

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** B0715A270013 – Strojní inženýrství  
**Studijní specializace:** Konstruování strojů a technických zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Výběr konstrukčních materiálů**

**Autor:** Hedvika PAVELKOVÁ  
**Vedoucí práce:** Ing. Ivana SLÁMOVÁ, Ph. D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Hedvika PAVELKOVÁ**  
Osobní číslo: **S22B0339P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Specializace: **Konstruování strojů a technických zařízení**  
Téma práce: **Výběr konstrukčních materiálů**  
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

## Zásady pro vypracování

Prostudujte a zpracujte problematiku výběru konstrukčních materiálů. Pro názornost výkladu problematiky použijte příklady.

Osnova práce

1. Uvedení do problematiky
2. Problematika výběru konstrukčního materiálu
3. Příklad řešení dané problematiky
4. Shmutí a závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

[1] ASHBY, Michael F. *Materials Selection in Mechanical Design. Fifth Edition*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-08-100599-6

[2] The *GRANTA EduPack materials and proces selection platforms*, produkt firmy ANSYS/GRANTA, [www.grantadesign.com/education/](http://www.grantadesign.com/education/)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Slámová, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. listopadu 2022

## Prohlášení o autorství

**Akademický rok:** 2022/2023  
**Jméno a příjmení studenta:** Hedvika Pavelková  
**Název bakalářské práce:** Výběr konstrukčních materiálů

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Výběr konstrukčních materiálů“ vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

Podpis studenta

## **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Ivaně Slámové, Ph.D, za její ochotu a vstřícnost během konzultací. Velmi si vážím všech poskytnutých rad. Jsem rovněž velmi vděčná rodičům za podporu a zázemí, ve kterém jsem se mohla plně věnovat studiu.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Pavelková	<b>Jméno</b> Hedvika	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Slámová, Ph.D.	<b>Jméno</b> Ivana	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST – KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Výběr konstrukčních materiálů		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	46	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	46	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce popisuje takovou metodiku výběru materiálu, která je univerzální pro všechna strojírenská odvětví. Tento přístup umožňuje zvážení všech požadavků kladených na konečný výrobek a nalezení optimálního materiálu
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Výběr materiálu, Granta EduPack, materiálové vlastnosti, materiálový indikátor

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Pavelková		Name Hedvika	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Slámová, Ph.D.		Name Ivana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS			
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Selection of construction materials			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKS	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	46	<b>TEXT PART</b>	46	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This bachelor's thesis describes a methodology for material selection that is universal for all engineering sectors. This approach allows for the consideration of all requirements placed on the final product and finding the optimal material.
<b>KEY WORDS</b>	Material selection, Granta EduPack, material properties, material index

## Obsah

Zadání bakalářské práce .....	2
Prohlášení o autorství .....	4
Poděkování .....	5
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků .....	12
Seznam tabulek .....	12
1 Úvod do teorie.....	13
2 Definice materiálů a jejich vlastností .....	14
2.1 Rozdělení materiálů .....	14
2.2 Materiálové vlastnosti.....	15
2.2.1 Obecné vlastnosti .....	15
2.2.2 Mechanické vlastnosti .....	15
2.2.3 Termomechanické vlastnosti.....	17
2.2.4 Elektrické vlastnosti .....	17
2.2.5 Optické vlastnosti .....	17
2.2.6 Ekologické vlastnosti .....	18
3 Metodika výběru materiálu .....	19
3.1 Konstrukční proces .....	19
3.2 Proces výběru materiálu .....	22
3.2.1 Převedení .....	22
3.2.2 Vyšetření .....	22
3.2.3 Seřazení .....	23
3.2.4 Dokumentace.....	23
3.3 Materiálové indikátory .....	23
4 Ekologické zhodnocení materiálu .....	30
5 Příklad řešení – stožár městského osvětlení .....	33
5.1 Fáze převedení .....	33
5.2 Fáze vyšetření .....	35
5.3 Fáze seřazení (určení materiálového indikátoru).....	36
5.3.1 Minimalizace ceny pro tuhý stožár .....	36
5.3.2 Minimalizace ceny pro dynamicky namáhaný stožár .....	38
5.3.3 Minimalizace hmotnosti .....	39
5.4 Fáze dokumentace .....	40
5.4.1 Specifikace vybraného materiálu .....	41



5.5	Vyhodnocení spotřeby energie a uhlíkové stopy.....	43
6	Závěr.....	45
	Seznam použitých zdrojů .....	46

## Přehled použitých zkratk a symbolů

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
FST	Fakulta strojní
ISO pro normalizaci),	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci),
KKS	Katedra konstruování strojů
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni

Symbol	Jednotka	Definice
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Hustota
$C_R$	kč/kg	Měrná cena za kilogram
E	GPa	Modul pružnosti v tahu
G	GPa	Modul pružnosti ve smyku
K	GPa	Modul pružnosti objemový
$\sigma_y$	MPa	Mez kluzu
$\sigma_f$	MPa	Mez pevnosti
$\varepsilon$	-	Poměrné prodloužení
l	mm	Délka
H	HR	Tvrдость
$\sigma_c$	MPa	Mez únavy
$T_m$	K	Teplota tání
$T_g$	K	Teplota skelného přechodu
$T_{max/min}$	K	Maximální/minimální provozní teplota
$\lambda$	W/m·K	Tepelná vodivost
$\alpha$	K <sup>-1</sup>	Koeficient tepelné roztažnosti
$\rho_e$	$\Omega \cdot m$	Měrná elektrická rezistivita
G	S	Elektrická vodivost
$\varepsilon_r$	-	Relativní permitivita
n	-	Index lomu
$H_m$	MJ/kg	Vnitřní energie
CO <sub>2</sub>	kg/kg	Uhlíková stopa
M	-	Materiálový indikátor

F	N	Síla
$M_o$	Nm	Ohybový moment
A	mm <sup>2</sup>	Plocha
S	N/m	Tuhost
I	mm <sup>4</sup>	Kvadratický moment
$W_o$	mm <sup>3</sup>	Modul průřezu v ohybu
D	mm	Průměr
s	-	Bezpečnost
$\phi$	mm	Průhyb

