších tahových charakteristik ze závislosti napětí/poměrné prodloužení za daných podmínek (12).

Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní rychlostí zkoušení do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí v tahu (zatížení) nebo protažení (poměrné prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení (12).

Výpočet tahového napětí

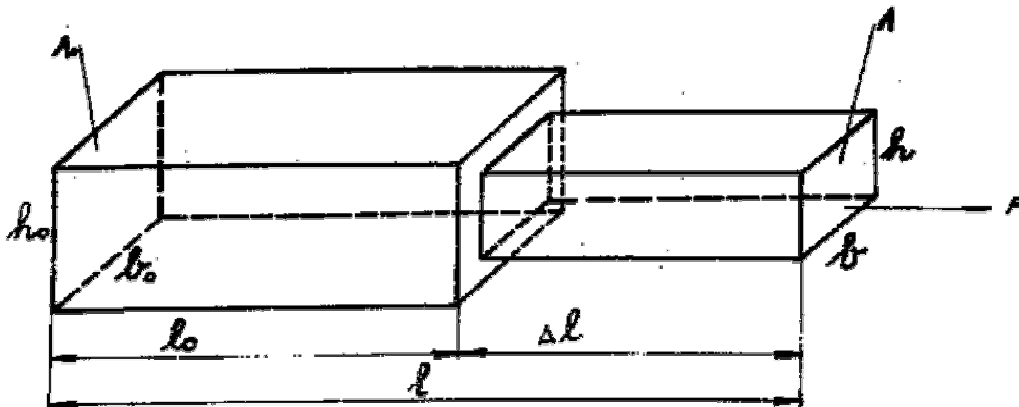
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (18)$$

Výpočet poměrného prodloužení

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (19)$$

Výpočet modulu pružnosti

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (20)$$



Obr. 11 Jednosměrná deformace tělesa tahem (15)

## 4.2 Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy

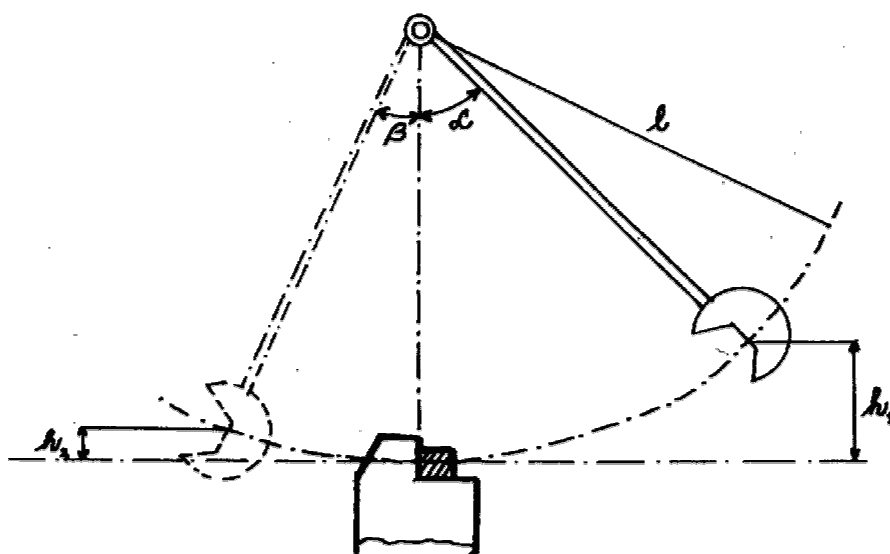
Metoda se používá ke zkoumání chování definovaných typů zkušebních těles za definovaných podmínek rázu a pro posouzení křehkosti či houževnatosti zkušebních těles v mezích daných podmínkami zkoušky (13).

Zkušební těleso umístěné vodorovně na podpěrách je přeraženo úderem rázového kyvadla, přičemž směr rázu je veden středem vzdálenosti mezi podpěrami (13).

Rázová houževnatost Charpy zkušebního tělesa bez vrubu  $a_{cU}$  je rázová energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa bez vrubu vztažená na původní průřez zkušebního tělesa (13).

Vypočítá se ze vztahu:

$$a_{cU} = \frac{W}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (21)$$



Obr. 12 Schéma Charpyho kladiva (15)

### 4.3 Stanovení tvrdosti podle Brinella - metoda vtlačení kuličky

Tvrdot vtláčením kuličky poskytuje informace vhodné pro výzkum a vývoj, kontrolu jakosti, přejímku či zamítnutí v rámci specifikací (14).

Tvrdot vtláčením kuličky je poměr zatížení působícího na měřicí kuličku k ploše povrchu vtláčení, způsobeného měřicí kuličkou po uplynutí specifikované doby působení zatížení. Postup spočívá ve vtláčení kuličky pod specifikovaným zatížením do povrchu zkušebního tělesa. Hloubka vtláčení se měří pod zatížením. Plocha povrchu vtláčení se vypočítá z jeho hloubky (14).

Tvrdot podle Brinella je vyhodnocována podle vztahu:

$$H_B = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi D h} \quad (22)$$

Průměr kuličky a zatížení jsou při zkoušce konstantní a proměnnou veličinou je jen hloubka vtisku  $h$ , která se odečítá pomocí výškového indikátoru (15).

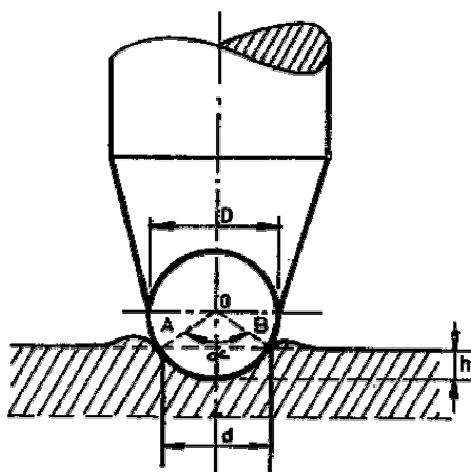
K výpočtu hodnoty tvrdosti se používá redukovaných hodnot  $F_r$  a  $h_r$  na hloubku vtisku 0,25 mm.

Hodnota tvrdosti se poté vypočítá:

$$H_B = \frac{1}{\pi D} \cdot \frac{F_r}{h_r} \quad (23)$$

kde

$$F_r = \frac{0,21}{h - h_r + 0,21} \cdot F_m \quad (24)$$



Obr. 13 Princip měření tvrdosti kuličkou (15)



## 5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je vyšetřit materiálové charakteristiky úhlové vodící desky potřebné pro numerickou aplikaci pomocí MKP. Následně sestavit její model v programu Samcef a aplikovat na něj takto získané hodnoty.

Na základě těchto výsledků pak porovnat naměřené hodnoty napětí s hodnotami získanými numerickým řešením pomocí MKP a vyhodnotit rozložení tenzoru deformace, napětí a chování kompozitu u bezpodkladnicového upevnění.

Výrobcem úhlových vodících desek je německá firma Vossloh, která k danému materiálu poskytuje jen velmi omezené informace jako je typ materiálu, výztuže a objemový podíl těchto fází.

Pro samotné konstrukční účely, sestavení modelu, numerickou aplikaci MKP a získání deformačních a napěťových parametrů to ani zdaleka nestačí. Abychom dostali adekvátní výsledky je nutno provést další experimentální měření a výpočty. V práci je postupováno podle následujících bodů:

- Naměření a vyhodnocení materiálových charakteristik úhlové vodící desky. Stanovení materiálových parametrů charakterizující ortotropní a izotropní materiál a potřebných pro numerický výpočet pomocí MKP.
- Sestavení diskrétního modelu úhlové vodící desky v programu Samcef, aplikace numerické metody pomocí MKP s následným grafickým vyobrazením deformačních a napěťových parametrů kompozitu.
- Vyhodnocení výsledků analýzy ortotropního a isotropního kompozitu. Porovnání hodnot napětí získaných experimentálně s hodnotami získanými numerickou metodou pomocí MKP.
- Vyhodnocení chování a vlastností úhlové vodící desky u bezpodkladnicového upevnění s návrhy pro další možné aplikace v praxi.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

### 6.1 Zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek

Pro stanovení tahových vlastností byla použita zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek. Zkušební tělesa byla vyrobena mechanickým obráběním z hotových výrobků (12).

Tvary a rozměry zkušebních těles předepisuje norma ČSN 64 0605 (15).

*Tab. VI Rozměry zkušebních těles pro tahové zkoušky (15)*

Rozměry [mm]	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Celková délka	115,0	75,0	50,0	35,0
Délka pracovní části	25,0±0,5	20,0±0,5	10,0±0,5	10,0±0,5
Šířka lopatek	25,0±2,0	12,5±1,0	8,5±1,0	6,0±0,5
Délka zúžené části	33,0±2,0	25,0±1,0	16,0±1,0	12,0±0,5
Šířka zúžené části	6,0±0,4	4,0±0,1	4,0±0,1	2,0±0,1
Přechodový poloměr vnější	14,0±1,0	8,0±0,5	7,5±0,5	3,0±0,1
Přechodový poloměr vnitřní	25,0±2,0	12,5±1,0	10,0±0,5	3,0±0,1

Nejpoužívanějším typem zkušebního tělesa je typ 2 s délkou 75 mm, pracovní částí 25 mm a šířkou 4 mm. Tento typ zkušebního tělesa byl také použit pro naše měření (12).

## 6.2 Zkušební tělesa ve tvaru trámečku

Zkušební tělesa ve tvaru trámečku byla použita pro stanovení hodnoty rázové houževnatosti metodou Charpy. Zkušební tělesa byla zhotovena mechanickým obráběním desek, které byly připraveny z hotových výrobků (13).

Tab. VII Typy a rozměry zkušebních těles (13, 15)

Typ zkušebního tělesa	Délka l [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	Vzdálenost podpěr [mm]
1	80±2	10,0±0,2	4,0±0,2	70
2	25h	10 nebo 15	3	70
3	(11 nebo 13)h	10 nebo 15	3	40

Pro naše měření byla použita zkušební tělesa typu 1.

## 6.3 Zkušební tělesa části desky ve tvaru hranolu

Pro stanovení tvrdosti podle Brinella byla použita zkušební tělesa části desky ve tvaru hranolu. Zkušební tělesa byla vyrobena mechanickým obráběním z hotových výrobků (14).

Rozměry zkušebních těles musí být dostačující pro minimalizaci vlivu okrajů na výsledek zkoušky a příslušné plochy musí být vzájemně rovnoběžné (14).

Pro naše účely byla použita zkušební tělesa o rozměrech 29,4 x 29,4 x 8,3 mm.

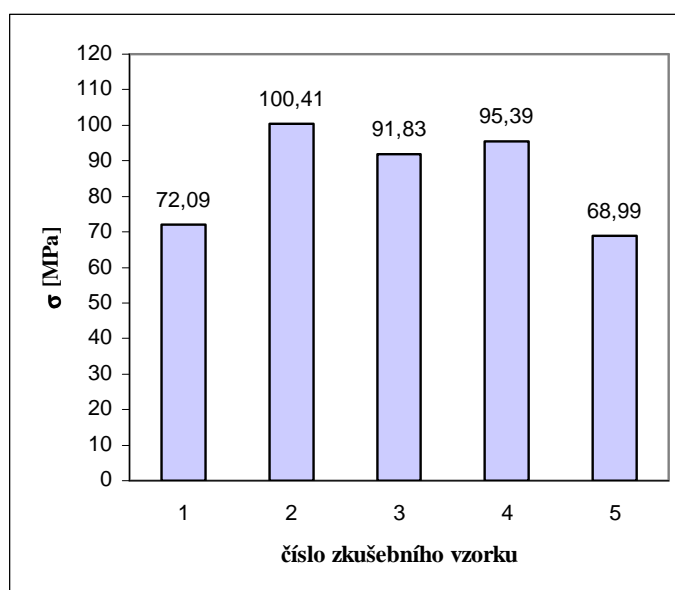
## 7 TAHOVÁ ZKOUŠKA

Zkušební těleso se vloží do trhacího stroje tak, aby bylo zabezpečeno symetrické upnutí rovnoběžných částí lopatek a aby byl tah rozložen rovnoměrně na příčný průřez tělesa. Po spuštění stroje automatický systém zaznamenává změny pracovní délky zkušebního tělesa a síly po celou dobu zkoušky. Zároveň umožňuje plynulé získání kompletní křivky napětí/poměrné prodloužení pro tuto zkoušku. Jmenovitá rychlost příčnicku s pohyblivou upínací čelistí byla 1 mm/min (12).

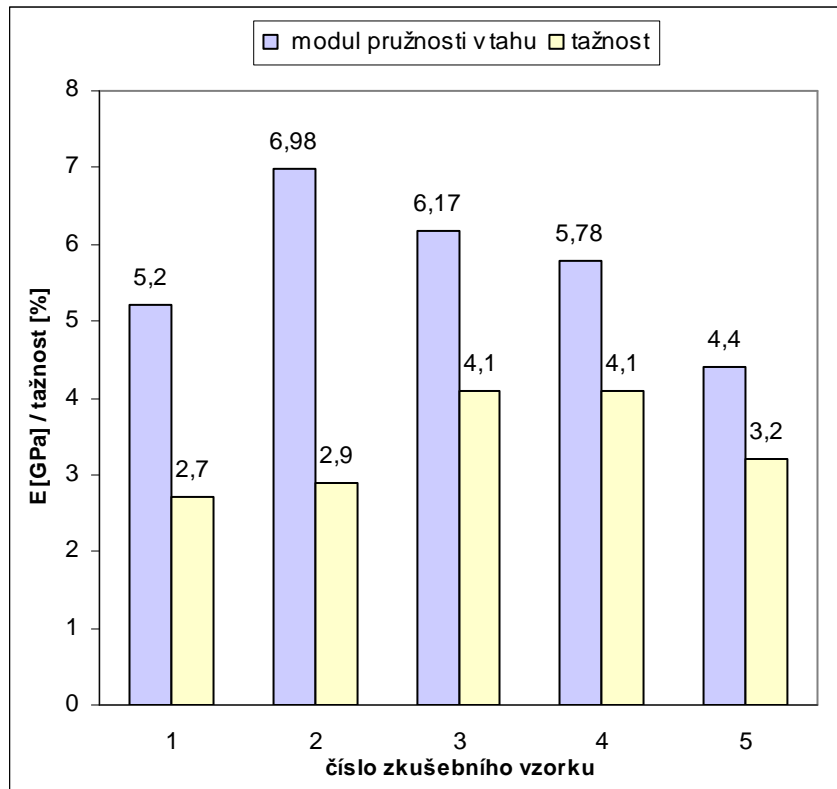
Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527-1 a celkem bylo měřeno 5 vzorků. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. VIII Naměřené hodnoty a výsledky tahové zkoušky

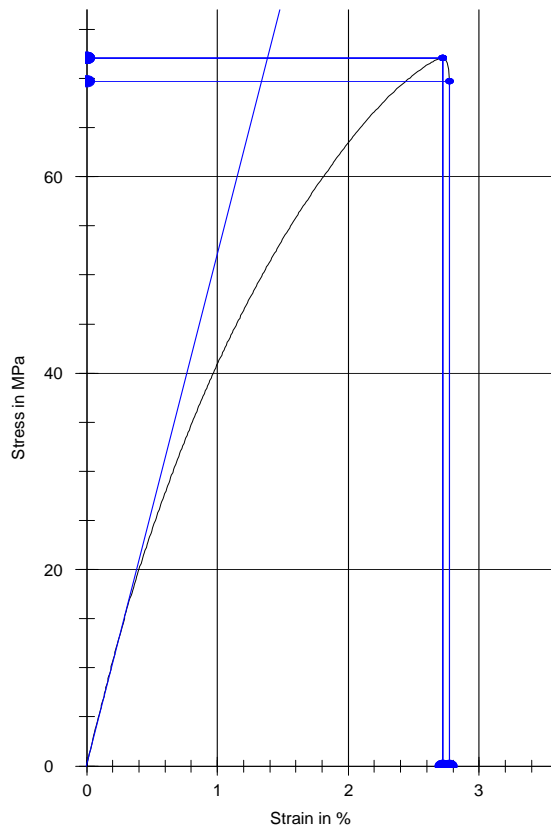
Číslo měření	$F_{\max}$ [kN]	$\sigma$ [MPa]	E [GPa]	$\epsilon$ [%]
1	1,41	72,09	5,20	2,7
2	1,98	100,41	6,98	2,9
3	1,83	91,83	6,17	4,1
4	1,98	95,39	5,78	4,1
5	1,34	68,99	4,40	3,2
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>1,71</b>	<b>85,74</b>	<b>5,71</b>	<b>3,4</b>
Směrodatná odchylka	0,14	6,32	0,44	0,3



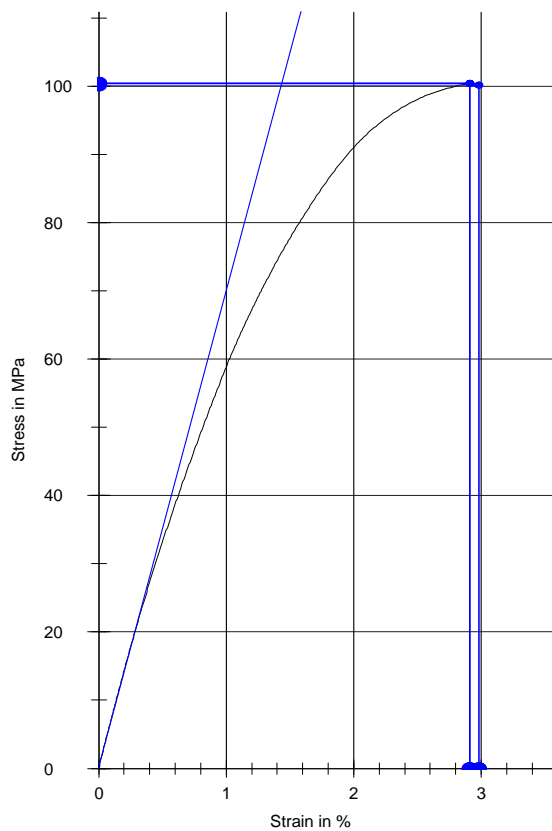
Obr. 14 Grafické znázornění pevností v tahu jednotlivých vzorků



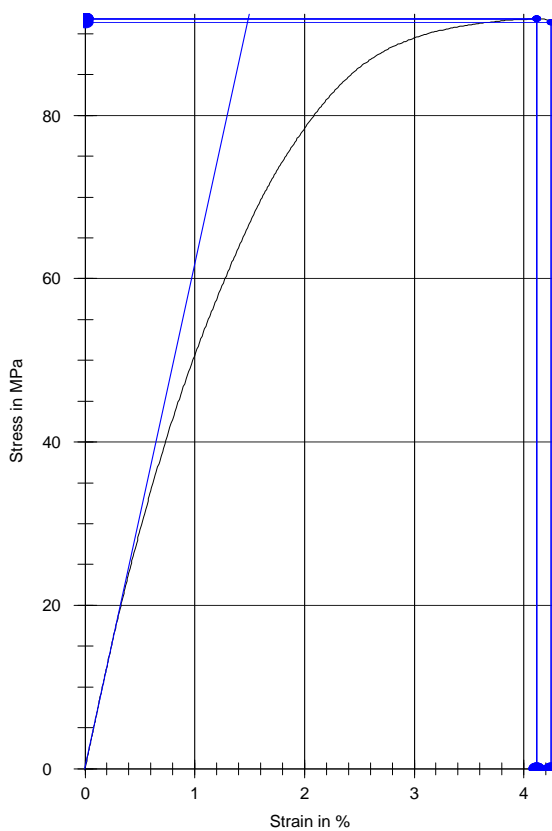
Obr. 15 Grafické porovnání modulů pružnosti a tažností jednotlivých vzorků



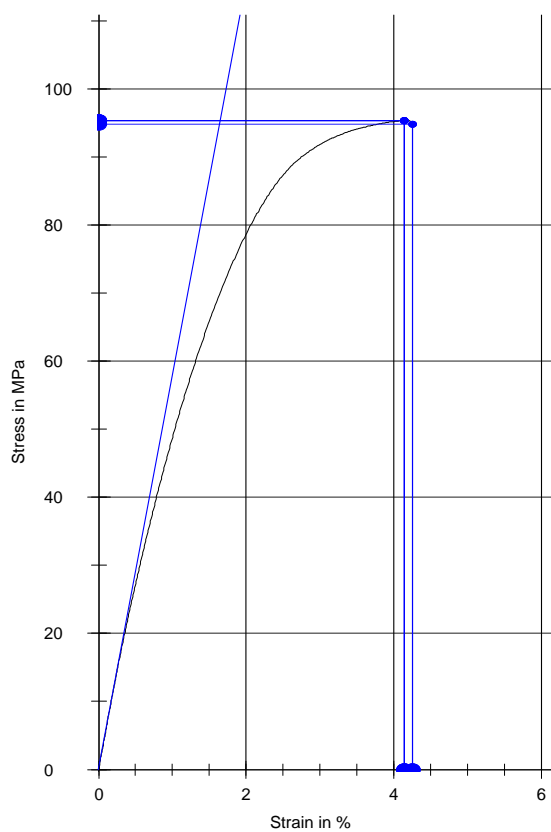
Obr. 16 Závislost křivky  $\sigma$ - $\epsilon$  pro vzorek č. 1



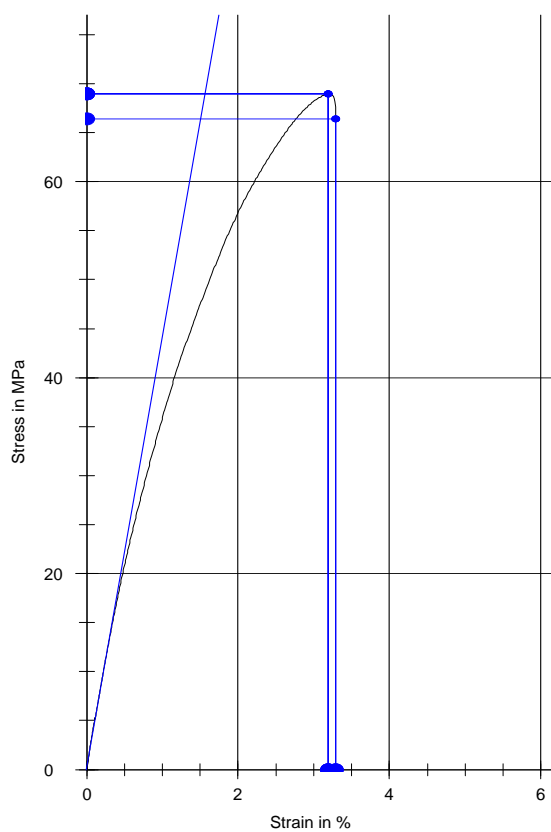
Obr. 17 Závislost křivky  $\sigma$ - $\varepsilon$  pro vzorek č. 2



Obr. 18 Závislost křivky  $\sigma$ - $\varepsilon$  pro vzorek č. 3



Obr. 19 Závislost křivky  $\sigma$ - $\varepsilon$  pro vzorek č. 4



Obr. 20 Závislost křivky  $\sigma$ - $\varepsilon$  pro vzorek č. 5



## 8 ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY

Zkušební těleso se umístí na podpěry stroje tak, aby břit kyvadla dopadal do středu zkušebního tělesa. Kyvadlo se uvolní, zaznamená se rázová energie absorbovaná zkušebním tělesem a zahrnou se nezbytné korekce na ztráty třením (13).