## Seznam obrázků

Obr. 1: Diagram tahové zkoušky: napětí – deformace [5] .....	16
Obr. 2: Konstrukční proces [6].....	19
Obr. 3: Koncept [2] .....	20
Obr. 4: Pracovní principy [2] .....	20
Obr. 5: Ztělesnění [2] .....	21
Obr. 6: Popsání detailů [2] .....	21
Obr. 7: Schéma procesu výběru materiálu [2].....	22
Obr. 8: Prut zatížený na tah.....	24
Obr. 9: Graf závislosti napětí na hustotě s indikátorem pro tah [3] .....	25
Obr. 10: Prut zatížený ohybovým momentem .....	26
Obr. 11: Graf závislosti napětí na hustotě s indikátorem pro ohyb [3] .....	27
Obr. 12: Graf závislosti napětí na měrné ceně s indikátorem pro ohyb [3] .....	29
Obr. 13: Životní cyklus produktu [2] .....	30
Obr. 14: Vyhodnocení znečištění [2] .....	31
Obr. 15: Karter [7].....	31
Obr. 16: Vyhodnocení spotřeby energie termoplastů PLA a ABS [3].....	32
Obr. 17: Osvětlovací stožár [8] .....	35
Obr. 18: Vyřazení materiálů nesplňující kritéria.....	35
Obr. 19: Seřazení dle materiálového indikátoru $M_a$ [3] .....	37
Obr. 20: Seřazení dle materiálového indikátoru $M_b$ [3] .....	38
Obr. 21: Seřazení dle materiálového indikátoru $M_c$ [3] .....	39
Obr. 22: Graf spotřeby energie a emisí $CO_2$ [3].....	43

## Seznam tabulek

Tab. 1: Souhrn požadavků na prut 1 .....	24
Tab. 2: Souhrn požadavků na prut 2 .....	26
Tab. 3: Souhrn požadavků na prut 3 .....	28
Tab. 4: Maximální vodorovný průhyb [10].....	34
Tab. 5: Výsledek materiálových indikátorů $M_a$ , $M_b$ a $M_c$ .....	40
Tab. 6: Rozložení emisí a energie v životním cyklu [3] .....	44

## 1 Úvod do teorie

Cílem této práce je obecně definovat metodiku výběru materiálu. Zkušenosti z praxe prokázaly, že materiál ovlivňuje 70 až 80 % [1] vlastností produktu, a proto má výběr vhodného materiálu, mezi mnohými konstrukčními rozhodnutími, vysokou prioritu. Na výběr materiálu má vliv mnoho různých faktorů.

Jedním z hlavních faktorů je způsob zpracování materiálu neboli faktor technologický. Ne každý materiál lze zpracovat všemi dostupnými technologiemi. I když například soustružit a frézovat lze většinu materiálů, obrobení tvrdých a křehkých materiálů (např. keramiky) je energeticky mnohem náročnější než materiály tvárné (např. železné kovy).

Dalším faktorem je funkce konečného výrobku. Je nutné definovat, jakým způsobem bude díl zatěžován, v jakém prostředí se bude používat a jaký je jeho účel. Z těchto faktorů vznikají požadavky na mechanické i jiné vlastnosti výrobku.

Materiál má rovněž významný vliv na ekologickou stránku životního cyklu produktu. V každé etapě životního cyklu dochází k emisím oxidu uhličitého, nitridů či sulfidů. I přes veškerou snahu tyto emise eliminovat se částice dostávají do atmosféry, a proto je nutné se touto problematikou zabývat. Do ekologické oblasti spadá také způsob likvidace produktu. Z důvodu udržitelnosti je potřeba produkty recyklovat a materiál z nich používat znovu. To často ale není možné. Produkty se z pravidla neskládají z jednoho materiálu, ale jedná se o neseparovatelné slitiny či kompozity. Z tohoto pohledu je tedy vhodné navrhovat produkty tak, aby měly co nejdéle životnost nebo bylo možné po jeho poškození vyměnit pouze nefunkční součást. Problematika životního cyklu je detailněji rozebrána v kapitole 4.

Na výběr materiálu má však největší vliv jeho cena. Materiály splňující předchozí kritéria jsou často finančně velmi nákladné, tím pádem pro použití ekonomicky nevýhodné a ztrácejí konkurenceschopnost. Z tohoto úhlu pohledu lze říct, že náklady na materiál vyvíjejí tlak na výběr opačným směrem, než bylo popsáno v předchozích odstavcích.

Všechny zmíněné oblasti společně představují komplexní seznam požadavků. Správná metodika výběru materiálu umožňuje tyto požadavky zohlednit a vyhodnotit. Bakalářská práce je zaměřena na metodiku, kterou popsal prof. Michael F. Ashby ve své knize *Materials Selection in Mechanical design* [2]. Ashby dává výběr materiálů do přímé souvislosti s procesem konstruování. Začíná soupisem všech požadavků kladených na budoucí produkt, následně požadavky převede na materiálové vlastnosti a zabývá se tím, jaká kritéria musí vhodný materiál splňovat.

Výše popsaná problematika také úzce souvisí s tvarem součásti, druhem zpracování, povrchovými úpravami, způsobem užívání aj. Proto budou tyto oblasti v bakalářské práci rovněž okrajově zmíněny.

Dalším důvodem pro zpracování tohoto tématu v bakalářské práci je stále rostoucí množství nově vznikajících druhů materiálů. Nelze říct, kolik druhů materiálů ve skutečnosti existuje. Např. ve slitinách stačí malá změna poměru jednotlivých látek, a výsledná slitina tím získává jiné vlastnosti (ocel a litina se liší jen o jednotky procent obsahu uhlíku, ale jejich mechanické vlastnosti jsou zásadně odlišné).

Výběr materiálu v této práci bude proveden za pomoci materiálové databáze Ansys Granta EduPack [3], která obsahuje více než 4 000 druhů materiálů. V praxi se z takového množství materiálů nevybírá. Každá firma má své vlastní portfolio materiálů, které jsou pro ni dostupné a má s nimi zkušenosti. Na druhou stranu se ale připravují o možnosti, které by jim nové materiály přinesly.

## 2 Definice materiálů a jejich vlastností

### 2.1 Rozdělení materiálů

Jak již bylo řečeno v úvodu, existuje rozsáhlé množství druhů materiálů. Ty je třeba uspořádat tak, aby se v nich dalo lépe orientovat a vhodně vybírat pro dané účely. Materiály byly rozděleny do šesti materiálových rodin. Jedná se o kovy, keramiky, skla, polymery, elastomery a hybridní materiály. Každá z těchto rodin má svoje vlastní specifikum. Díky tomu si lze pod názvem rodiny představit, co se od jejích materiálů může očekávat, tj. jaké budou mít vlastnosti, jakým technologickým postupem je bude možné zpracovat atp.

#### Kovy

Základní rozdělení kovů je na kovy železné a neželezné. Z kovů se málokdy používá čistý prvek, který pro použití bývá často příliš měkký. V praxi se spíše používají slitiny, což je směs dvou a více prvků. Poměr prvků ve slitině má významný vliv na vlastnosti celé slitiny. Pro kovy je typický vysoký Youngův modul pružnosti v tahu. Většinou jsou také poddajné a houževnaté, díky čemuž je lze zpracovávat technologií tváření. Vlastnosti jako teplota tání nebo zabíhavost do formy bývají u kovů dostatečné na to, aby se z nich mohly vyrábět také odlitky.

#### Keramiky

Keramiky mají stejně jako kovy vysoký Youngův modul pružnosti, ale jejich zpracování je náročnější, protože jsou tvrdší, a tím i křehčí. Na druhou stranu, oproti kovům, odolávají daleko lépe vyšším teplotám. Navíc mají obvykle spolu s tvrdostí vysokou odolnost vůči otěru. Jak je pro křehké materiály typické, pevnost v tlaku je několikanásobně vyšší než pevnost v tahu. V případě keramiky může být tento rozdíl až patnáctinásobný. Nevýhodou je menší odolnost vůči proměnlivému zatížení. Ve strojírenství se používá především rezná keramika, např. pro břitové destičky obráběcích nástrojů nebo jako ložiska.

#### Skla

Skla jsou podobně jako keramiky velmi křehká, avšak postrádají jejich pevnost. Tyto vlastnosti jsou dány amorfní strukturou skla. Nejčastější způsob zpracování je tváření za tepla. Touto technologií je dosaženo hladkého povrchu. Navíc jsou průhledná nebo alespoň průsvitná.

#### Polymery

Jejich vlastnosti jsou velmi odlišné ode všeho, co bylo doposud popsáno. Jejich mechanické vlastnosti jsou celkově výrazně nižší než u kovů nebo keramik. Např. mají až padesátkrát nižší Youngův modul pružnosti než kovy. Dále je třeba myslet na rozsah provozní teploty. Většinu z nich nelze použít při teplotách nad 100 °C, protože již byla překročena teplota skelného přechodu, zatímco okolo bodu mrazu jsou často křehké a slabé. Mezi výhody se řadí jejich nízká hustota. Díky tomu v poměru pevnost ku hustotě vycházejí lépe než kovy, pokud tato pevnost není překročena. Další výhodou je jejich energeticky nenáročná a levná zpracování. Např. technologií vstřikování lze vyrobit až desítky kusů v jedné dávce.

## Elastomery

Elastomery jsou polymerní řetězce propojené Van der Waalsovými silami. V důsledku toho dosahují extrémních hodnot elastické deformace. Mají nízký Youngův modul pružnosti, řádově  $10^{-3}$  GPa, což je o pět řádů níž, než je typické pro kovy. Během výroby je zásadní fáze vulkanizace, kterou elastomer získává svůj tvar.

## Hybridní materiály

Hybridní materiály vznikají kombinací dvou a více materiálů. V této kategorii neexistuje taková vlastnost, která by byla typická pro všechny hybridy. Materiály se propojují právě podle toho, která vlastnost je požadována. Ve složení se ale jistě pravidlo nachází – mají tvrdou a houževnatou část. Tvrdá část je ve formě vláken nebo částic ponořená v matici a díky tomu celek není křehký. Podle struktury se pak dělí na kompozity, sendvičové struktury, segmentové struktury, mřížky a pěny.

## 2.2 Materiálové vlastnosti

Materiály jsou definovány hodnotami jejich vlastností. Díky nim lze materiály navzájem rozlišovat a porovnávat. Hodnoty vlastností se definují z materiálových zkoušek, během nichž se sesbírá velké množství dat. Tím vznikne statistika, která je dále vyhodnocena a zapsána do tabulek.

Definice byly převzaty ze zdrojů [2] a [4].

### 2.2.1 Obecné vlastnosti

Hustota  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] – označuje počet kilogramů na jednotku objemu. Její velikost závisí na atomové stavbě dané látky. Je tedy závislá na umístění v periodické soustavě prvků.

Cena za kilogram  $C_R$  [kč/kg] – je cena za kilogram materiálu. Částka je stanovena velkoobchodním trhem.

### 2.2.2 Mechanické vlastnosti

- Elastický modul
  - V tahu  $E$  [GPa] – známý též jako Youngův modul pružnosti, platí v oblasti Hookova zákona – v lineární části grafu závislosti napětí na deformaci (Obr. 1). V grafu je znázorněn jako sklon přímky. Čím je přímka strmější, tím je vyšší hodnota  $E$  a materiál je tužší.
  - Ve smyku  $G$  [GPa] – je obdobou Youngova modulu pružnosti. Rozdíl je v tom, že směr působení síly neprochází podél osy součásti, ale je na ni kolmý.
  - Objemový  $K$  [GPa] – vyjadřuje odezvu materiálu vůči hydrostatickému tlaku.
  - Poissonovo číslo  $\nu$  [-] – udává vztah mezi zmíněnými moduly pružnosti. Vypočítá se jako poměr prodloužení ve smyku a tahu.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad (2.2.1)$$

kde  $\varepsilon_2$  je poměrné prodloužení ve smyku [-], a  $\varepsilon_1$  je poměrné prodloužení v tahu [-].