Zkouška byla provedena podle metody ISO 179/1e. Energie kyvadla činila 3,92 J a rychlost rázu  $2,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}(\pm 10\%)$ . Směr rázu byl veden na užší stranu zkušebních těles bez vrubu (13).

Celkem bylo zkoušeno 10 vzorků. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce.

*Tab. IX Naměřené hodnoty a výsledky rázové houževnatosti*

Číslo měření	h [mm]	b [mm]	W [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	4,2	10,2	3,1	73
2	4,2	10,1	3,2	75
3	4,2	10,2	2,9	68
4	4,2	10,1	2,9	69
5	3,8	10,1	2,9	75
6	4,0	10,0	2,8	71
7	4,1	9,9	2,8	70
8	3,9	10,0	2,5	65
9	4,1	9,8	2,9	73
10	4,0	10,0	2,8	71
Průměrná hodnota				71
Směrodatná odchylka				1
<b>Rázová houževnatost</b>				<b>(71±1) kJ/m<sup>2</sup></b>

## 9 ZKOUŠKA STANOVENÍ TVRDOSTI PODLE BRINELLA

Zkušební těleso se umístí na opěrnou desku tak, aby celé leželo na desce a aby plochy zkušebního tělesa byly kolmé ke směru použitého zatížení. Aplikuje se zkušební zatížení  $F_m = 358 \text{ N}$  po dobu 30 sekund tak, aby bod kontaktu měřící kuličky ležel minimálně 10 mm od okraje zkušebního tělesa. Po uplynutí 30 sekund působení zkušebního zatížení  $F_m$  se odečtou dílky na stupnici a vypočte hloubka vtačení  $h$  pod zatížením. Zkušební zatížení se vybere ze specifikovaných hodnot tak, aby dosažená hloubka vtačení ležela v rozmezí 0,15 až 0,35 mm (14).

Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 2039-1. Na pěti vzorcích bylo uskutečněno celkem 10 měření. Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab.X Naměřené hodnoty a výsledky tvrdosti podle Brinella

Číslo měření	Počet dílků / 30 s	h [mm]	H <sub>B</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
1	89,0	0,180	137
2	88,5	0,175	142
3	75,0	0,150	174
4	84,5	0,170	147
5	75,5	0,150	174
6	86,0	0,170	147
7	89,5	0,180	137
8	87,0	0,175	142
9	86,5	0,175	142
10	87,5	0,175	142
Průměrná hodnota	148		
Směrodatná odchylka	4		
<b>Tvrdość podle Brinella</b>	<b>(148±4) N/mm<sup>2</sup></b>		

## 10 VLASTNOSTI KOMPOZITU ÚHLOVÉ VODÍCÍ DESKY

Výztuž úhlové vodící desky tvoří krátká skleněná vlákna. Při formovacím procesu vstřikováním mohou být tyto vlákna orientována nahodile nebo vykazovat výraznou orientaci ve směru toku materiálu.

V případě nahodilé orientace vláken se bude kompozit chovat jako izotropní materiál.

V případě výrazné orientace vláken ve směru toku se bude kompozit chovat jako ortotropní materiál.

I když jsou vstřikované krátkovláknové kompozity vyráběny zejména proto, aby se dosáhlo izotropních vlastností, tak zkoumané lomové plochy po tahové zkoušce vykazovaly u většiny vzorků výraznou orientaci vláken kolmo na směr zatížení.

Je obtížné určit, zda-li je tato výrazná orientace vláken v celém objemu kompozitu stejná nebo byla koncentrována jen v místech, ze kterých byly získány jednotlivé vzorky.

Na základě toho budou uvažovány a analyzovány 2 modely úhlové vodící desky, kde první model bude reprezentovat ortotropní a druhý isotropní materiál. Na každý model budou aplikovány odpovídající materiálové charakteristiky.

### 10.1 Výpočet hodnot charakterizující ortotropní materiál úhlové vodící desky

Parametry potřebné pro charakterizaci ortotropního materiálu a numerickou aplikaci pomocí MKP tvoří:  $\nu$ ,  $E_L$ ,  $E_T$ ,  $G_L$  a  $G_T$ .

Poissonův poměr  $\nu$  se vypočítá z rovnice (17). Objemový podíl vláken a matrice udává výrobce, proto

$$V_f = 30 \%$$

$$V_m = 70 \%$$

Číselné hodnoty Poissonova poměru skleněného vlákna (E-skla) a matrice (PA 6) se uvažují následovně (8, 11, 16)

$$v_f = 0,23$$

$$v_m = 0,33$$

Hodnotu podélného modulu v tahu  $E_L$  lze získat podle Halpina a Tsaie z rovnice (11).

Pro výpočet byly uvažovány hodnoty modulů v tahu matrice (PA 6) a výztuže (E-skla) (8, 16, 17)

$$E_m = 2,85 \text{ GPa}$$

$$E_f = 72,4 \text{ GPa}$$

a geometrické parametry vlákna

$$l = 0,8 \text{ mm}$$

$$d = 10 \text{ }\mu\text{m}$$

Na základě orientace vláken v lomové ploše u většiny zkušebních vzorků byla hodnota modulu v tahu úhlové vodící desky uvažována jako hodnota transversálního modulu  $E_T$ . Prakticky změřená hodnota transversálního modulu  $E_T$  byla ověřena teoretickými vztahy Halpina a Tsaie podle rovnice (12). Teoreticky vypočítaný modul  $E_T$ , který činil 5,97 GPa, se lišil od prakticky změřeného modulu  $E_T$  o 4,4 %.

Z důvodu geometrických rozměrů úhlové vodící desky nebylo možné dle normy vytvořit zkušební tělesa ve směru orientace vláken a změřit tak hodnotu longitudálního modulu  $E_L$ . Tento byl spočítán na základě vztahů Halpina a Tsaie podle rovnice (11) a byl roven 21,7 GPa.

Hodnoty smykových modulů  $G_L$ ,  $G_T$  byly vyčísleny z hodnot  $E_L$ ,  $E_T$  podle vztahu (16).

*Tab.XI Hodnoty charakterizující ortotropní materiál úhlové vodící desky*

Parametry	$E_L$ [GPa]	$E_T$ [GPa]	$G_L$ [GPa]	$G_T$ [GPa]	$\nu$
Hodnoty	21,70	5,71	8,35	2,20	0,30

Pro aplikaci těchto hodnot na ortotropní model kompozitu byly na základě tahových zkoušek uvažovány hodnoty  $E_T$ ,  $G_T$  ve směrech os  $X$ ,  $Z$  a hodnoty  $E_L$ ,  $G_L$  ve směru osy  $Y$ .

## 10.2 Stanovení hodnot charakterizující isotropní materiál úhlové vodící desky

Jak již bylo uvedeno dříve, nedá se s jistotou tvrdit, že orientace vláken je v celém objemu úhlové vodící desky stejná.

Isotropní materiál má ve všech směrech svých hlavních os stejné vlastnosti, proto hodnoty potřebné pro jeho charakterizaci a numerickou aplikaci pomocí MKP tvoří  $E$  a  $\nu$ .

Hodnota modulu  $E$  byla změřena při tahové zkoušce a Poissonův poměr  $\nu$  spočítán z rovnice (17).

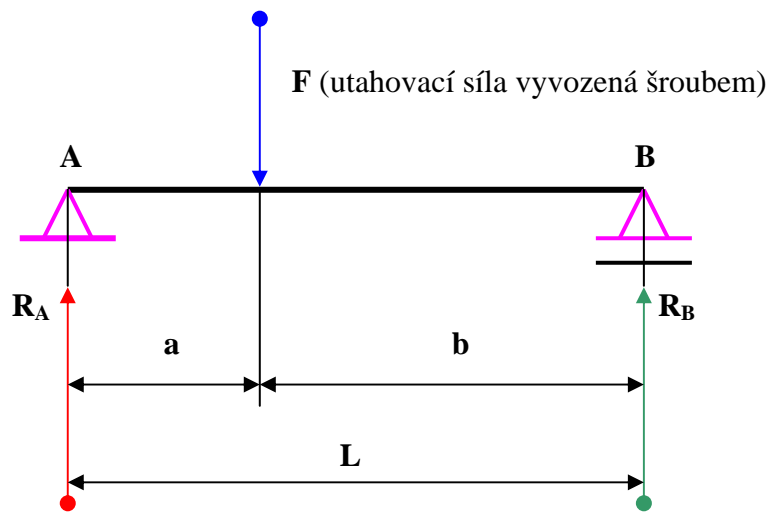
*Tab.XII Hodnoty charakterizující isotropní materiál úhlové vodící desky*

<b>Parametry</b>	<b>E [GPa]</b>	<b><math>\nu</math></b>
Hodnoty	5,71	0,30

## 11 STANOVENÍ ZATĚŽUJÍCÍCH SIL ÚHLOVÉ VODÍCÍ DESKY

Úhlová vodící deska je zatěžována pracovními rameny pružné svěrky Skl 14. Přítlačná síla jedné svěrky se pohybuje v rozmezí 9-11 kN (7).

Pro celkové zatížení byla zvolena hodnota 11 kN. Pružná svěrka Skl 14 se dotýká a působí na úhlovou vodící desku ve 4 oblastech podle obr. 2 a 3. Výsledné síly působící v těchto místech byly stanoveny z poměru vzdáleností a celkové síly podle obr. 21.



Obr. 21 Rozložení sil na nosníku imitující úhlovou vodící desku

a spočítány z následujících vztahů

$$R_A = \frac{F \cdot b}{L} \quad (25)$$

$$R_B = \frac{F \cdot a}{L} \quad (26)$$

kde

$$F = 11 \text{ kN}$$

$$a = 13,4 \text{ mm}$$

$$b = 33,5 \text{ mm}$$

$$L = 46,9 \text{ mm}$$

Reakce síly v místě  $R_A$  tak činí 7,9 kN a v místě  $R_B$  3,1 kN.

Úhlová vodící deska byla zatížena v uzlových bodech sítě konečných prvků. Zatěžující síla v místě A byla aplikována do 198 uzlových bodů a každý uzlový bod byl zatížen silou 40 N. V místě B byla síla rozložena do 24 uzlových bodů a na každý uzlový bod připadá síla 130 N (viz obr. 29).

## 12 APLIKACE METODY KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP) PRO ŘEŠENÍ ÚLOHY NAPJATOSTI ÚHLOVÉ VODÍCÍ DESKY

### 12.1 Teoretický úvod

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda, jejímž matematickým základem je diskretizace úlohy. Ta spočívá v rozdělení zkoumané spojité oblasti na konečný počet podoblastí, stručně nazývané konečnými prvky. Jednotlivé konečné prvky jsou spolu spojeny v uzlových bodech. V současné době je to nejrozšířenější a nejpoužívanější metoda pro řešení úloh mechaniky kontinua (23, 25).

Její nejrozšířenější variantou je deformační metoda používající tzv. Lagrangeovských konečných prvků. Tato varianta vychází z Lagrangeova variačního principu minima celkové potenciální energie soustavy (těleso + jeho zatížení), resp. jeho vnějších a vnitřních sil. Matematicky je princip formulovaný rovnicí

$$\Pi = \Pi_i + \Pi_z = \min \quad (27)$$

kde

$\Pi$  = celková potenciální energie

$\Pi_i$  = deformační energie vnitřních sil tělesa

$\Pi_z$  = práce vnějších sil

Tento princip znamená, že ze všech kinematicky přípustných stavů pružného tělesa nastává takový stav, pro který nabývá potenciální energie systému minimální hodnotu (18).

Celkovou potenciální energii elementu pro spojité třídídimenzionální těleso rozdělené do  $m$  elementů lze vyjádřit vztahem

$$\Pi = \sum_{e=1}^m \Pi^e - \{d\}^T \{f\} \quad (28)$$

kde

$$\Pi^e = \Lambda^e - W_0^e - W_p^e \quad (29)$$

V maticovém tvaru lze energetický funkcionál pro element  $e$  zapsat ve tvaru



$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} [d]^e \left( \int_V [B]^T [D] [B] dV \right)^e \{d\}^e - \\ & - [d]^e \left( \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_T\} dV + \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{Bmatrix} dV + \int_\Gamma [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\Gamma \right)^e \end{aligned} \quad (30)$$

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \partial \Pi^e(u, v, w) = 0 \quad (31)$$

V rovnici první a druhý integrál představují potenciální energii přetvoření, třetí integrál představuje práci vykonanou objemovými silami a poslední integrál práci vykonanou rovnoměrným zatížením na povrchu oblasti  $\Gamma$ . Pro rovnováhu systému nabývá potenciální energie minima, tzn. že první variace energetického potenciálu

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \partial \Pi^e(u, v, w) = 0 \quad (32)$$

Matematickými úpravami předcházejících rovnic se dostane tvar tzv. matice tuhosti elementu ve tvaru

$$[k]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (33)$$

kde  $[B]$  je transformační matice a matice  $[D]$  je maticí fyzikálních konstant. Po dalších provedených úpravách se dostane standardní tvar rovnice statické analýzy pro element v následujícím tvaru

$$[k]^e \{d\}^e = \{f\}^e \quad (34)$$

kde vektor zobecněných posuvů

$${}^T [d]^e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \ u_r \ v_r \ w_r] \quad (35)$$

a vektor zatížení v uzlech je

$${}^T \{f\}^e = [\{f\}^1 \ \{f\}^2 \ \dots \ \{f\}^r] \quad (36)$$

kde  $r$  je počet uzlů na elementu.

Rovnice celého systému pro diskretizované těleso s  $m$  uzly musí zahrnovat rovnice všech uzlů a má tvar

$$[K] \{d\} = \{f\} \quad (37)$$

kde

$[K]$  = matice tuhosti pro celý systém

$\{d\}$  = vektor uzlových posunutí pro celý systém

$\{f\}$  = vektor výsledných sil v uzlech

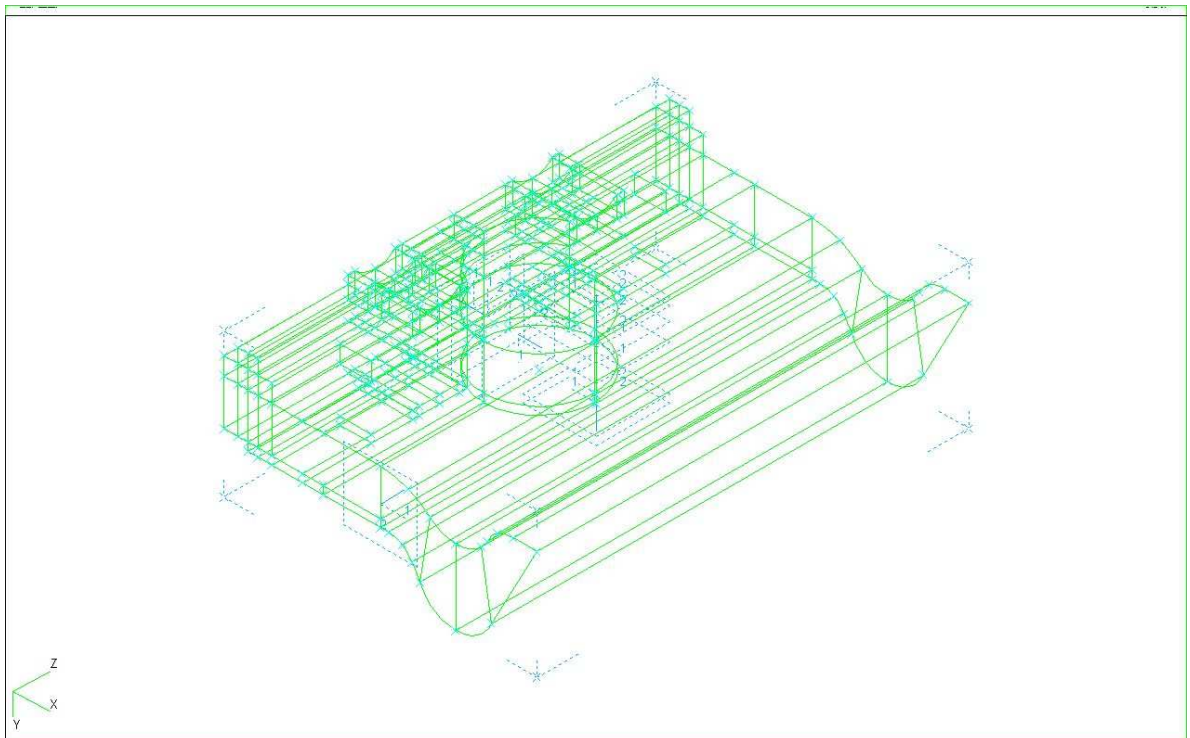
Výsledná rovnice pro výpočet tenzoru napětí v závislosti na posuvech a počátečních přetvořeních bez uvažování počátečních teplotních napětí se může zapsat jako

$$\{\sigma\} = [D] [B] \{d\} \quad (38)$$

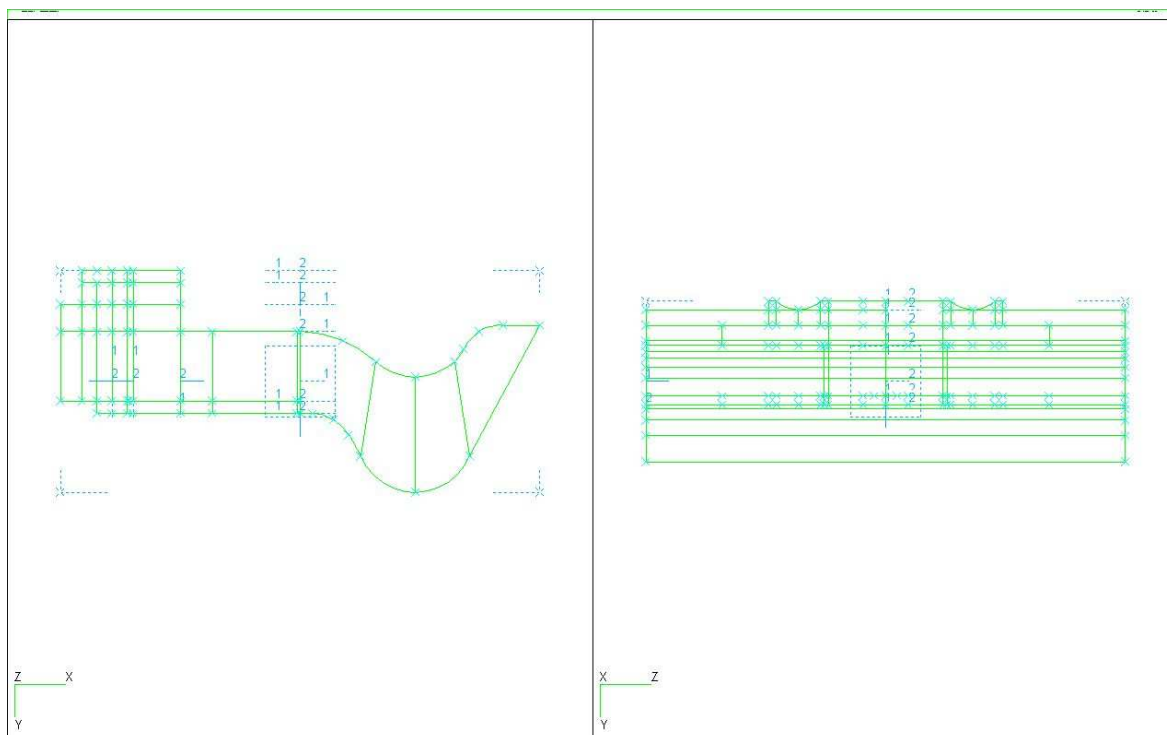
V případě, že existují počáteční napětí je nutné je superponovat (18, 20, 21, 25).