Vztahy mezi moduly jsou následující:

$$E = \frac{3G}{1 + G/3K}, \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (2.2.2)$$

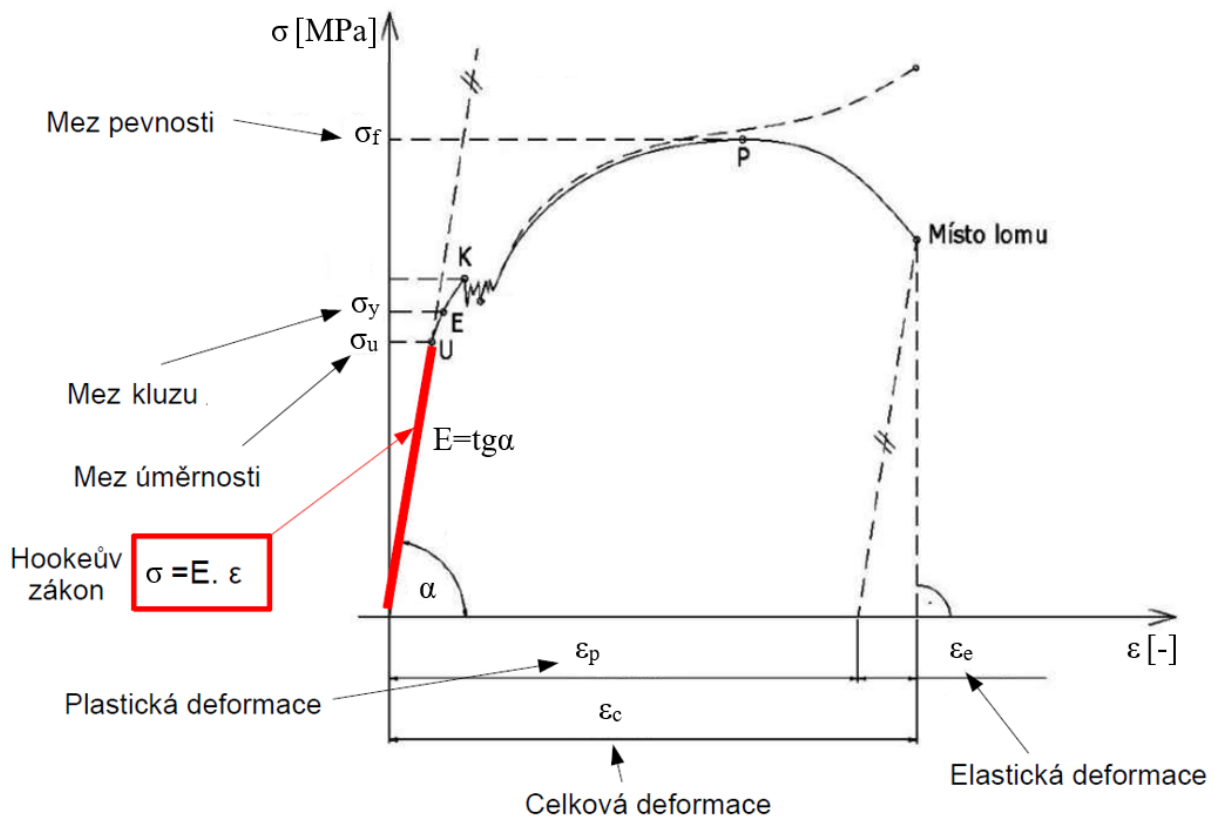
- Napětí
  - Mez kluzu  $\sigma_y$  [MPa] – je hodnota napětí, při které začíná docházet k trvalé (plastické) deformaci.
  - Mez pevnosti  $\sigma_f$  [MPa] – po překročení této hodnoty již materiál nedokáže snést další zatížení. U křehkých materiálů zde dochází k lomu. Houževnaté materiály vůči zatížení přestávají klást odpor a dochází k nekontrolované deformaci. K samotnému lomu dochází později (Obr. 1). Hodnota meze pevnosti při zatížení tahem může být odlišná od zatížení tlakem.
- Poměrné prodloužení  $\varepsilon$  [-] – je definováno pro tahové zatížení. Určuje se jako poměr změny délky tělesa ku původní délce:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (2.2.3)$$

kde  $l$  je délka vzorku po zatížení [mm] a  $l_0$  je původní délka [mm].

- Tažnost  $A$  [%] – je poměrné prodloužení v procentech z počáteční délky:

$$A = \varepsilon \cdot 100, \quad (2.2.4)$$



Obr. 1: Diagram tahové zkoušky: napětí – deformace [5]

- Tvrdost  $H$  [HR, Vickers, Brinell, ...] – je odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Má více druhů jednotek, protože existuje více způsobů měření. Obecně jde o vtlačení tělíska určitou silou do měřeného povrchu. Hodnota tvrdosti se určí vyhodnocením otisku, které tělísko v povrchu zanechá.



- Únavová pevnost  $\sigma_c$  [MPa] – je definována jako největší hodnota napětí, při kterém součást snese teoreticky neomezený počet cyklů změn zatížení.
- Houževnatost  $G_{Ic}$  [kJ/m<sup>2</sup>] a lomová houževnatost  $K_{Ic}$  [MPa·m<sup>1/2</sup>] – je odolnost materiálu vůči vzniku a šíření trhliny.

### 2.2.3 Termomechanické vlastnosti

- Teplota tání  $T_m$  [°C nebo K] – je teplota, při které dochází ke změně skupenství z tuhého na kapalnou, nebo obráceně.
- Teplota skelného přechodu  $T_g$  [°C nebo K] – stejně jako teplota tání vyjadřuje změnu skupenství, ale používá se pro nekystalické látky, které se projevují jinak než krystalické. Nejčastěji se používá v souvislosti s polymery. Přechod je zde mezi sklovitým a kaučukovitým stavem.
- Maximální provozní teplota  $T_{max}$  [°C nebo K] – označuje maximální teplotu, při které komponenta snese zatížení, na které byla dimenzována a nedochází k oxidaci ani jiným chemickým změnám.
- Minimální provozní teplota  $T_{min}$  [°C nebo K] – pod touto teplotou je materiál křehký a výrobce nezaručuje spolehlivou funkčnost.
- Tepelná kapacita  $C$  [J/kg·K] – je veličina, která vyjadřuje, kolik joulů tepla je třeba dodat, aby se teplota jednoho kilogramu hmoty zvýšila o jeden kelvin. Může být ve dvou formách. První je při konstantním objemu (značka  $C_v$ ), druhý za konstantního tlaku ( $C_p$ ).
- Tepelná vodivost  $\lambda$  [W/m·K] – charakterizuje schopnost materiálu přenášet teplo v důsledku rozdílu teploty. Definuje množství tepla  $Q$  [J], které při ustáleném stavu projde za jednotku času mezi dvěma protilehlými stěnami krychle o délce hrany 1 m, je-li rozdíl teplot mezi těmito stěnami 1 K. Obecně mají největší vodivost čisté kovy. Nejlepším vodičem tepla je stříbro. Tepelná vodivost se někdy udává porovnáním s tepelnou vodivostí stříbra v procentech.
- Koeficient tepelné roztažnosti  $\alpha$  [K<sup>-1</sup>] – je změna délkové nebo objemové jednotky při změně teploty o 1 K. U odlitků, součástí ze spékáných materiálů a součástí z plastů se naopak mluví o smrštivosti, která je opakem roztažnosti.