## 12.2 Numerické řešení s praktickou aplikací

MKP byla aplikována pro analýzu napjatosti úhlové vodící desky Wfp 14K. Výpočet byl proveden pro ortotropní i isotropní materiálové charakteristiky. Základní geometrie kompozitu je podle obr. 22 a 23.

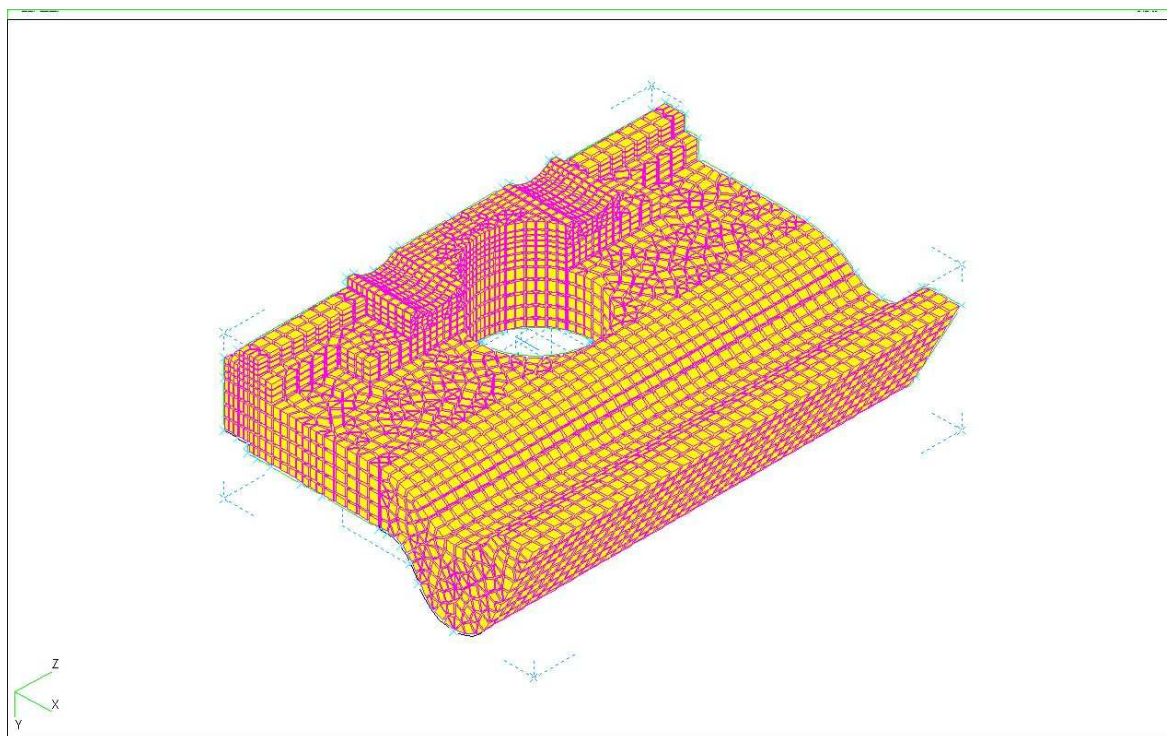


Obr. 22 Základní geometrie úhlové vodící desky

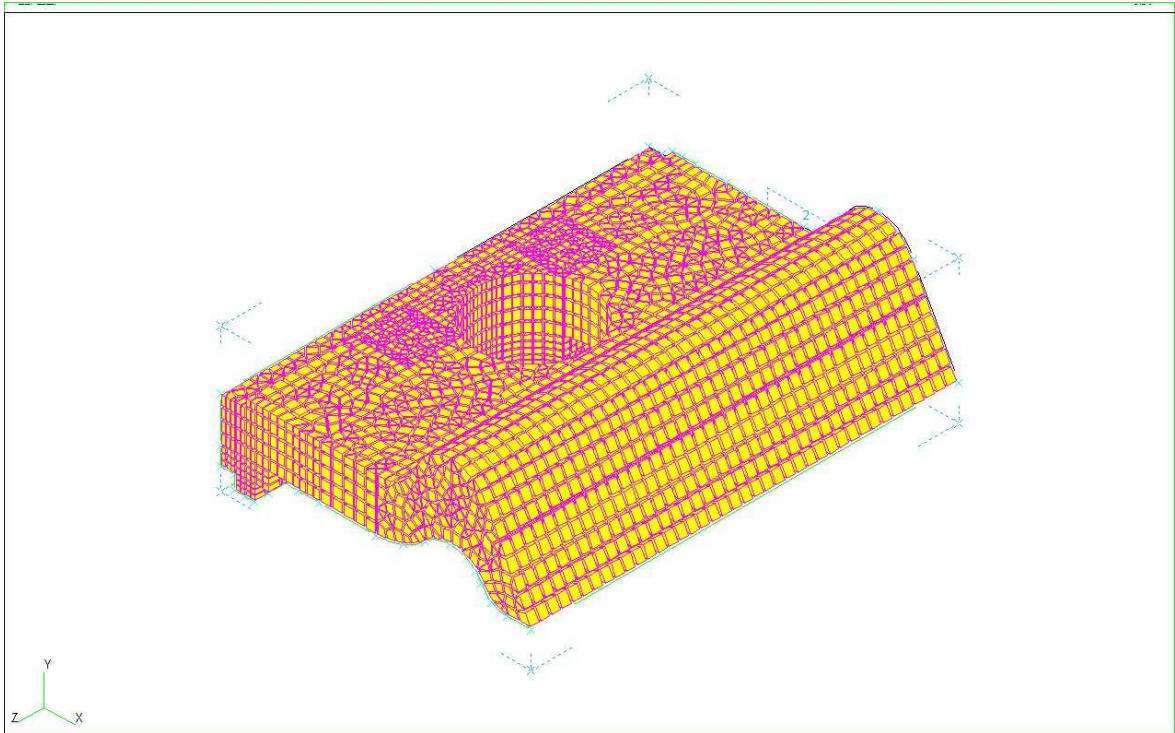


Obr. 23 Základní geometrie úhlové vodící desky v pohledu osy Z a osy X

Následující obrázky představují ve dvou pohledech rozdělení struktury úhlové vodící desky do sítě konečných prvků.

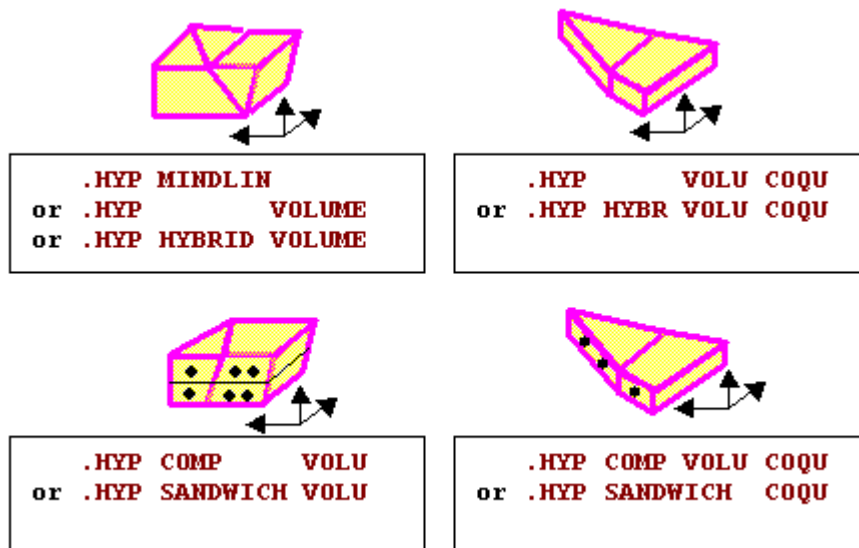


Obr. 24 Základní síť konečných prvků-vrchní část kompozitu



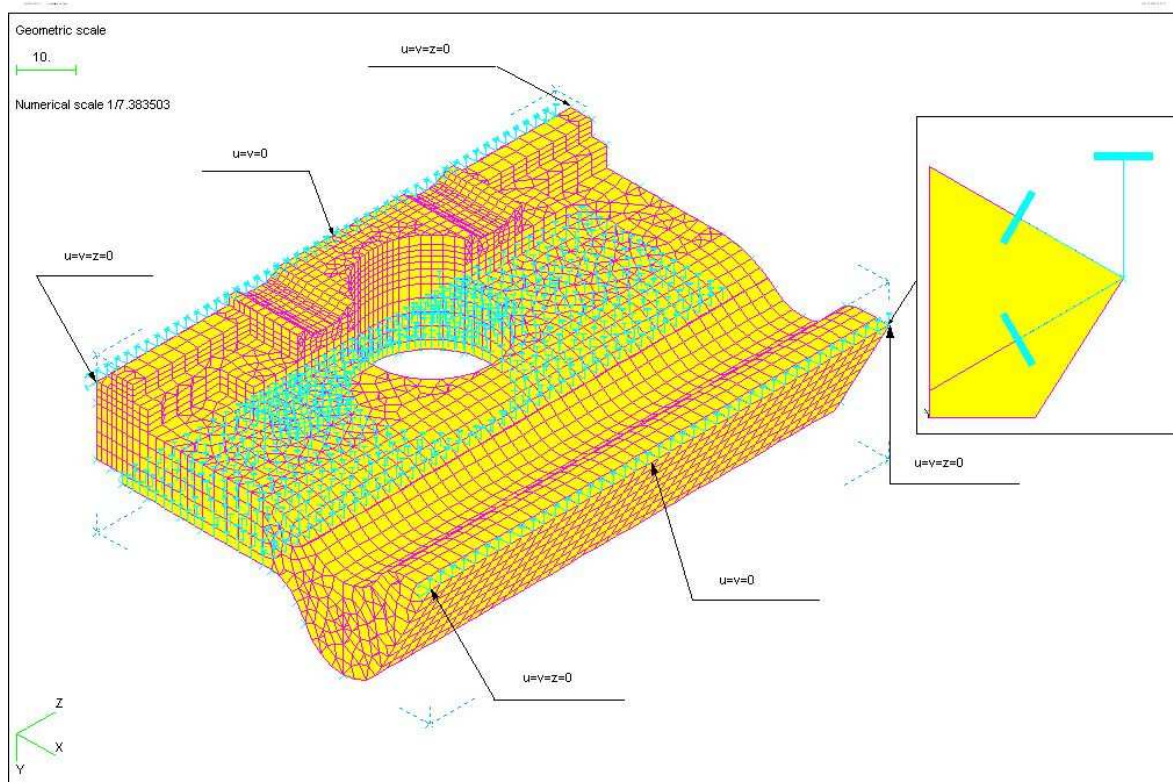
Obr. 25 Základní síť konečných prvků-spodní část kompozitu

Pro řešení byly použity objemové kompozitní prvky 8 a 46 z knihovny programu Samcef.

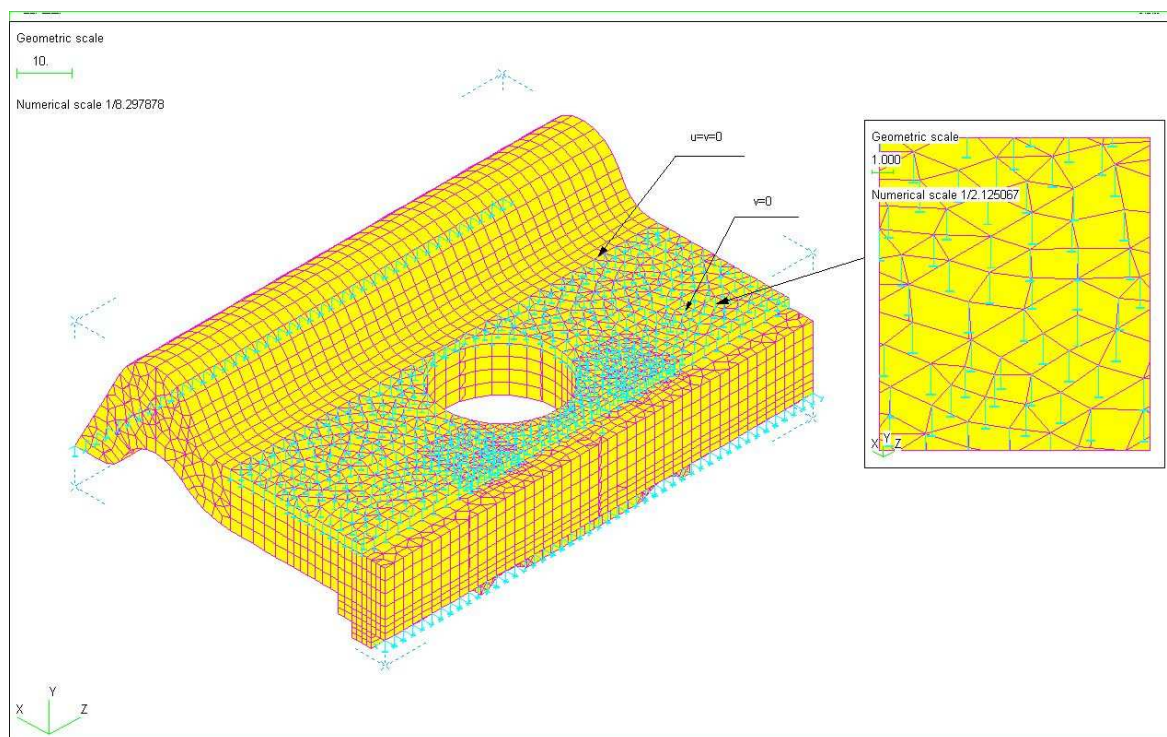


Obr. 26 Prismový objemový prvek 46-vlevo a tetra objemový prvek 8-vpravo (24)

Okrajová úloha je řešena pro zadané okrajové podmínky podle obr. 27, 28 a zvolena tak, aby simulovala skutečné upevnění úhlové vodící desky v železniční konstrukci.

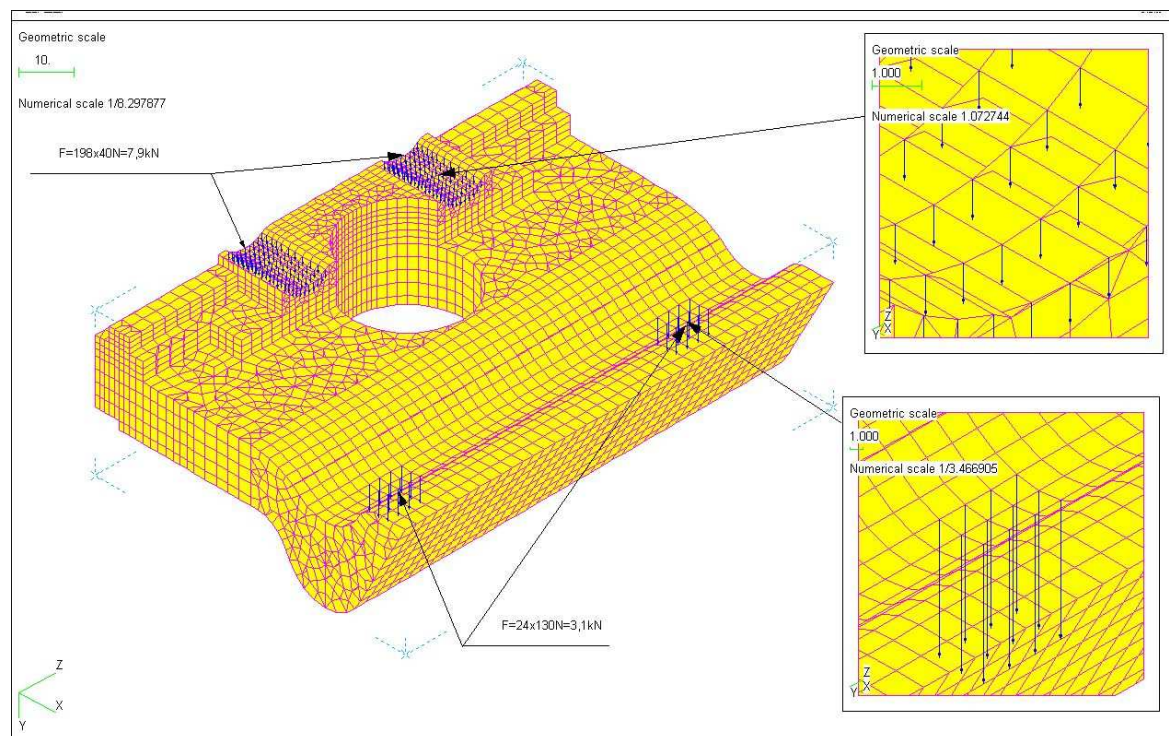


Obr. 27 Okrajové podmínky v horní části kompozitu



Obr. 28 Okrajové podmínky ve spodní části kompozitu

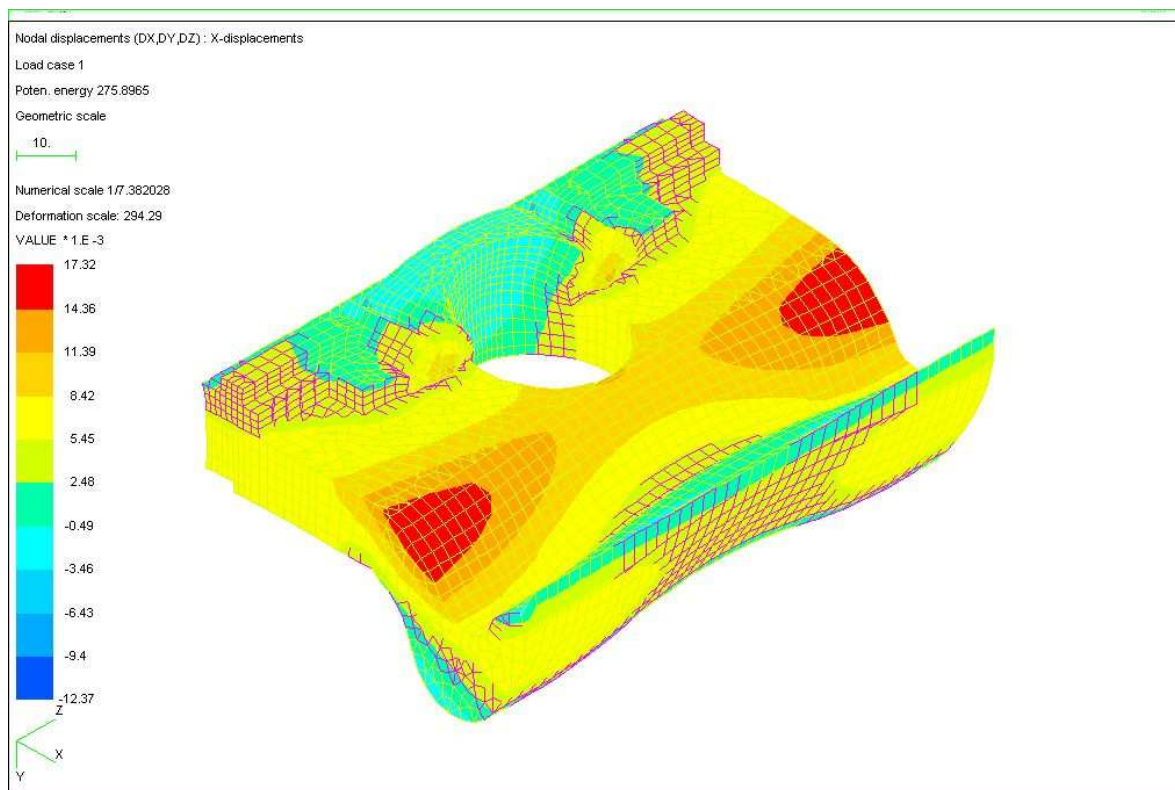
Úhlová vodící deska je prostřednictvím pružné svěrky Skl 14 zatížena rozloženými reakčními silami podle obr. 21 v místech dotyku od celkové upínací síly 11 kN.