### 2.2.4 Elektrické vlastnosti

- Rezistivita  $\rho_e$  [Ω·m] – popisuje odpor vodiče o délce 1 m a průřezu 1 mm<sup>2</sup>. Pro méně vodivé a pro nevodivé materiály je  $\rho_e$  definováno jako odpor mezi protilehlými stěnami krychle o straně 1 cm. Nejlepším vodičem elektrického proudu je stříbro, měď a hliník. Nejlepším izolantem by bylo dokonalé vakuum.
- Elektrická vodivost  $G$  [S] – je schopnost vést elektrický proud. Jedná se o převrácenou hodnotu rezistivity. Podle vodivosti se materiály dělí na vodiče a nevodiče neboli izolanty. Mezi nimi je skupina materiálů se zvláštními vlastnostmi, kterým říkáme polovodiče (např. selen, germanium, křemík apod.). Elektrická vodivost se posuzuje podle měrné elektrické rezistivity  $\rho_e$ .
- Relativní permitivita  $\epsilon_r$  [-] – vyjadřuje polarizaci dielektrika v elektrickém poli. Její hodnota je podílem absolutní permitivity daného materiálu a permitivity vakua.

### 2.2.5 Optické vlastnosti

- Index lomu  $n$  [-] – popisuje odraz paprsku světla při kontaktu s materiálem. Závisí na vlnové délce a barvě a drsnosti povrchu.

### 2.2.6 Ekologické vlastnosti

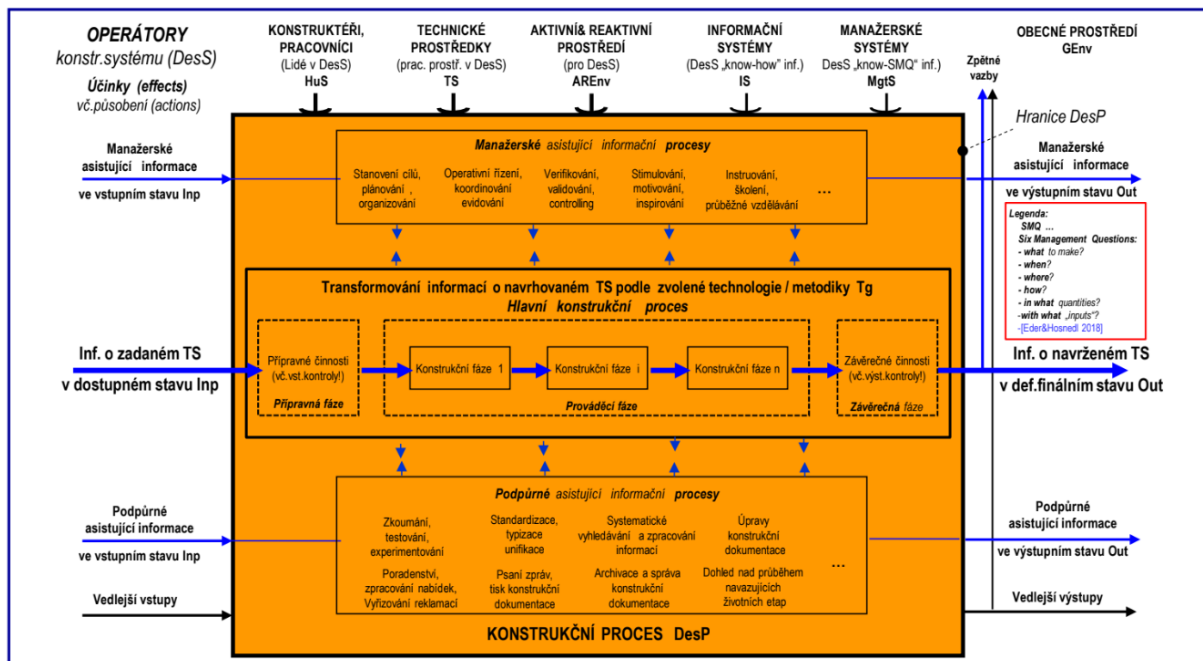
- Vnitřní energie  $H_m$  [MJ/kg] – vyjadřuje, kolik megajoulů energie je potřeba na výrobu jednoho kilogramu materiálu z rudy nebo jiných surovin.
- Uhlíková stopa  $CO_2$  [kg/kg] – vyjadřuje, kolik kilogramů oxidu uhličitého je vyprodukováno při zpracování jednoho kilogramu materiálu.

### 3 Metodika výběru materiálu

Materiál se vybírá na základě specifikací produktu. Specifikace se provádí během konstrukčního procesu, který je popsán v následující kapitole.

#### 3.1 Konstrukční proces

Produkt v konstrukčním procesu lze chápat jako technický systém (TS) s mnoha vstupy, výstupy a subsystémy. V tomto případě jsou na vstupu i výstupu informace (Obr. 2).



Obr. 2: Konstrukční proces [6]

Cílem konstrukčního procesu je transformovat vstupní informace na výstupní. Vstupní informace jsou ve formě požadavků na produkt. Dělí se na stanovené, závazné a všeobecně předpokládané. Vycházejí z potřeb zákazníků, prostoru na trhu (konkurence) a z legislativních opatření. Výstupní informace popisují detailní finální strukturu takového technického systému, který vyhovuje všem zadaným i dalším požadavkům. Jinými slovy, jde o úplný popis technického systému potřebný pro jeho realizaci (obvykle výrobu). [6]

V předchozím odstavci bylo popsáno, co se děje na začátku a na konci konstrukčního procesu. Následuje popis toho, co se děje uvnitř. Transformování prochází několika konstrukčními fázemi. Prof. Michael F. Ashby ve své knize [2] popsal tři: koncept, ztělesnění a popsání detailů.

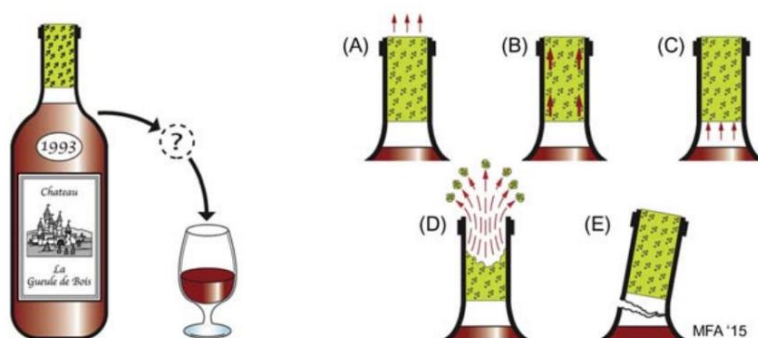
Počátečním bodem je soupis všech požadavků. Jedná se o výše popsané vstupní informace. Konceptuální fáze vyjadřuje základní mechanismus, na kterém má celý technický systém fungovat. Nepopisuje konkrétní podobu budoucího produktu, ale jeho funkční strukturu a principy na kterých stojí.

Konkrétní podobu vykresluje až druhá fáze – ztělesnění. Je vybrán takový koncept, který se zdá být nejvýhodnější a hledá se způsob, jakým bude následně uskutečněn. Je potřeba vybrat vhodné komponenty, jejich rozměry a materiál. Pro tyto účely se používají CAD systémy. Při konstruování se zohledňuje rozložení napětí, pracovní teplota, odhaduje se cena a výkon aj. Na konci této fáze je připraven výkres sestavy.

Fáze ladění detailů slouží k provedení optimalizací a výrobních výkresů, přípravě výroby, provedení testů a určení ceny nadcházejícího produktu. Na konci této fáze je produkt plně specifikován.

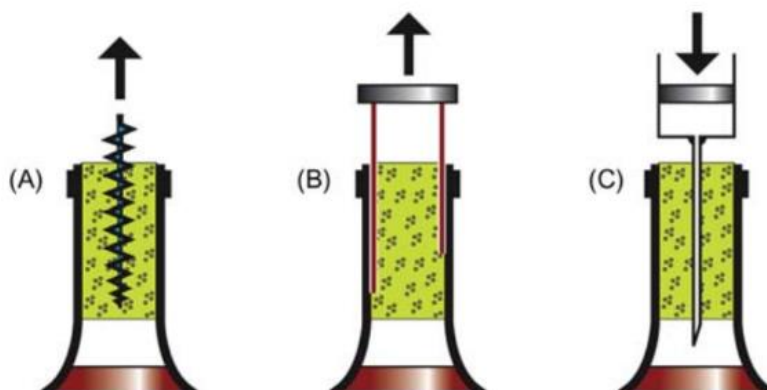
Mezi fázemi probíhají iterace. Některé koncepty nevedou k vhodnému řešení, ale to se může ukázat až ve finální fázi. Většinou také nelze hned z konceptu odhadnout, který je vlastně nejvýhodnější, a proto jich bývá zpracováno několik.

Pro lepší srozumitelnost bude vše vysvětleno na příkladu, ve kterém je potřeba přelit víno z lahve do sklenice (Obr. 3, vlevo). Cílem je odstranit korkovou zátku. Ve fázi konceptu jsou navrženy tyto mechanismy: různé rozložení tlaku (Obr. 3, A, B a C), odstranění pomocí eroze (Obr. 3, D) nebo odlomení celého hrdla (Obr. 3, E).



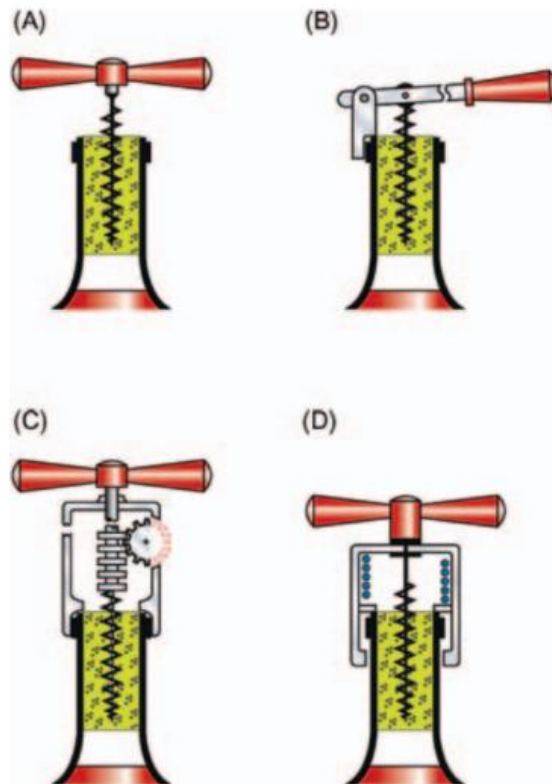
Obr. 3: Koncept [2]

Po vyhodnocení všech předložených konceptů bylo rozhodnuto blíže se zaměřit na první tři návrhy a vytvořit konkrétnější mechanismus (Obr. 4). První možnost je odstranit korek pomocí vývrtky, která je vtlačena do korku a následně vytažena i s korkem. Druhá možnost naopak sevře korek z boku. Třetí funguje na principu vytvoření přetlaku v lahvi. Stále se jedná o fázi konceptu.



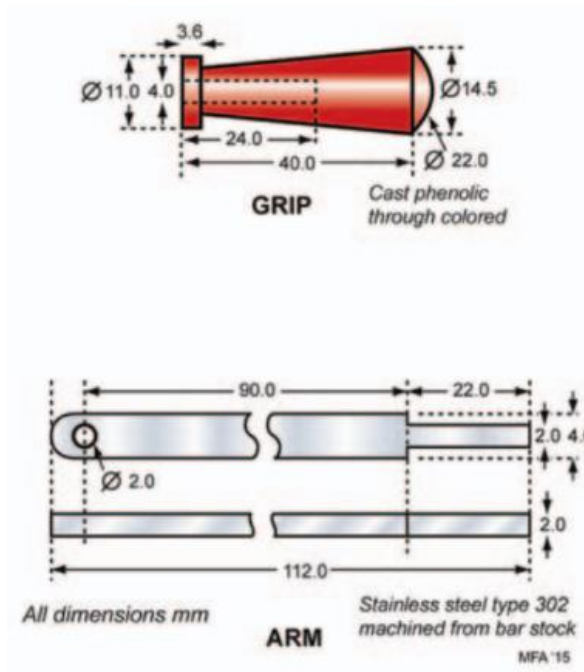
Obr. 4: Pracovní principy [2]

Z těchto tří návrhů byla vybrána možnost A – odstranit korek pomocí vývrtky. Přechází se na fázi ztělesnění. To v tomto případě znamená určení způsobu, jakým bude korek s vývrtkou vytáhnout. Možnosti jsou znázorněny na Obr. 5