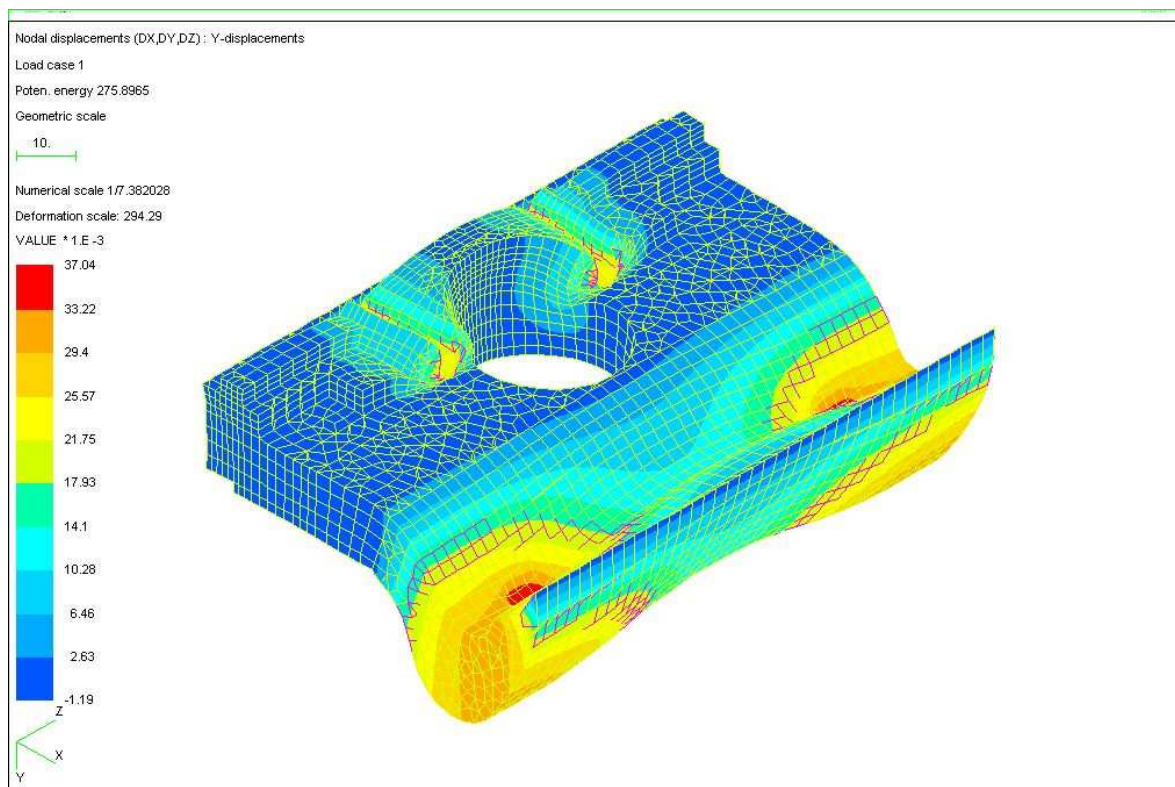
Obr. 29 Velikosti zatížení úhlové vodící desky

Výstupem v postprocesoru programu Samcef je grafické rozložení tenzoru deformace a napětí v celém objemu úhlové vodící desky.

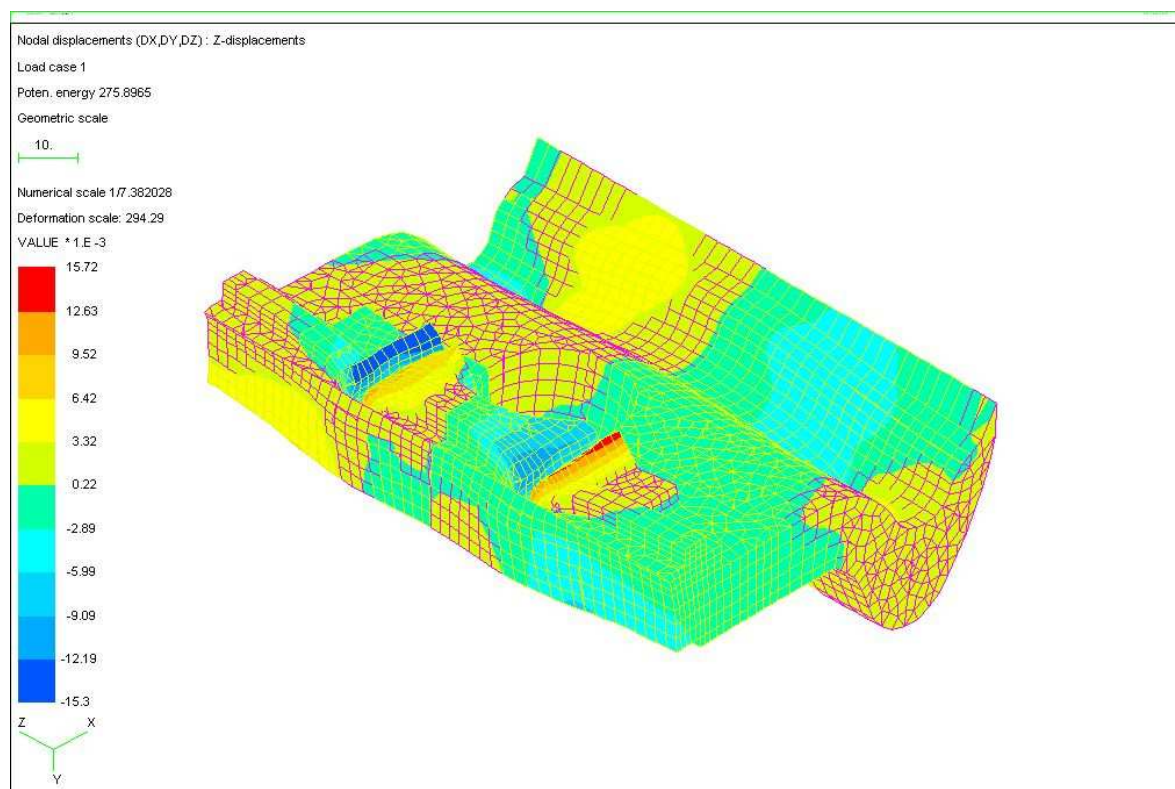
### 12.3 Výsledky numerické analýzy pro ortotropní těleso úhlové vodící desky



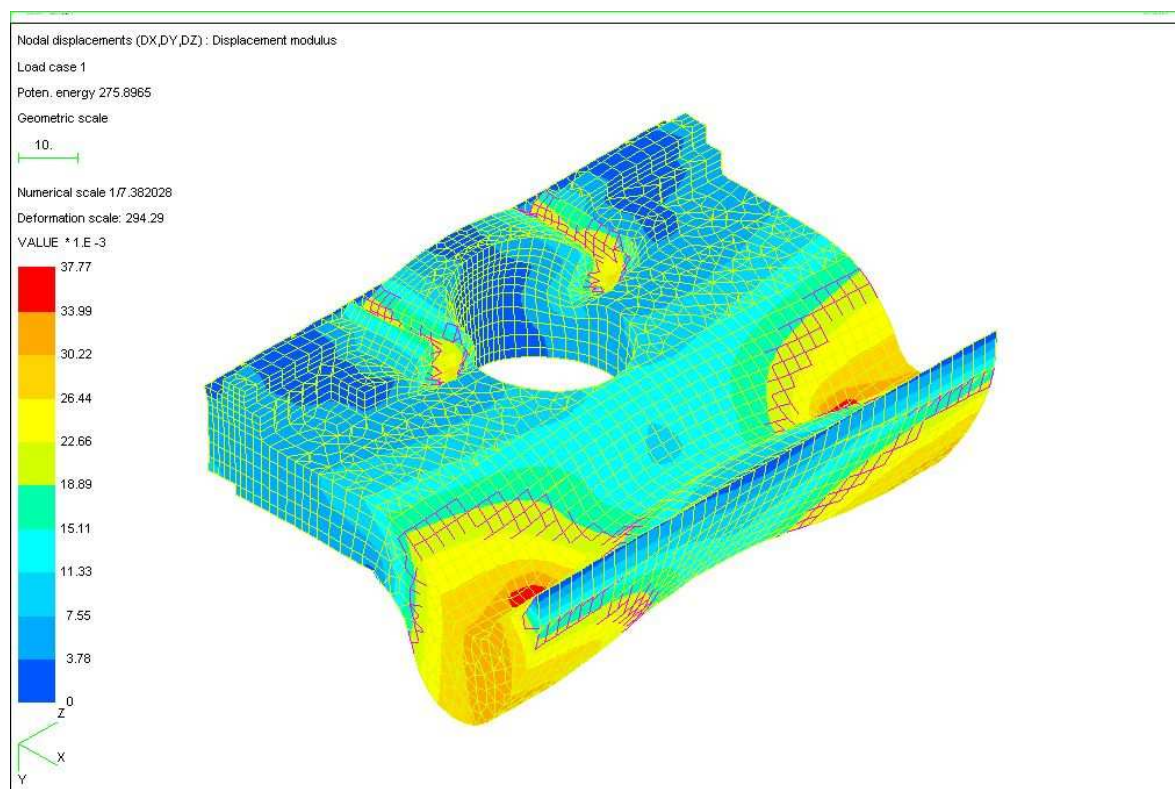
Obr. 30 Deformace ortotropního kompozitu po zatížení v ose X



Obr. 31 Deformace ortotropního kompozitu po zatížení v ose Y

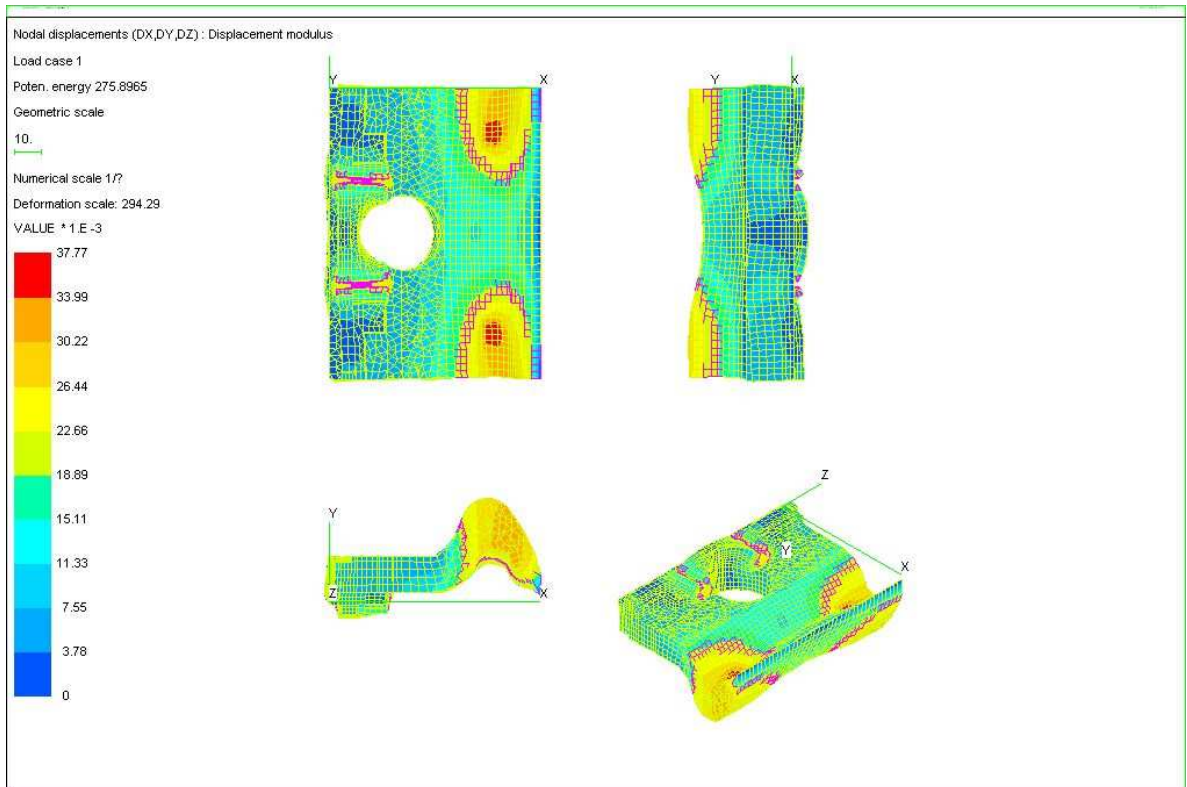


Obr. 32 Deformace ortotropního kompozitu po zatížení v ose Z

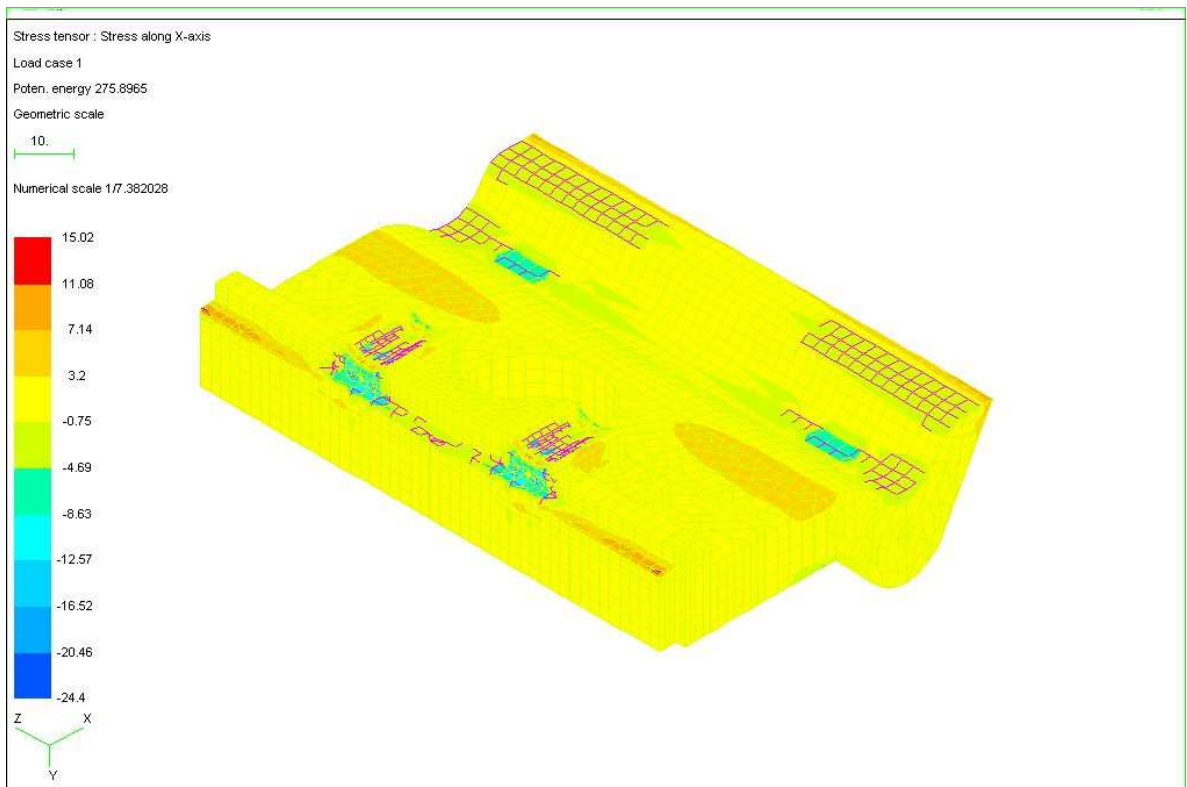


Obr. 33 Celková deformace ortotropního kompozitu po zatížení

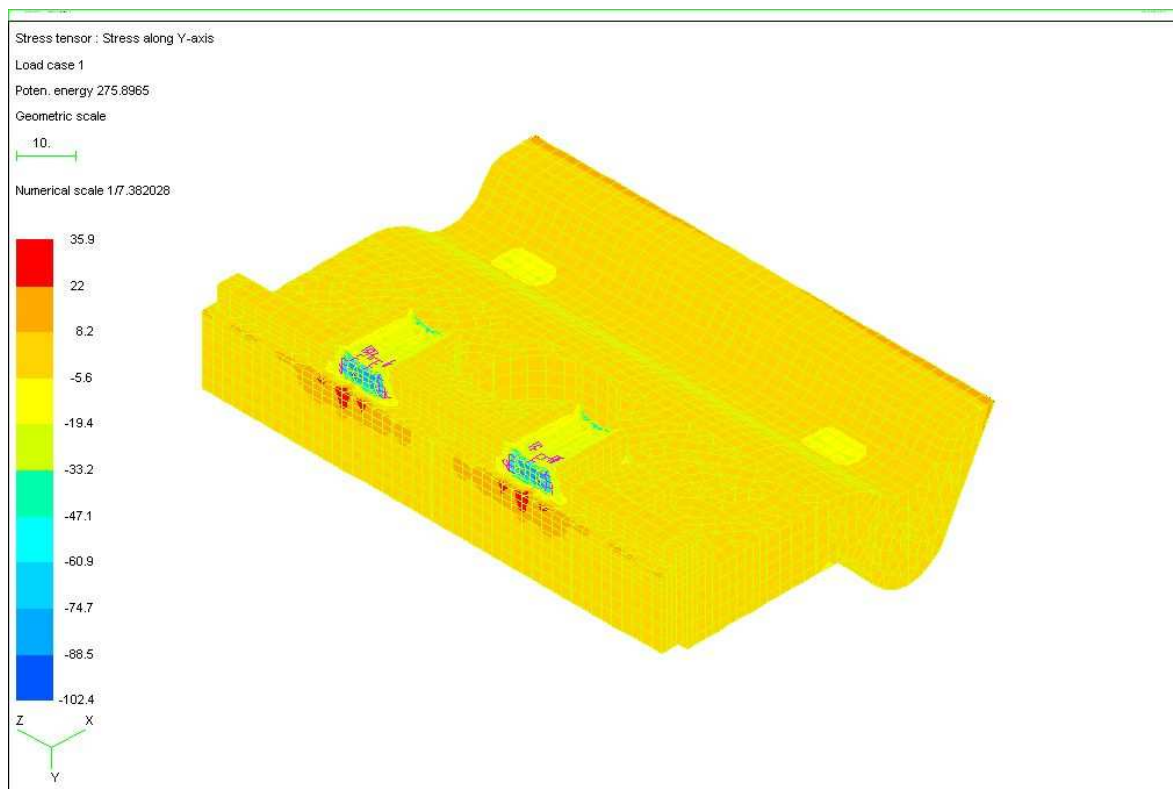




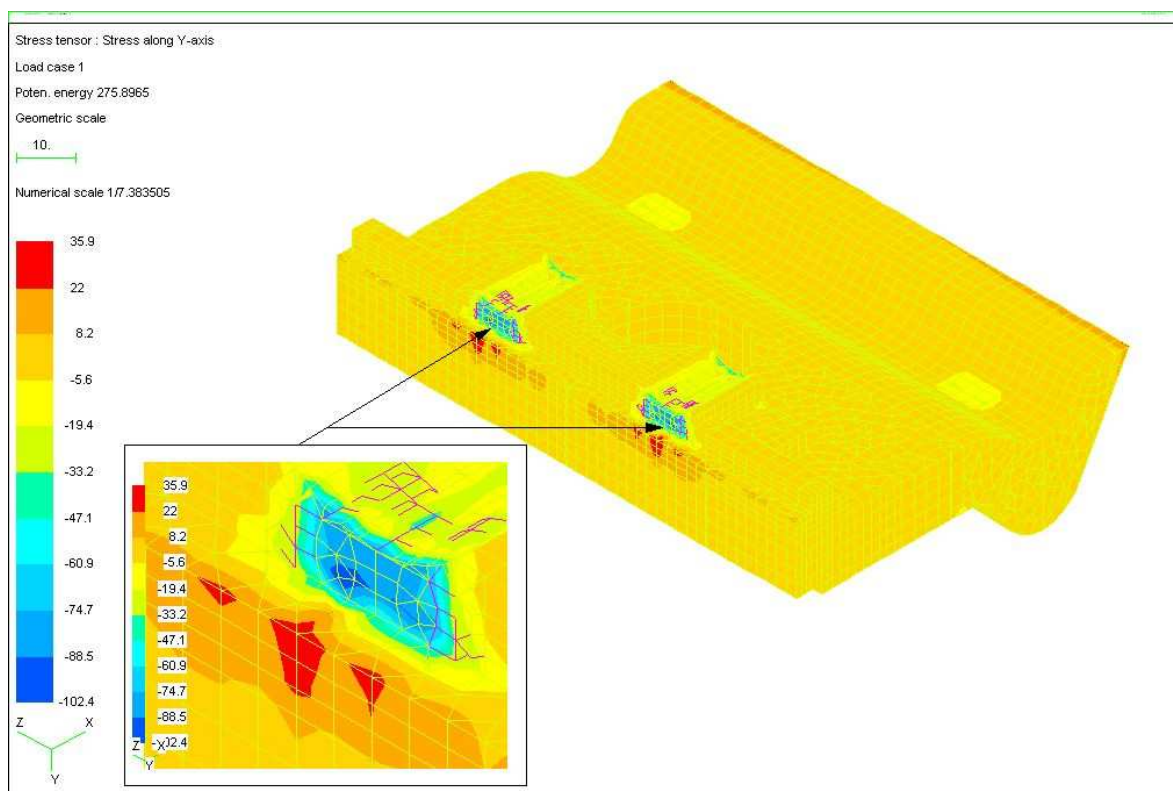
Obr. 34 Deformace ortotropního kompozitu v axonometrickém pohledu a v jednotlivých rovinách