Obr. 5: Ztělesnění [2]

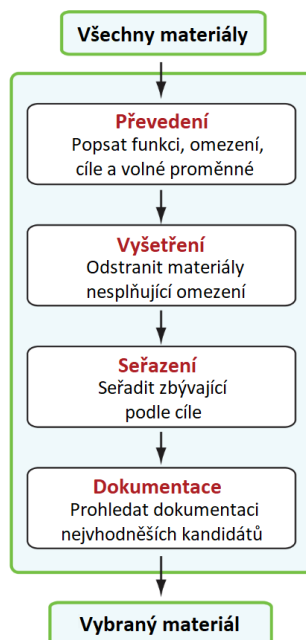
Byl vybrán způsob B, pro nějž byl vytvořen výkres sestavy. Rukojeť bude vyrobena ze dřeva, zatímco vývrtka a páka z kovu. Nyní se přistoupí ke třetí fázi – zhotovit výrobní výkres, vybrat konkrétní materiál atd. (Obr. 6)



Obr. 6: Popsání detailů [2]

## 3.2 Proces výběru materiálu

Po definování specifikací produktu lze přejít k vlastnímu výběru materiálu. Produkt se často skládá z různých komponent plnící různé funkce a každá z nich může být z jiného materiálu. Proto je potřeba řešit každou komponentu zvlášť. Proces výběru materiálu popisuje, jak se z celého spektra dostupných materiálů dojde k volbě jednoho konkrétního. Skládá se ze čtyř fází: převedení, vyšetření, seřazení a dokumentace (Obr. 7).



Obr. 7: Schéma procesu výběru materiálu [2]

### 3.2.1 Převedení

Prvním krokem je identifikace funkce komponenty. Záleží na parametrech typu, zdali je přenáшено osové nebo smykové zatížení. Dále se na funkci nahlíží z pohledu materiálových vlastností. Konstruktor si pokládá otázku, jaké vlastnosti musí mít materiál, aby funkci spolehlivě plnil. Sepsané vlastnosti jsou pak rozřazeny do kategorií omezení, cíle a volné proměnné. V této fázi se stále počítá se všemi materiály, které jsou k dispozici.

Funkce se na materiálové vlastnosti převádí pomocí definovaných veličin. Veličiny a jejich jednotky byly popsány v kapitole 2.2. Ke správnému převedení jsou potřebné znalosti a zkušenosti, které konstruktor časem získá.

### 3.2.2 Vyšetření

V této fázi se pozornost věnuje kategorii omezení. Na materiály je kladena omezující hodnota, která má podobu čísla a jednotky (např. 20 MPa), odpověď typu ano/ne nebo definované spektrum odpovědí (např. velmi dobré, dobré, nevhodné). Materiály nesplňující zadaná kritéria jsou tímto odstraněny ze seznamu použitelných materiálů.

Hraniční hodnoty vycházejí z požadavků v konstrukčním procesu. Mohou mít např. podobu minimální hodnoty modulu pružnosti. Patří sem také řešení otázky výroby produktu.

Pokud bude produkt vyráběn technologií tváření za studena, pak musí být materiál dostatečně houževnatý.

Na začátku fáze vyšetření byly k dispozici všechny dostupné materiály. Kladením omezení byly odstraněny ty materiály, které nemohou spolehlivě plnit požadovanou funkci.

### 3.2.3 Seřazení

Po vyřazení nevyhovujících materiálů zbývá ještě příliš mnoho možností, ze kterých by se nejlepší možný materiál stále složitě vybíral. Proto je třeba určit takový cíl či kritérium, pomocí něhož by se materiály seřadily od nejlepšího po nejhorší. Cíl je navíc další specifikace produktu, která zajišťuje jeho konkurenceschopnost. Pokud je např. cílem produktu co nejnižší hmotnost výrobku, pak se za kritérium považuje snížit na minimum hustotu materiálu  $\rho$ , která s hmotností přímo souvisí. Přitom ani nemusí mít vliv na funkci produktu jako takového. Statický produkt jako je např. nábytek může být funkční, ať váží jeden nebo deset kilogramů. Nicméně v tomto případě by se jako nejlepší materiál definoval ten, který má hustotu nejnižší při zachování všech ostatních omezení.

Za cíl může být vybrána jakákoliv materiálová vlastnost nebo dokonce jejich kombinace. Důležité ale je provázat mezi sebou vlastnosti takovým způsobem, aby se vždy hledalo maximum nebo minimum tohoto výrazu, díky čemuž dojde k seřazení. Více o tom, jak se stanovují cíle, se píše v kapitole 3.3 o materiálových indikátorech.

### 3.2.4 Dokumentace

Po provedení seřazení jsou na vrcholu seznamu nejvhodnější materiály. Nejde ale o to vybrat ten, který je první v pořadí, protože první nemusí být automaticky nejlepší. V tuto chvíli je třeba prostudovat dokumentaci k několika nejvýše umístěným možnostem. Podívat se do tabulek, norem, jejich historie použití, zjistit, zda při jejich použití nedošlo k selhání, popř. jakým způsobem nebo z jaké příčiny. Dále je vhodné zjistit, jakým způsobem se materiály používají v současné době, protože i tato informace může být návodná, pokud mezi oběma produkty existuje korelace.

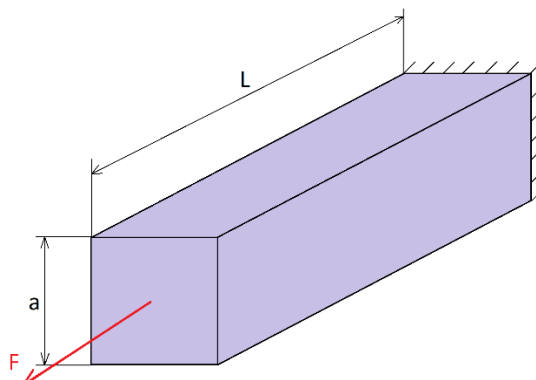
## 3.3 Materiálové indikátory

Jak bylo řečeno v kapitole 3.2.3, materiálové indikátory vycházejí z cíle definující optimální materiál a slouží k seřazení zbývajících materiálů od nejlepších po nejhorší. Indikátorem je materiálová vlastnost, jako třeba houževnatost nebo teplota tání. Pokud je ale cíl spjat alespoň s jedním z omezení (viz kapitola 3.2.2), pak nelze za indikátor považovat samostatnou vlastnost a omezení se v indikátoru projeví ve formě rovnice. Cílem této kapitoly je popsat způsob formulace rovnice a následné pochopení jejího významu.