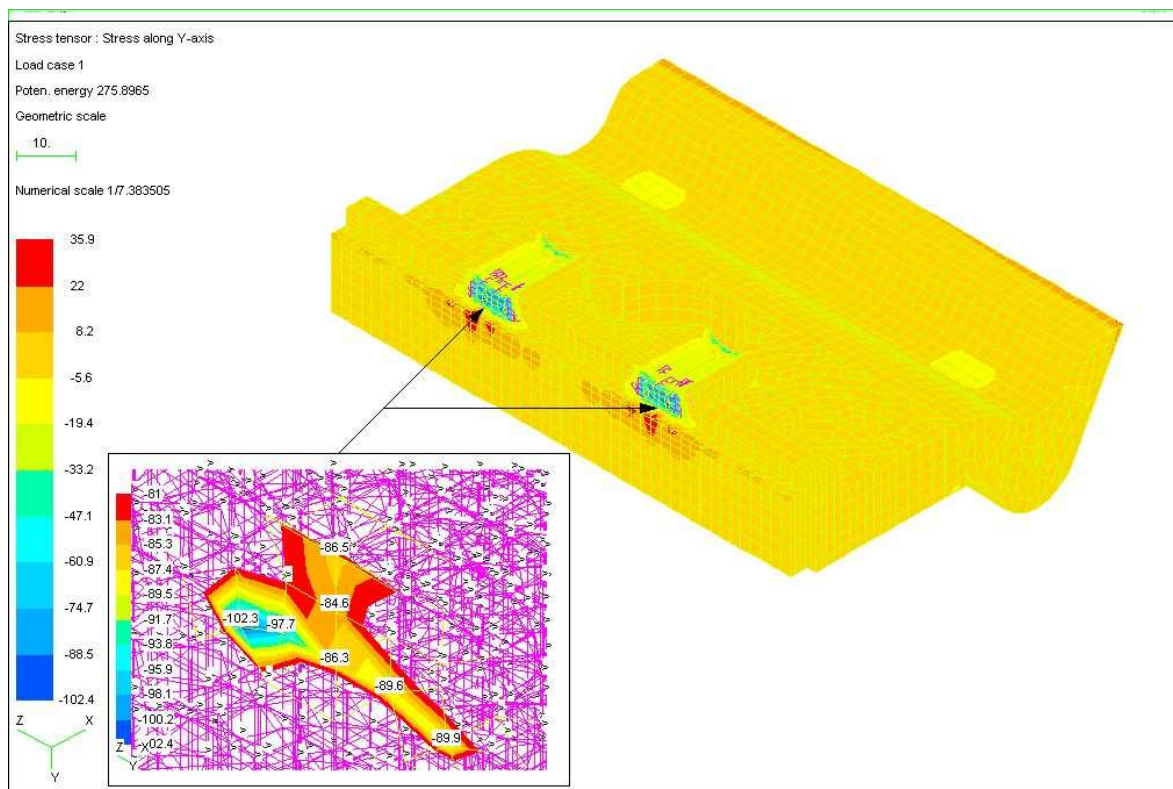
Obr. 35 Velikosti napětí ortotropního kompozitu v ose X



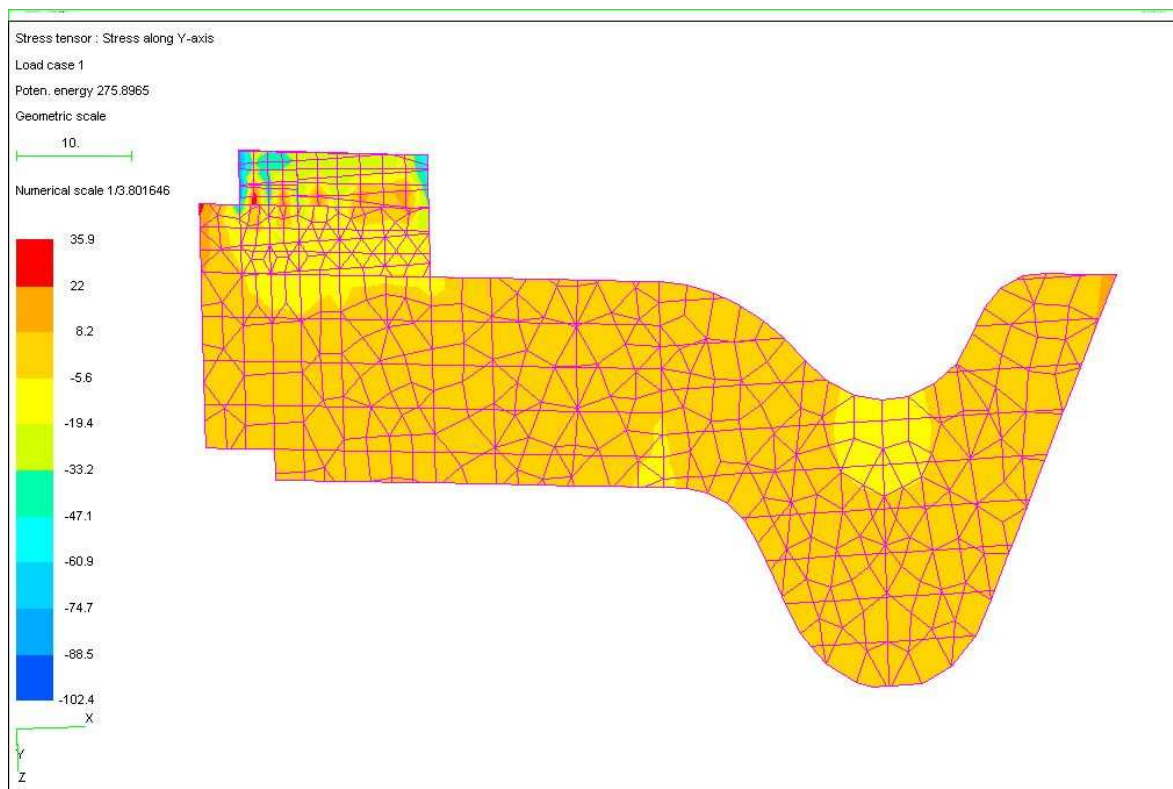
Obr. 36 Velikosti napětí ortotropního kompozitu v ose Y



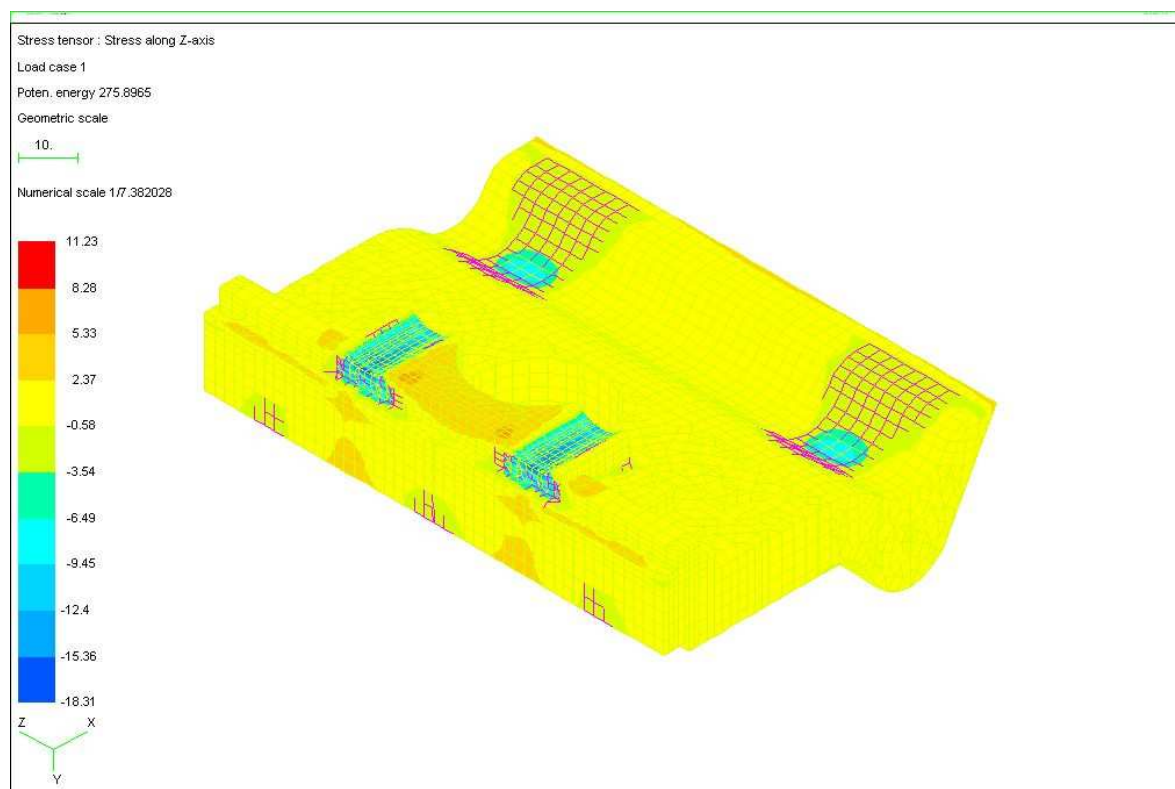
Obr. 37 Výřez oblasti největších napětí ortotropního kompozitu



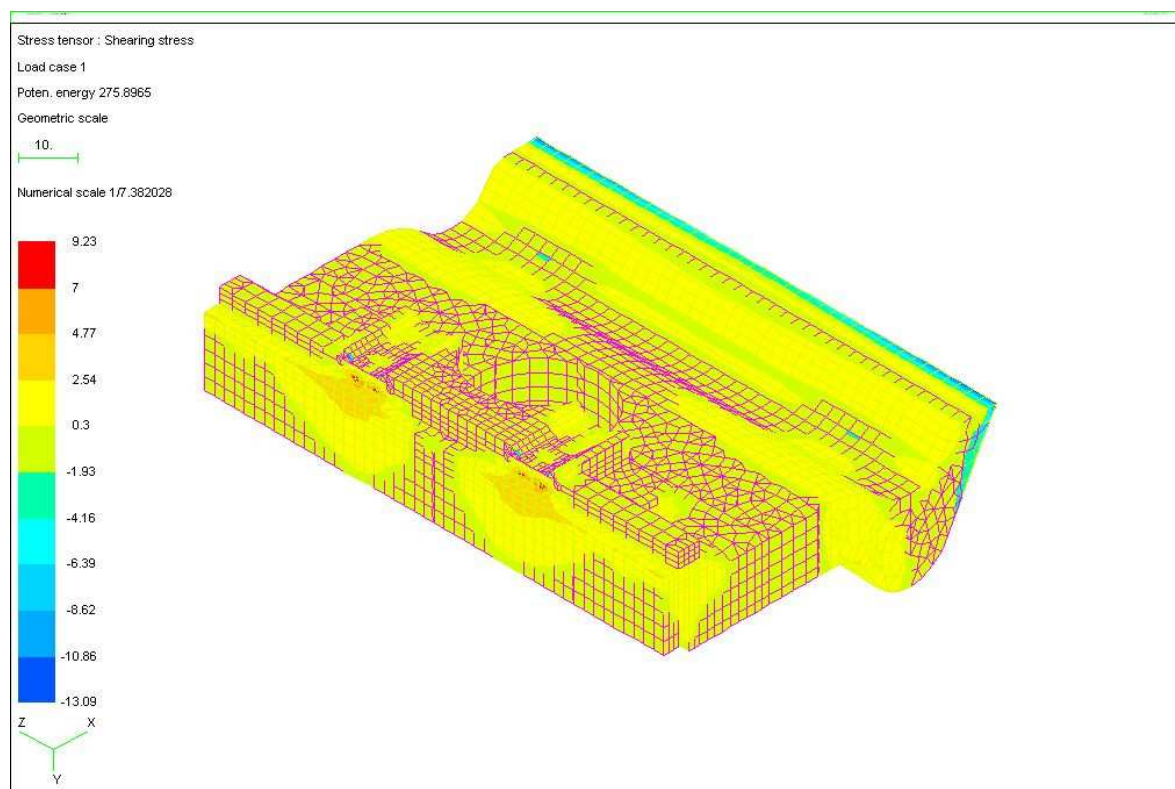
Obr. 38 Špičky napětí ortotropního kompozitu s numerickými hodnotami



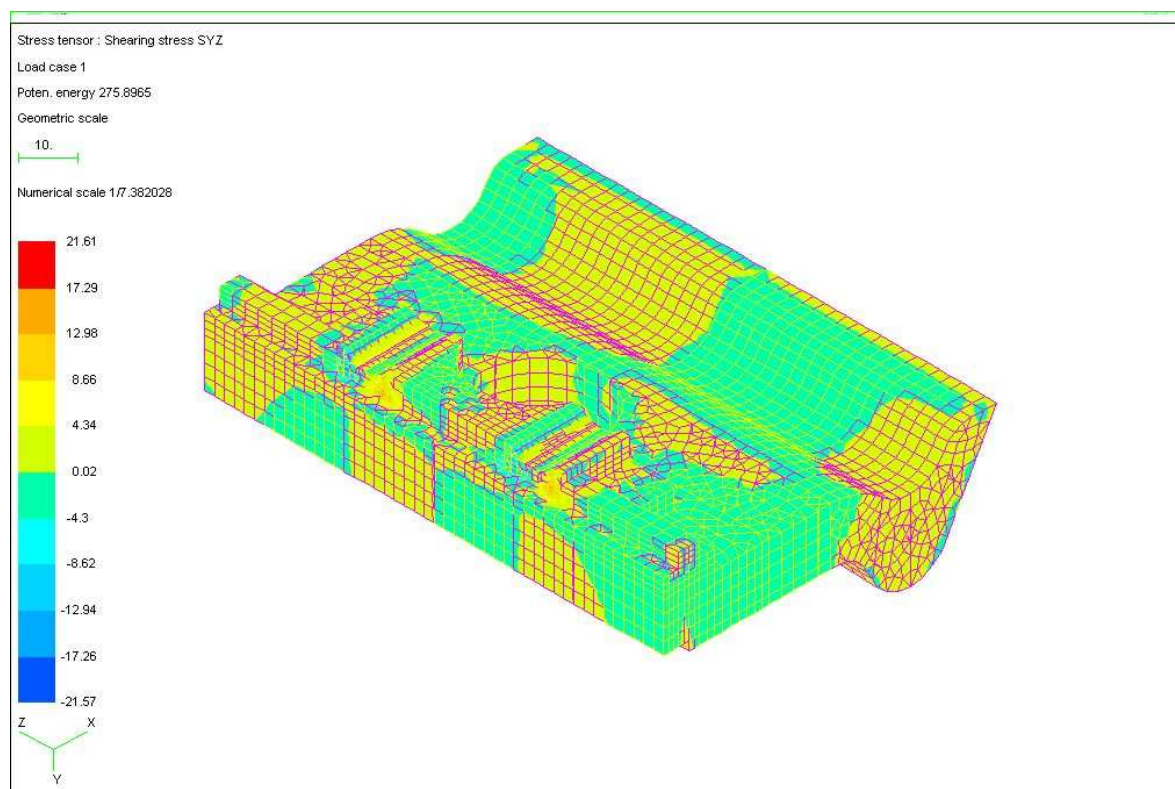
Obr. 39 Řez ortotropního kompozitu v ose X a velikosti napětí v ose Y



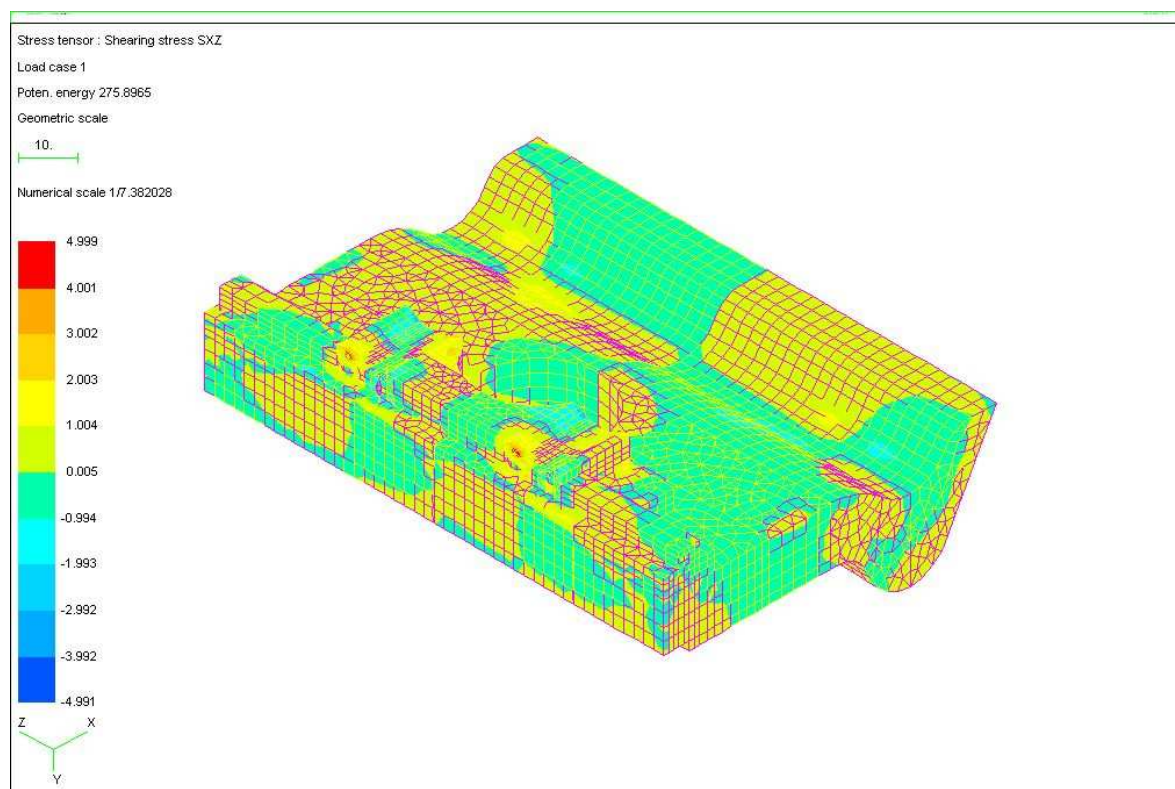
Obr. 40 Velikosti napětí ortotropního kompozitu v ose Z



Obr. 41 Velikosti napětí ortotropního kompozitu v rovinách XY

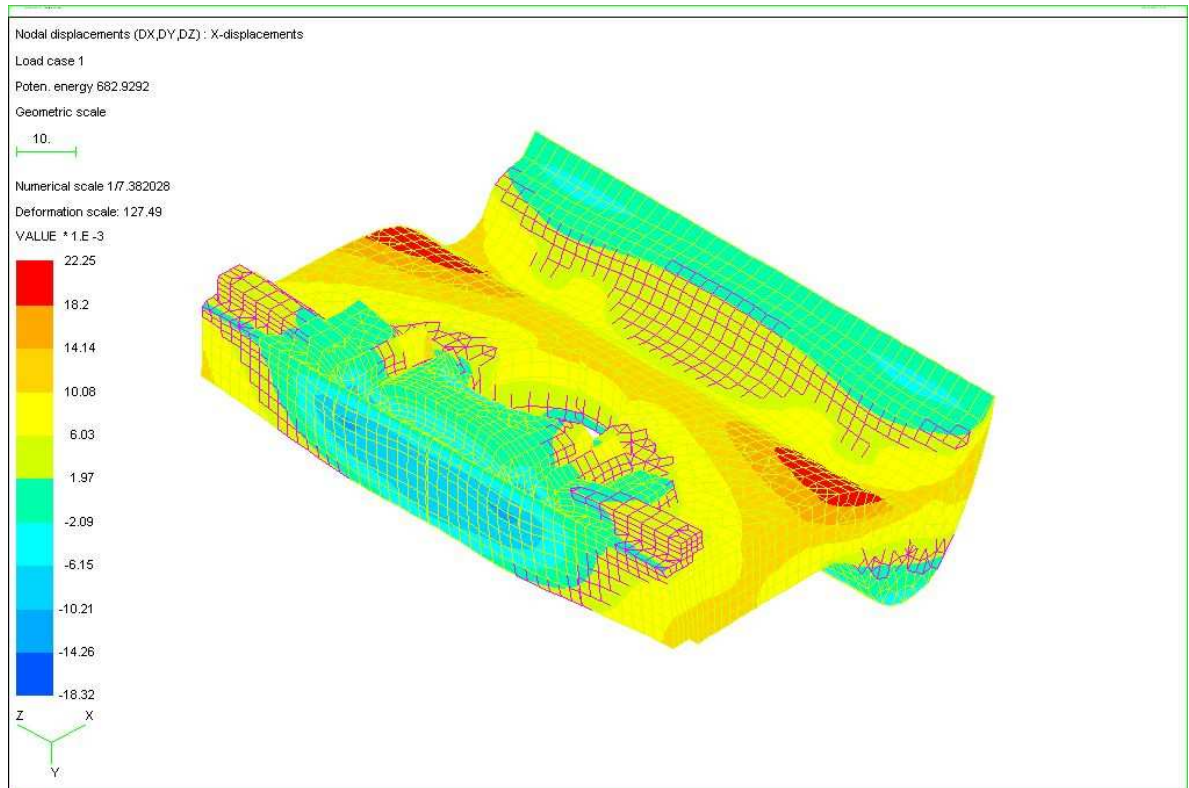


Obr. 42 Velikosti smykových napětí ortotropního kompozitu v rovinách YZ

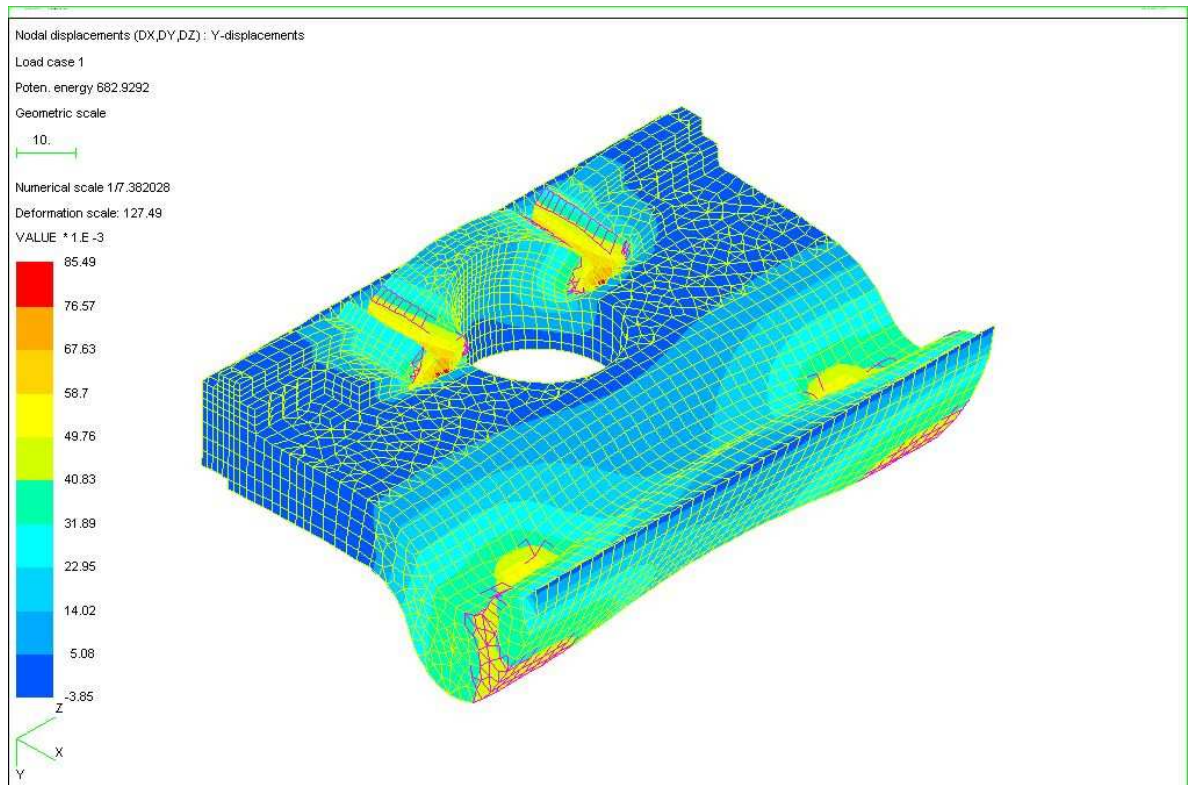


Obr. 43 Velikosti smykových napětí ortotropního kompozitu v rovinách XZ

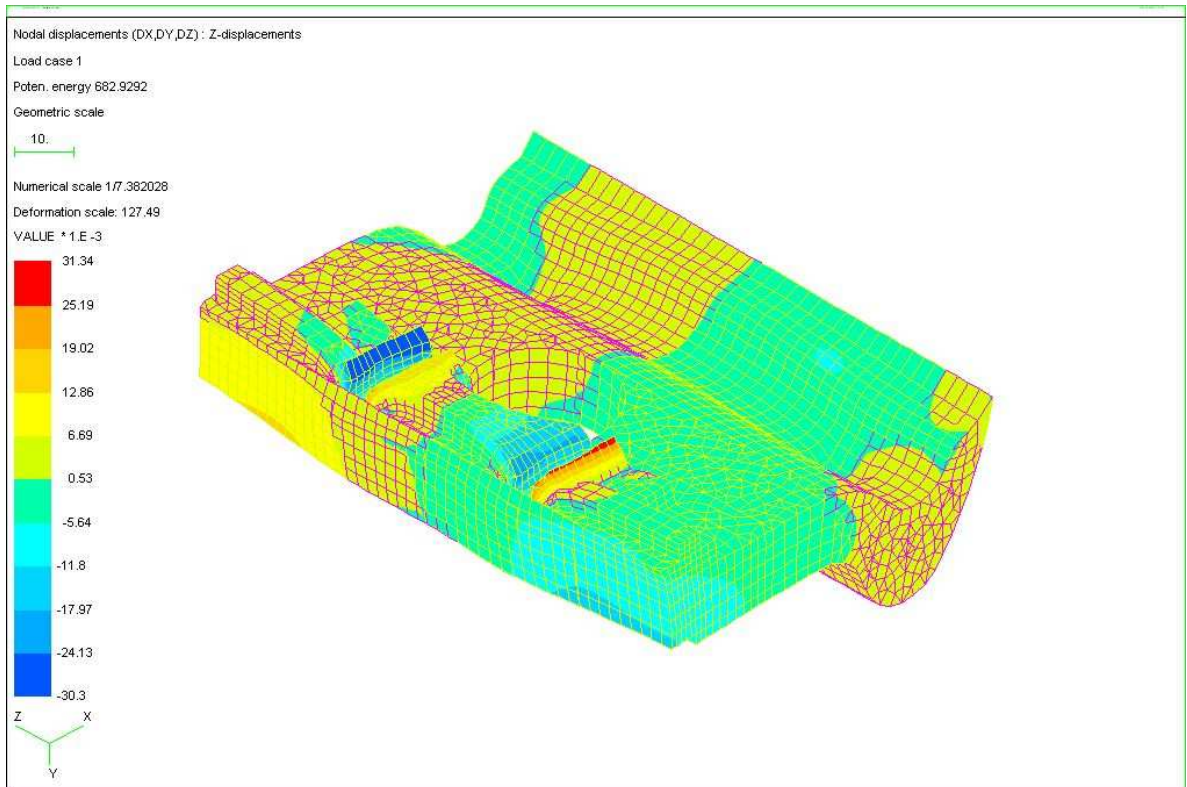
## 12.4 Výsledky numerické analýzy pro isotropní těleso úhlové vodící desky



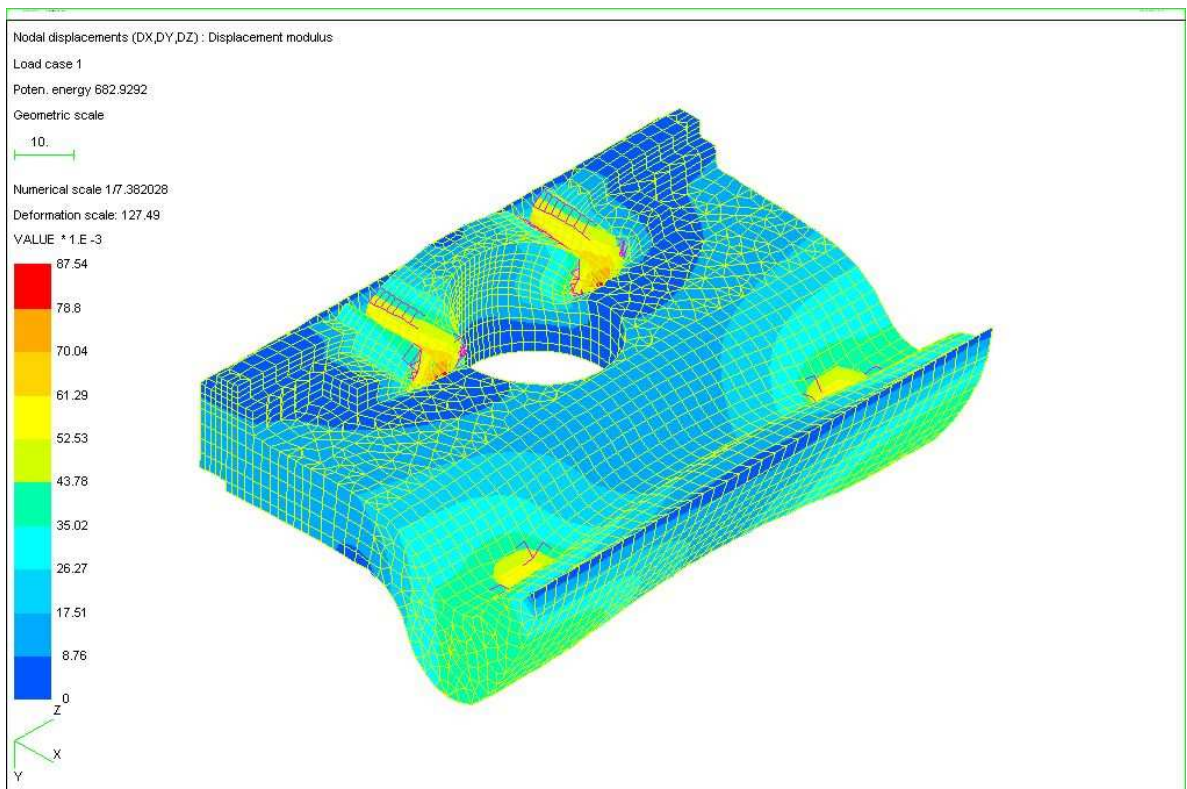
Obr. 44 Deformace isotropního kompozitu po zatížení v ose X



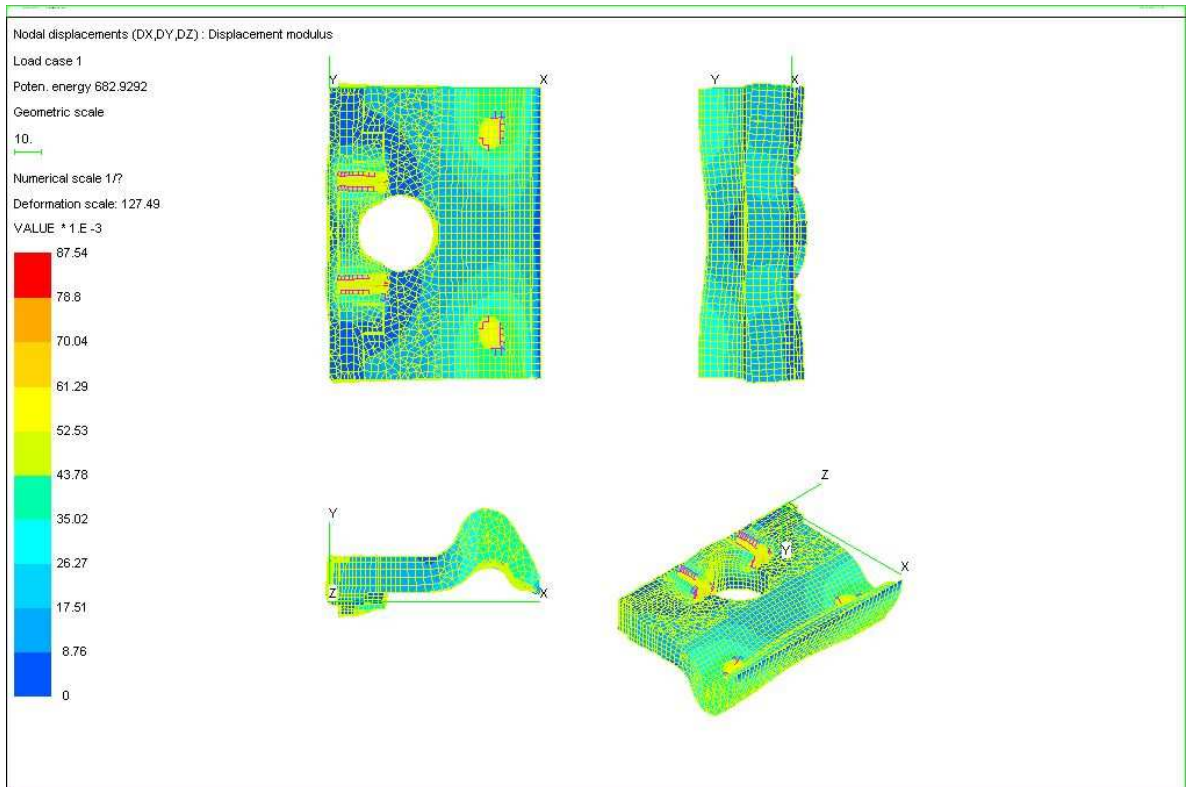
Obr. 45 Deformace isotropního kompozitu po zatížení v ose Y



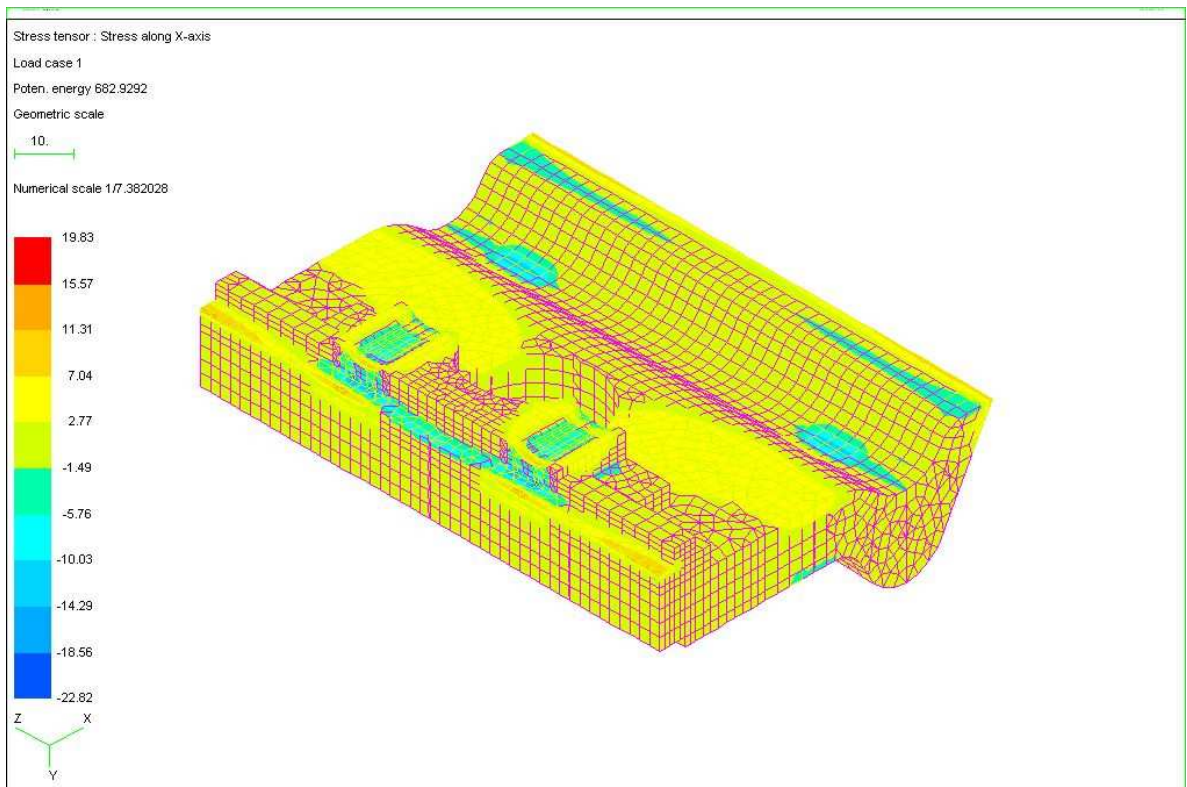
Obr. 46 Deformace isotropního kompozitu po zatížení v ose Z



Obr. 47 Celková deformace isotropního kompozitu po zatížení

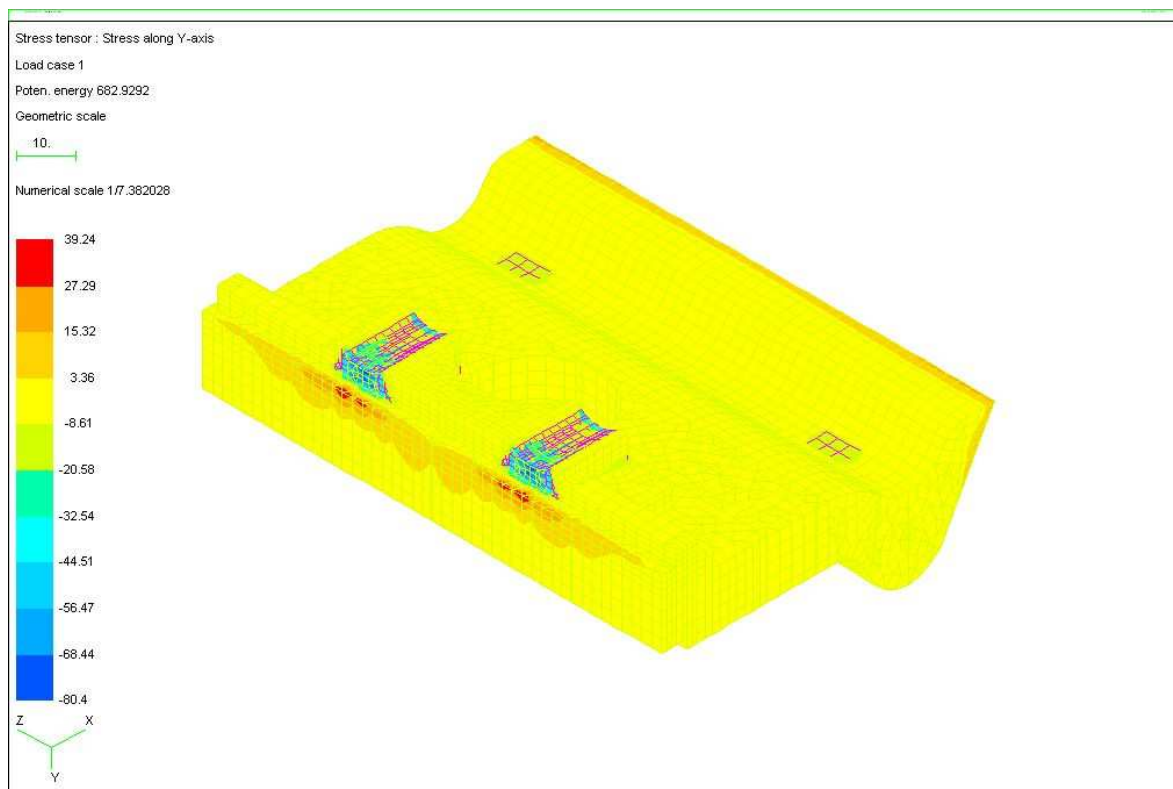


Obr. 48 Deformace isotropního kompozitu v axonometrickém pohledu a v jednotlivých rovinách

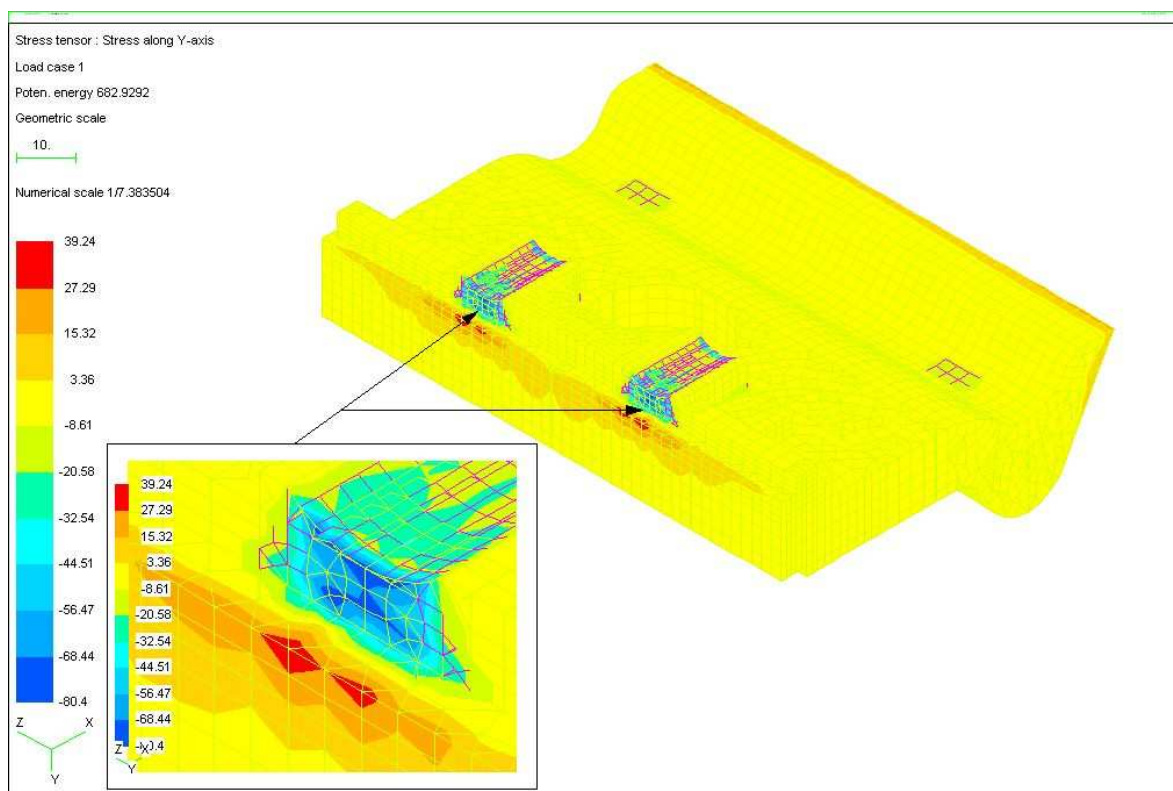


Obr. 49 Velikosti napětí isotropního kompozitu v ose X

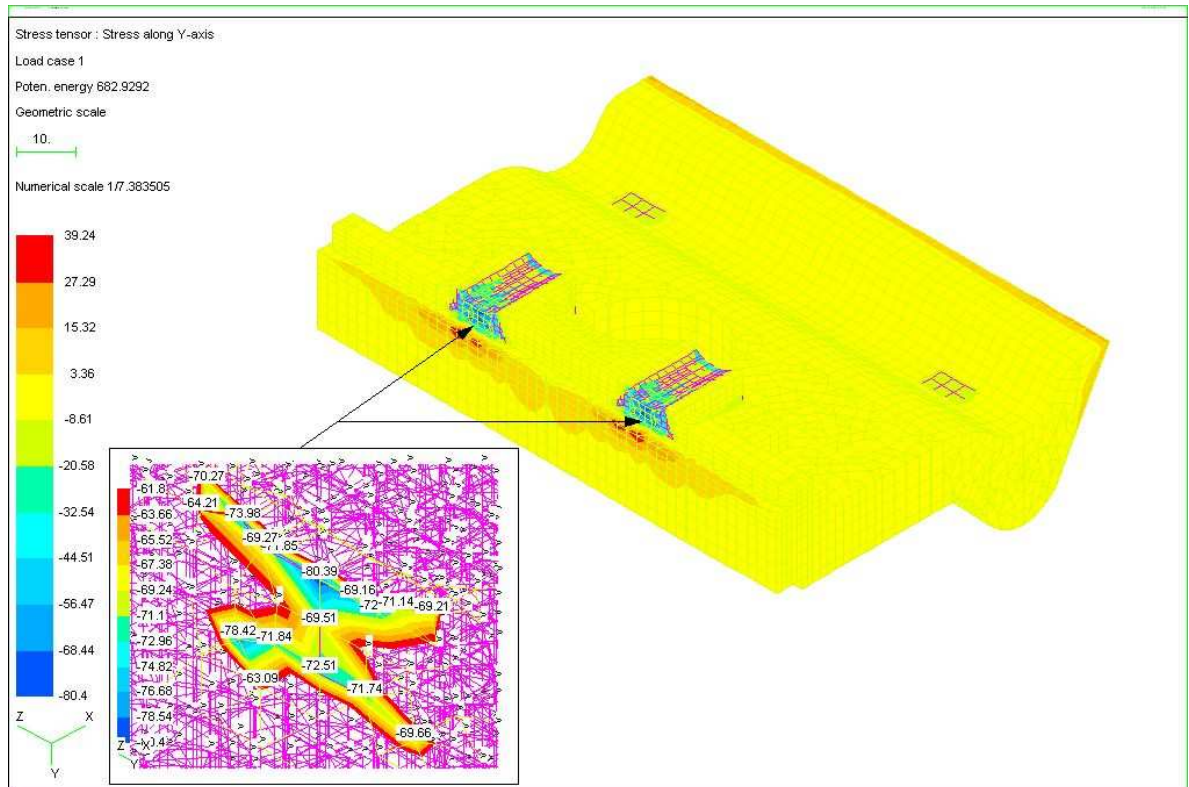




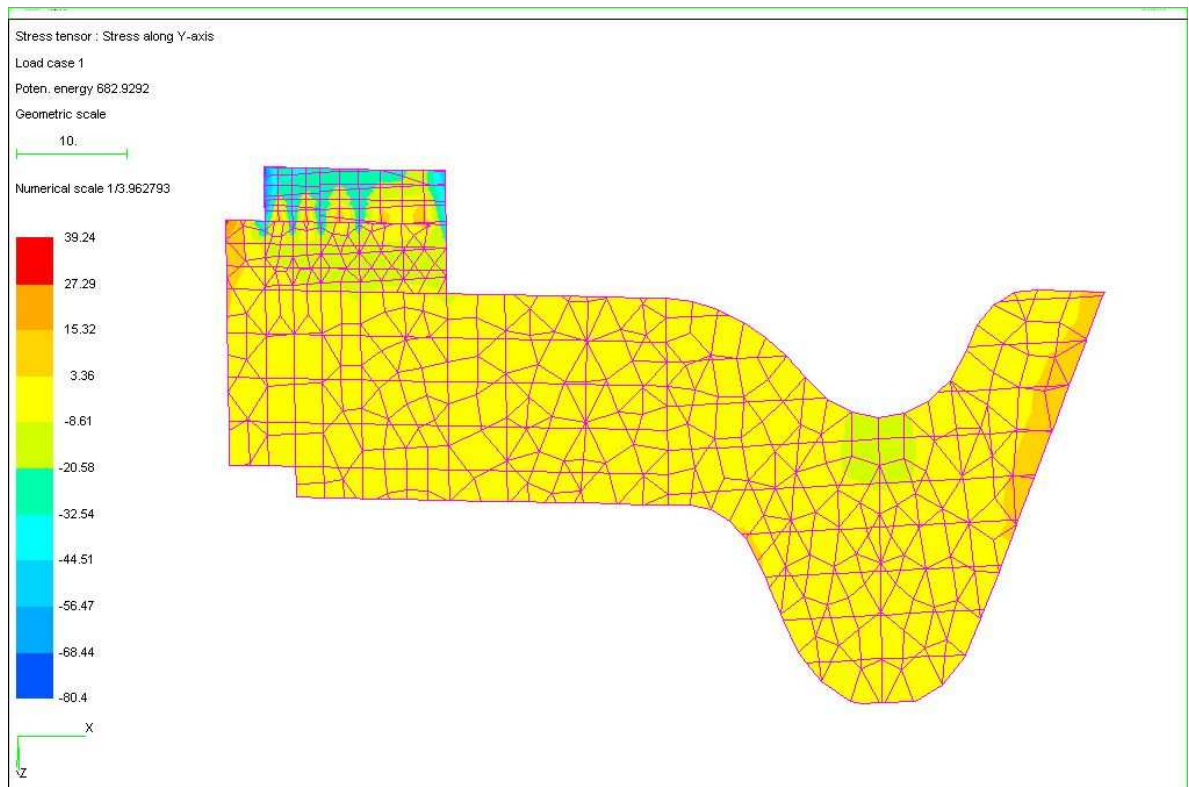
Obr. 50 Velikosti napětí isotropního kompozitu v ose Y



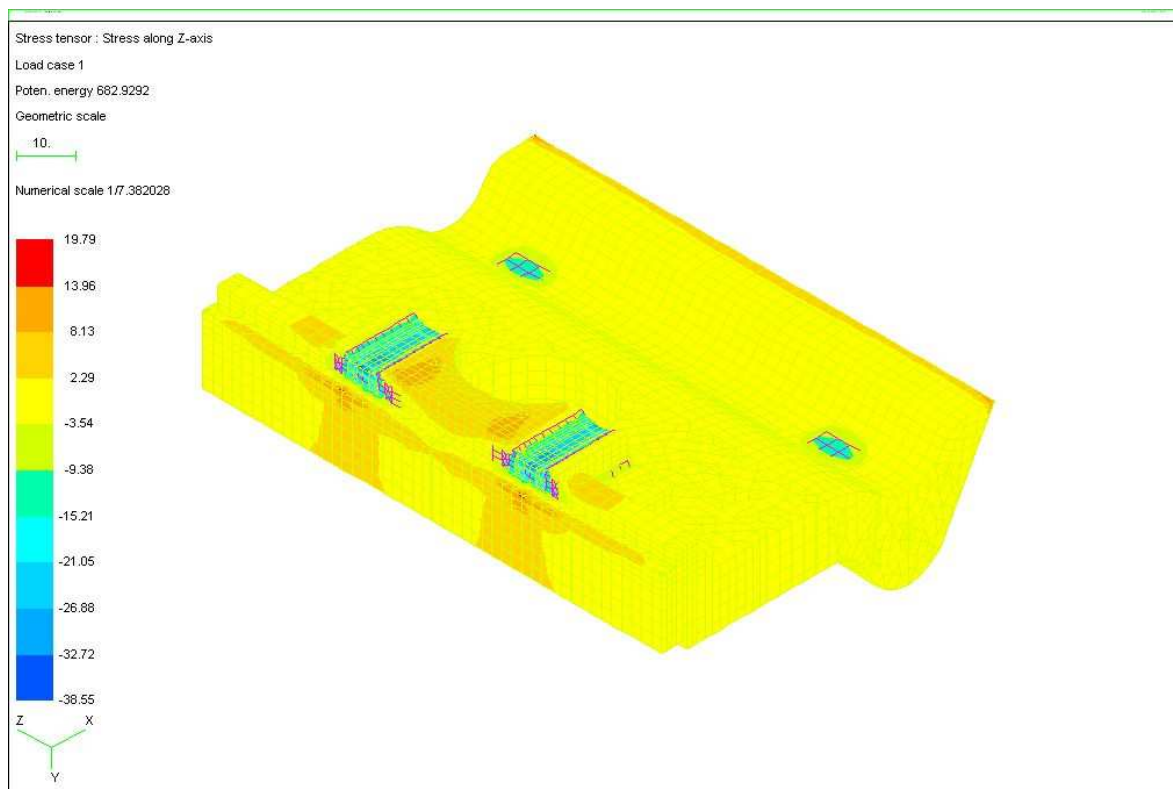
Obr. 51 Výřez oblasti největších napětí isotropního kompozitu



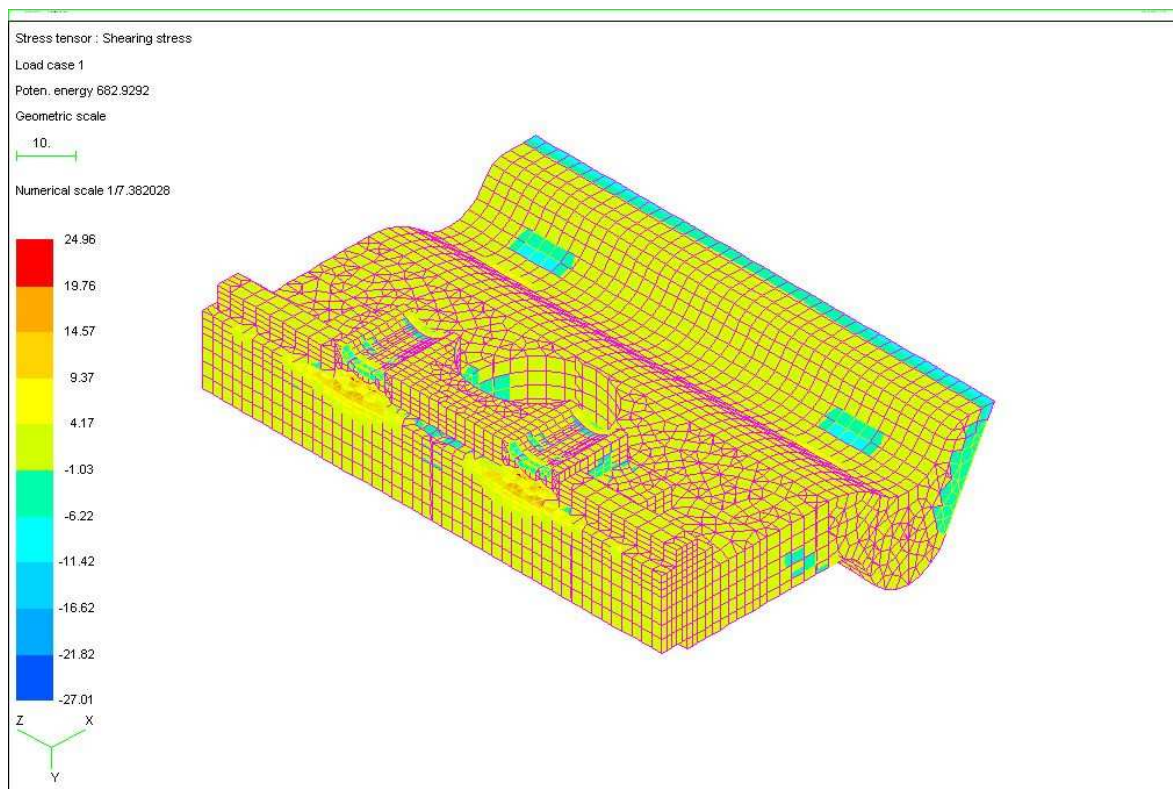
Obr. 52 Špičky napětí isotropního kompozitu s numerickými hodnotami



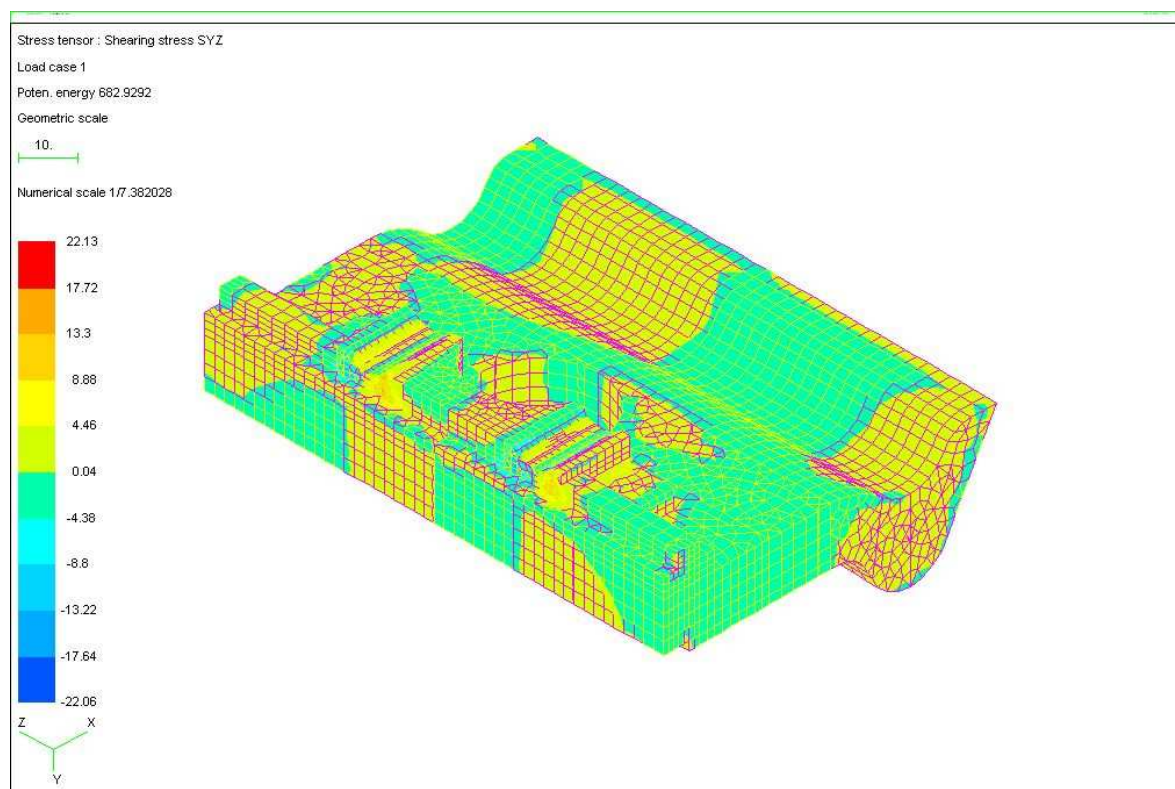
Obr. 53 Řez isotropního kompozitu v ose X a velikosti napětí v ose Y



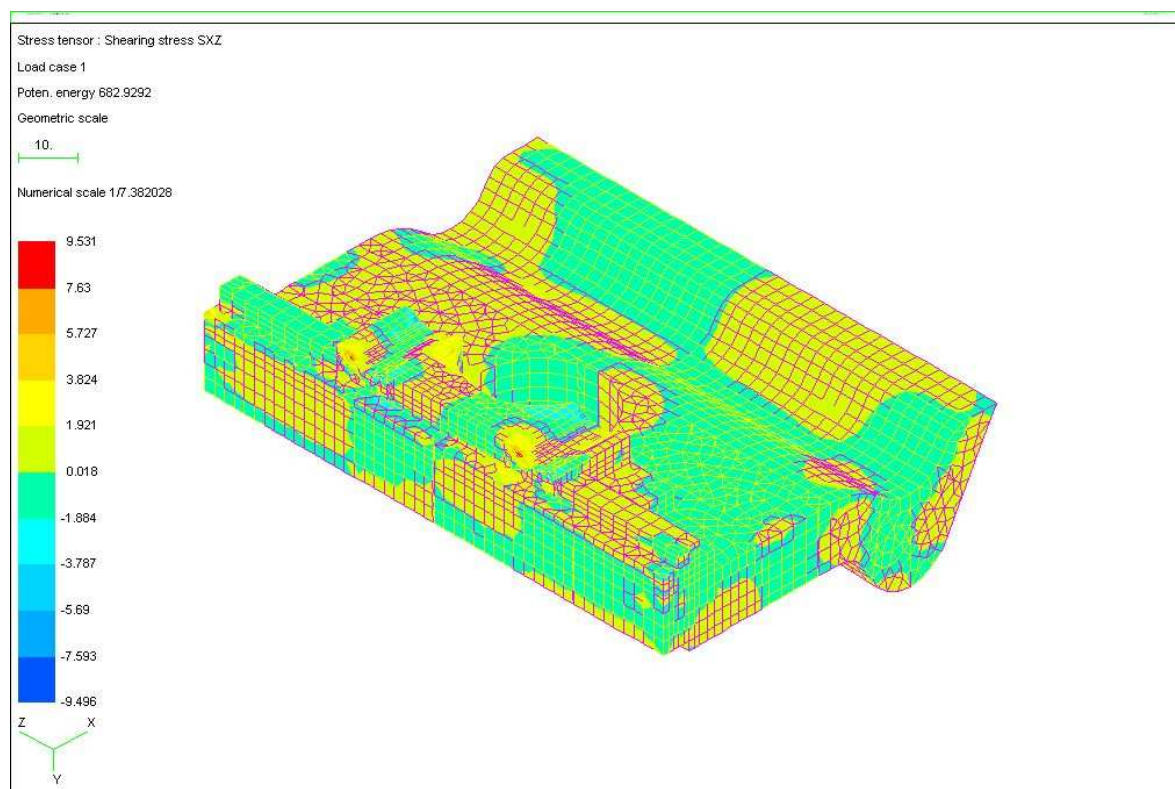
Obr. 54 Velikosti napětí isotropního kompozitu v ose Z



Obr. 55 Velikosti smykových napětí isotropního kompozitu v rovinách XY



Obr. 56 Velikosti smykových napětí isotropního kompozitu v rovinách YZ



Obr. 57 Velikosti smykových napětí isotropního kompozitu v rovinách XZ

## 13 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výrobce úhlových vodících desek je německá firma Vossloh a její vzorky byly zajištěny společností ŽPSV a.s., Uherský Ostroh. Německý výrobce neposkytuje z pochopitelných komerčních důvodů žádné materiálové charakteristiky potřebné pro strukturální analýzu. Proto bylo třeba zjistit materiálové hodnoty experimentálně s následnou aplikací výsledků pro numerickou analýzu pomocí MKP. Z dodaných vzorků úhlových vodících desek byla v ITC, a.s. ve Zlíně vytvořena zkušební tělesa pro jednotlivé zkoušky.

### 13.1 Výsledky získané experimentálním měřením

Z tahové zkoušky lze získat parametry potřebné pro numerickou aplikaci MKP. Celkem bylo této zkoušce podrobena 5 zkušebních těles ve tvaru lopatek. Průměrná hodnota pevnosti v tahu činila  $R_m = 85,74$  MPa a modulu pružnosti v tahu  $E = 5,71$  GPa. Rozdílné výsledky tahových zkoušek mohly být způsobeny vruby na povrchu zkušebních vzorků, které vznikly při jejich přípravě, nebo vnitřními dutinami.

Další zkoušky na zkušebních vzorcích byly provedeny za účelem získání důležitých hodnot potřebných pro posouzení materiálu z hlediska mechanického chování.

Zkouškou rázové houževnatosti metodou Charpy bylo testováno 10 zkušebních těles tvaru trámečku. Ráz byl veden na užší stranu trámečku a všech 10 těles bylo přeraženo. Z jednotlivých výsledků byl spočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Z výsledné hodnoty  $a_{cU} = (71 \pm 1)$  kJ/m<sup>2</sup> vyplývá, že materiál úhlové vodící desky vykazuje poměrně vysokou míru houževnatosti.

Zkoušce tvrdosti podle Brinella bylo podrobena 5 zkušebních těles na kterých bylo uskutečněno 10 měření. Z nich byl vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Výsledná hodnota tvrdosti činila  $H_B = (148 \pm 4)$  N/mm<sup>2</sup>. V porovnání s partikulárně plněnou epoxidovou pryskyřicí či tvrdým PVC je materiál úhlové vodící desky podstatně tvrdší.

## 13.2 Výsledky získané numericky pomocí MKP

### 13.2.1 Ortotropní materiál úhlové vodící desky

Z numerických výsledků po aplikaci MKP je zřejmé, že největší napětí a deformace vznikají podle očekávání v místech dotyku pružné svěrky Skl 14 s úhlovou vodící deskou.

Nejvyšších hodnot napětí je dosahováno v ose  $Y$  a v místech, kde působí zatížení  $F = 7,9$  kN. Jak je patrné z obr. 38, tak v těchto místech také vzniká špičkové tlakové napětí, které dosahuje hodnoty  $\sigma_{\max} = -102,4$  MPa. Toto napětí s rostoucí vzdáleností velmi rychle klesá a jeho vliv se omezuje pouze na únavu kompozitu. Maximální smyková napětí nedosahují vysokých hodnot a nemají vliv na materiál úhlové vodící desky.

Deformace dosahuje nejvyšších hodnot v oblastech, kde působí zatížení  $F = 3,1$  kN. Maximální hodnota deformace  $mod = 37,77 \cdot 10^{-3}$  mm. Tato maximální hodnota deformace je v dovolených mezích a nemá vliv na porušení kompozitu.

### 13.2.2 Isotropní materiál úhlové vodící desky

Podobně jako v předchozím případě, také u isotropního kompozitu dochází k největšímu napětí a deformaci v místech dotyku pružné svěrky Skl 14 s úhlovou vodící deskou.

Nejvyšších hodnot napětí je opět dosaženo v ose  $Y$  a v místech, kde působí zatížení  $F = 7,9$  kN. Také v této oblasti, znázorněné na obr. 52, vzniká špičkové tlakové napětí, které dosahuje hodnoty  $\sigma_{\max} = -80,4$  MPa. Toto napětí s rostoucí vzdáleností velmi rychle klesá a jeho vliv se omezuje pouze na únavu kompozitu. Maximální smyková napětí nedosahují vysokých hodnot a nemají vliv na materiál úhlové vodící desky.

Deformace dosahuje nejvyšších hodnot v oblastech, kde působí zatížení  $F = 7,9$  kN. Maximální hodnota deformace  $mod = 87,54 \cdot 10^{-3}$  mm. Tato maximální hodnota deformace je v dovolených mezích a nemá vliv na porušení kompozitu.

### 13.3 Porovnání výsledků ortotropního a isotropního materiálu úhlové vodící desky

Z numerického řešení pomocí MKP lze vyčíst, že špičky napětí působí u ortotropního a isotropního materiálu ve stejném místě. Zajímavostí je, že hodnota napětí ve směru osy  $Y$  je u ortotropního materiálu úhlové vodící desky vyšší než u materiálu isotropního. Toto napětí působí ve směru vláken a dalo by se očekávat, že bude menší než u materiálu isotropního. Vysvětlení lze interpretovat tak, že struktura isotropního materiálu, která má nahodilou orientaci vláken, se snaží rozložit působící napětí do celého objemu. Kdežto u ortotropního materiálu způsobí konce krátkých vláken koncentraci napětí v oblasti jejich preferované orientace, která je právě v ose  $Y$ .

U obou typů se liší také oblasti, kde vznikají maximální deformace. Ta je v případě ortotropního tělesa v oblasti, kde působí zatížení  $F = 3,1$  kN a v případě isotropního tělesa v místě, kde působí zatížení  $F = 7,9$  kN.

### 13.4 Porovnání výsledků získaných experimentálně a pomocí MKP

Napětí získaná experimentálně a pomocí MKP jsou důležitým parametrem pro porovnání, vyhodnocení a celkové chování úhlové vodící desky v železniční konstrukci.

Experimentálně naměřené hodnoty napětí při tahové zkoušce by neměly převyšovat hodnotu nominálního napětí, které bylo analyzováno pomocí MKP.

*Tab. XIII Porovnání hodnot napětí získaných pomocí MKP a experimentálně u ortotropního kompozitu*

Ortotropní kompozit	osy		
	X	Y	Z
napětí [MPa]			
$\sigma_{\text{nominální-MKP}}$	-10	-30	-12
$\sigma_{\text{špičkové-MKP}}$	-24,4	-102,4	-18,31
$\sigma_{\text{experimentální}}$	85,7	*)	85,7

\*)Neměřeno

Tab. XIV Porovnání hodnot napětí získaných pomocí MKP a experimentálně u isotropního kompozitu

Isotropní kompozit napětí [MPa]	osy		
	X	Y	Z
$\sigma_{\text{nominální-MKP}}$	-10	-25	-15
$\sigma_{\text{špičkové-MKP}}$	-22,82	-80,4	-38,55
$\sigma_{\text{experimentální}}$	85,7	85,7	85,7

Z tab. XIII a XIV je zřejmé, že hodnoty napětí získané pomocí MKP nepřevyšují napětí naměřené experimentálně.

Na základě výsledků získaných experimentálně a pomocí MKP plyne, že deformace a napětí úhlové vodící desky Wfp 14K, která je zatížena tlakovou silou pružné svěrky Skl 14 v bezpodkladnicovém upevnění Vossloh, je v dovolených mezích a nemá vliv na jeho porušení.

Materiál úhlové vodící desky Wfp 14K, který je složený z PA 6 a plněný ze 30 % skleněnými vlákny, vykazuje poměrně dobré mechanické vlastnosti a v konstrukci železniční trati je plně dostačující. V praxi je možné tento typ kompozitu použít i jako náhradu méně namáhaných, konstrukčních kovových dílů.

Zajímavým řešením by za jisté byla také náhrada matrice PA 6 za PA 66 a vyšší objemové plnění skleněných vláken. To vyžaduje ovšem další zkoumání a měření, které jsou nad rámec této diplomové práce.



## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo analyzovat chování a napjatost úhlové vodící desky Wfp 14K při zatížení v konstrukci železniční trati. Z jednotlivých vzorků úhlových vodících desek byla vytvořena zkušební tělíska, na kterých byly provedeny experimentální zkoušky. Experimentální hodnoty, získané z tahových zkoušek úhlové vodící desky, byly aplikovány na numerický diskrétní výpočtový model. Výpočet byl provedený v programu Samcef. Pro model úhlové vodící desky byly nejprve uvažovány ortotropní a potom isotropní materiálové charakteristiky. Okrajové podmínky byly zvoleny tak, aby simulovaly skutečné upevnění úhlové vodící desky v železniční konstrukci. Zatížení desky bylo vyvozeno přitahovací silou  $F = 11$  kN od pružné svěrky Skl 14. Výsledky získané numerickou metodou MKP, tak představují rozložení tenzoru napětí a deformace pro ortotropní a isotropní model.

Získané maximální hodnoty napětí se v jednotlivých osách u obou modelů liší, ale nacházejí se ve stejné oblasti. Ortotropní materiál desky dosahuje v ose  $Y$  hodnoty napětí v tlaku  $\sigma_{\max} = -102,4$  MPa a isotropní  $\sigma_{\max} = -80,4$  MPa. Obě tato napětí lze posuzovat jako napětí špičkové. Tato napětí působí v malé omezené oblasti diskontinuity tvaru a jejich hodnota klesá na hodnotu nominální již na velikosti prvku.

Maximální deformace, na rozdíl od maximálního napětí, vzniká u obou typů materiálů v odlišných místech. V případě ortotropního materiálu je to v oblasti, kde působí rozložené zatížení  $F = 3,1$  kN a v případě isotropního tělesa v místě, kde působí rozložené zatížení  $F = 7,9$  kN.

Z porovnání a vyhodnocení výsledků získaných experimentálně a numericky pomocí MKP plyne, že hodnoty napětí a deformace jsou u obou modelů v dovolených mezích, nemají vliv na porušení kompozitu a ani výrazným způsobem neovlivňují chování úhlové vodící desky.

Hodnoty získané z numerické aplikace pomocí MKP jsou výsledkem lineárního řešení úlohy. Úloha byla řešena i nelineárně a její výsledky se shodovaly s výsledky lineárními.

Tato diplomová práce byla vytvořena na základě ústní dohody se společností ŽPSV a.s., Uherský Ostroh.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] URL: <<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/906.pdf>> [cit. 2006-02-20]
- [2] Čechák, J. Vývoj železničního svršku v letech 1929-2003, Brno, 2004.
- [3] URL: <[http://dc.fd.cvut.cz/material/ZELEZNICE\\_PREDNASKA.doc](http://dc.fd.cvut.cz/material/ZELEZNICE_PREDNASKA.doc)> [cit. 2006-02-20]
- [4] URL: <[http://envi.upce.cz/pisprace/prezencni/2C\\_SP\\_04.PDF](http://envi.upce.cz/pisprace/prezencni/2C_SP_04.PDF)> [cit. 2006-02-20]
- [5] URL: <<http://www.k-report.net/koridory/ktechnol.html>> [cit. 2006-02-20]
- [6] URL: <[http://www.vossloh-fastening-systems.de/eng/pdfs/Einbauanleitung\\_W14\\_GB.pdf](http://www.vossloh-fastening-systems.de/eng/pdfs/Einbauanleitung_W14_GB.pdf)> [cit. 2006-02-20]
- [7] URL: <<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/606.pdf>> [cit. 2006-02-20]
- [8] Agarwal, B.D., Broutman, L.J. Vláknové kompozity. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1987.
- [9] Bareš, R.A. Kompozitní materiály. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1988.
- [10] Petrtýl, M. Mechanika kompozitních těles, ČVUT, Praha, 1991.
- [11] Jančář, J. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů, VUT, Brno, 2003.
- [12] ČSN EN ISO 527-1. Stanovení tahových vlastností
- [13] ČSN EN ISO 179. Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy
- [14] ČSN EN ISO 2039-1. Stanovení tvrdosti-metoda vtlačáním kuličky
- [15] Schätz, M., Vondráček, P. Zkoušení polymerů. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1979.
- [16] Design Handbook for DuPont Engineering Plastics, DuPont, 1997, Module II, 232409E
- [17] Mleziva, J. Polymery-struktura, vlastnosti a použití, Sobotáles, 1993.
- [18] Kolář, V., Němec, I., Kanický, V. Principy a praxe metody konečných prvků, Praha, 1997.
- [19] Bathe, K.J. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prantice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1996.
- [20] Bittnar, Z., Šejnoha, J. Numerické metody mechaniky 1, ČVUT, Praha, 1992.

- 
- [21] Bittnar, Z., Šejnoha, J. Numerické metody mechaniky 2 , ČVUT, Praha, 1992.
  - [22] Petrůl, M. Mechanika kompozitních těles, ČVUT, Praha, 1991.
  - [23] Matthews, F.L., Davies, G.A.O., Hitchings, D., Soutis, C. Finite element modeling of composite materials and structures, CRC Press, England, 2000, ISBN 0-8493-0846-1
  - [24] Samcef Composites – User Manual 9.1, SAMTECH 2001, Belgie.
  - [25] Segerlind, L.J., Applied Finite Element Analysis, John Willey, New York, 1984.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ČD	České dráhy
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
MKP	metoda konečných prvků
<i>mod</i>	deformace kompozitu
$\rho$	hustota
F	síla
$F_r$	redukováná hodnota síly
$F_m$	zkušební zatížení působící na měřicí kuličku
$F_{max}$	zatížení při přetržení
$H_B$	tvrdost Brinell
W	energie spotřebovaná při přeražení tělesa
$A_0$	plocha počátečního příčného průřezu
A	plocha vytlačeného důlku
G	modul pružnosti ve smyku
E	modul pružnosti v tahu
$E_c$	modul pružnosti v tahu kompozitu
$E_f$	modul pružnosti v tahu vlákna
$E_m$	modul pružnosti v tahu matrice
$E_L$	podélný modul pružnosti v tahu
$E_T$	příčný modul pružnosti v tahu
$G_L$	podélný modul pružnosti ve smyku
$G_T$	příčný modul pružnosti ve smyku
$\varepsilon$	tažnost
$\varepsilon_l$	poměrné prodloužení
$\varepsilon_c$	poměrné prodloužení kompozitu
$\varepsilon_f$	poměrné prodloužení vlákna
$\varepsilon$	poměrné prodloužení matrice
$\nu$	Poissonův poměr
$\nu_f$	Poissonův poměr vlákna
$\nu_m$	Poissonův poměr matrice

$V_f$	objemový podíl vlákna
$V_m$	objemový podíl matrice
$a_{cU}$	rázová houževnatost Charpy těles bez vrubu
$b_0$	původní šířka zkušebního tělesa
$b$	šířka zkušebního tělesa
$\Delta b$	rozdíl původní a zkrácené šířky zkušebního tělesa
$h_0$	původní výška zkušebního tělesa
$h$	výška zkušebního tělesa
$\Delta h$	rozdíl původní a zkrácené výšky zkušebního tělesa
$h_r$	redukováná hloubka vtlačení
$D$	průměr kuličky
$r$	poloměr vlákna
$d$	průměr vlákna
$l_0$	počáteční délka
$\Delta l$	zvětšení délky tělesa
$l$	délka vlákna
$l_t$	přenosová délka zatížení
$l_c$	kritická délka vlákna
$\sigma$	tahové napětí
$\sigma_1$	napětí naměřené při hodnotě $\epsilon_1 = 0,0005$
$\sigma_2$	napětí naměřené při hodnotě $\epsilon_2 = 0,0025$
$\sigma_p$	mez pevnosti v tahu
$\sigma_f$	napětí vlákna v osovém směru
$\sigma_{f0}$	napětí na konci vlákna
$(\sigma_f)_{\max}$	maximální napětí vlákna
$\sigma_c$	zatěžovací napětí kompozitů
$\sigma_{pf}$	mez pevnosti vlákna
$\bar{\sigma}_f$	průměrné napětí vlákna
$\sigma_{\max}$	špičkové tlakové napětí na kompozitu
$\tau$	smykové napětí
$\tau_y$	napětí na mezi kluzu
$R_m$	pevnost v tahu při přetržení
$\Pi$	celková potenciální energie
$\Pi_i$	deformační energie vnitřních sil tělesa

---

$\Pi_z$	práce vnějších sil
$\Pi^e$	potenciální energie elementu
$\Lambda^e$	energie přetvoření pro element
$W_0^e$	práce objemových sil
$W_p^e$	práce vykonaná rozloženým zatížením
[B]	transformační matice
[D]	matice fyzikálních konstant
[K]	matice tuhosti pro celý systém
$[k]^e$	matice tuhosti elementu
{d}	vektor uzlových posunutí pro celý systém
{f}	vektor výsledných sil v uzlech
{ $\varepsilon_T$ }	elastické přetvoření od teploty
$^T\{f\}^e$	vektor zatížení v uzlech
[N] <sup>T</sup>	matice interpolačních funkcí
$\Gamma$	oblast zatížení
$X^*, Y^*, Z^*$	vyjádření objemových sil

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1	Železniční svršek a spodek u elektrifikované dvoukolejné trati	10
Obr. 2	Struktura bezpodkladnicového upevnění Vossloh	13
Obr. 3	Technologie montáže upevnění W 14	14
Obr. 4	Technologie montáže upevnění W 14	14
Obr. 5	Úhlová vodící deska Wfp 14K900	15
Obr. 6	Obecné schéma pro rozdělení kompozitních materiálů	18
Obr. 7	Nylon tvarovaný vstřikováním, vyztužený skleněnými vlákny (100×)	21
Obr. 8	Rovnováha na elementu diskontinuitního vlákna uloženého rovnoběžně se směrem zatížení	22
Obr. 9	Idealizovaná křivka smykového napětí – smyková deformace pro matrici	23
Obr. 10	Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní pro různé délky vlákna	24
Obr. 11	Jednosměrná deformace tělesa tahem	29
Obr. 12	Schéma Charpyho kladiva	30
Obr. 13	Princip měření tvrdosti kuličkou	31
Obr. 14	Grafické zobrazení pevností v tahu jednotlivých vzorků	36
Obr. 15	Grafické porovnání modulů pružnosti a tažností jednotlivých vzorků	37
Obr. 16	Závislost křivky $\sigma$ - $\varepsilon$ pro vzorek č. 1	37
Obr. 17	Závislost křivky $\sigma$ - $\varepsilon$ pro vzorek č. 2	38
Obr. 18	Závislost křivky $\sigma$ - $\varepsilon$ pro vzorek č. 3	38
Obr. 19	Závislost křivky $\sigma$ - $\varepsilon$ pro vzorek č. 4	39
Obr. 20	Závislost křivky $\sigma$ - $\varepsilon$ pro vzorek č. 5	39
Obr. 21	Rozložení sil na nosníku imitující úhlovou vodící desku	45
Obr. 22	Základní geometrie úhlové vodící desky	49

Obr. 23	Základní geometrie úhlové vodící desky v pohledu osy Z a osy X	50
Obr. 24	Základní síť konečných prvků-vrchní část kompozitu	50
Obr. 25	Základní síť konečných prvků-spodní část kompozitu	51
Obr. 26	Prismový objemový prvek 46 a tetra objemový prvek 8	51
Obr. 27	Okrajové podmínky v horní části kompozitu	52
Obr. 28	Okrajové podmínky ve spodní části kompozitu	52
Obr. 29	Velikosti zatížení úhlové vodící desky	53
Obr. 30	Deformace ortotropního kompozitu po zatížení v ose X	54
Obr. 31	Deformace ortotropního kompozitu po zatížení v ose Y	54
Obr. 32	Deformace ortotropního kompozitu po zatížení v ose Z	55
Obr. 33	Celková deformace ortotropního kompozitu po zatížení	55
Obr. 34	Deformace ortotropního kompozitu v axonometrickém pohledu a v jednotlivých rovinách	56
Obr. 35	Velikosti napětí ortotropního kompozitu v ose X	56
Obr. 36	Velikosti napětí ortotropního kompozitu v ose Y	57
Obr. 37	Výřez oblasti největších napětí ortotropního kompozitu	57
Obr. 38	Špičky napětí ortotropního kompozitu s numerickými hodnotami	58
Obr. 39	Řez ortotropního kompozitu v ose X a velikosti napětí v ose Y	58
Obr. 40	Velikosti napětí ortotropního kompozitu v ose Z	59
Obr. 41	Velikosti napětí ortotropního kompozitu v rovinách XY	59
Obr. 42	Velikosti smykových napětí ortotropního kompozitu v rovinách YZ	60
Obr. 43	Velikosti smykových napětí ortotropního kompozitu v rovinách XZ	60
Obr. 44	Deformace isotropního kompozitu po zatížení v ose X	61
Obr. 45	Deformace isotropního kompozitu po zatížení v ose Y	61
Obr. 46	Deformace isotropního kompozitu po zatížení v ose Z	62
Obr. 47	Celková deformace isotropního kompozitu po zatížení	62



---

Obr. 48	Deformace isotropního kompozitu v axonometrickém pohledu a v jednotlivých rovinách	63
Obr. 49	Velikosti napětí isotropního kompozitu v ose X	63
Obr. 50	Velikosti napětí isotropního kompozitu v ose Y	64
Obr. 51	Výřez oblasti největších napětí isotropního kompozitu	64
Obr. 52	Špičky napětí isotropního kompozitu s numerickými hodnotami	65
Obr. 53	Řez isotropního kompozitu v ose X a velikosti napětí v ose Y	65
Obr. 54	Velikosti napětí isotropního kompozitu v ose Z	66
Obr. 55	Velikosti smykových napětí isotropního kompozitu v rovinách XY	66
Obr. 56	Velikosti smykových napětí isotropního kompozitu v rovinách YZ	67
Obr. 57	Velikosti smykových napětí isotropního kompozitu v rovinách XZ	67

**SEZNAM TABULEK**

Tab. I	Přehled svrškového materiálu potřebného pro upevnění kolejnic	13
Tab. II	Typické vlastnosti vláken	19
Tab. III	Některé vlastnosti používaných termoplastových matric	20
Tab. IV	Příklady krátkovláknových kompozitů	22
Tab. V	Maximální napětí vlákna	25
Tab. VI	Rozměry zkušebních těles pro tahové zkoušky	34
Tab. VII	Typy a rozměry zkušebních těles	35
Tab. VIII	Naměřené hodnoty a výsledky tahové zkoušky	36
Tab. IX	Naměřené hodnoty a výsledky rázové houževnatosti	40
Tab. X	Naměřené hodnoty a výsledky tvrdosti podle Brinella	41
Tab. XI	Hodnoty charakterizující ortotropní materiál úhlové vodící desky	43
Tab. XII	Hodnoty charakterizující isotropní materiál úhlové vodící desky	44
Tab. XIII	Porovnání hodnot napětí získaných pomocí MKP a experimentálně u ortotropního kompozitu	70
Tab. XIV	Porovnání hodnot napětí získaných pomocí MKP a experimentálně u isotropního kompozitu	71