Samotný indikátor se označuje písmenem  $M$ . Nelze jednoznačně určit jeho jednotky, protože vyplývají z toho, jaké veličiny se v něm zrovna nacházejí. Důležitější je samotné číslo, protože na všechny materiály se budou vztahovat stejné jednotky a rozdílná bude pouze hodnota, podle níž pak mohou být materiály seřazeny. Následně přicházejí na řadu zmíněné kategorie funkce, omezení, cíl a volná proměnná. Metodika bude popsána za pomoci tří příkladů na jednoduchých komponentách.

### Příklad 1

Prvním příkladem je prut zatížený osovou silou  $F$  se čtvercovým průřezem o ploše  $A=a^2$  a délce  $L$  (Obr. 8)



Obr. 8: Prut zatížený na tah

Přenos osové síly patří do kategorie funkce komponenty. Kategorie omezení, cíl a volné proměnné jsou rozděleny následovně: omezením se rozumí, že v prutu nesmí dojít k překročení pevnosti v tahu  $\sigma_f$  zmenšenou o bezpečnost  $s$ . Cílem je dosažení minimální hmotnosti  $m$ . Co se týče geometrie, délka prutu  $L$  je zadána, ale plocha  $A$  je volitelná čímž vzniká volná proměnná. Požadavky jsou sepsány v Tab. 1.

Tab. 1: Souhrn požadavků na prut 1

Požadavky na prut	
Funkce	Přenést tahové zatížení $F$ [N]
Omezení	Délka prutu $L$ [mm]
	Pevnost $\sigma_f$ [MPa]
	Bezpečnost $s$ [-]
Cíl	Minimalizovat hmotnost $m$ [kg]
Volné proměnné	Průřez $A$ [mm <sup>2</sup> ] (strana $a$ [mm])
	Výběr materiálu

Rovnice pro výpočet hmotnosti prutu je následující:

$$m = A \cdot L \cdot \rho, \quad (3.3.1)$$

kde  $A$  je plocha průřezu [mm<sup>2</sup>],  $L$  je délka prutu [mm] a  $\rho$  hustota materiálu [kg/m<sup>3</sup>]. Dále je potřeba rovnice související jak s cílem, tak s omezením:

$$\sigma_f = \frac{F \cdot s}{A}, \quad (3.3.2)$$

kde  $\sigma_f$  je pevnost v tahu [MPa],  $F$  je zatěžující síla [N],  $s$  bezpečnost [-]. Plocha  $A$  [mm<sup>2</sup>] je propojujícím prvkem obou rovnic. Rovnice (3.3.2) je upravena tak, že je z ní vyjádřena plocha  $A$  a následně je dosazena do rovnice (3.3.1). Po úpravě má rovnice pro hmotnost tvar:



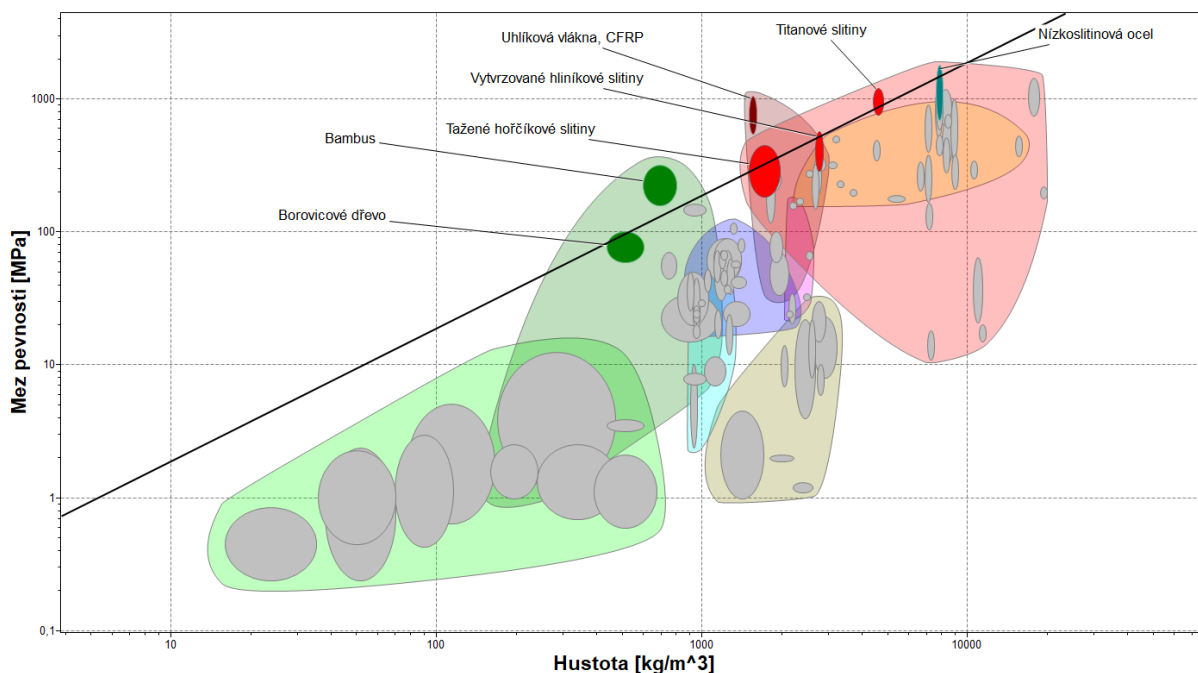
$$m = (F \cdot s)(L) \left( \frac{\rho}{\sigma_f} \right). \quad (3.3.3)$$

Rovnice (3.3.3) je rozdělena do tří závorek podle toho, co vyjadřují. První závorka obsahuje funkční omezení. Prut musí snést zatěžující sílu zvětšenou o bezpečnost. V druhé závorce je omezení geometrické – zadaná délka prutu. Toto jsou pevné hodnoty vyplývající ze zadání. Až třetí závorka obsahuje materiálové vlastnosti, jimiž lze seřadit materiály od nejllehčího po nejtěžší při zachování dostatečné pevnosti. V tomto tvaru se hledá minimum poměru  $\frac{\rho}{\sigma_f}$ . Vhodnější je ale hledat maximum, a proto je indikátor vyjádřen v převrácené hodnotě:

$$M_t = \frac{\sigma_f}{\rho}. \quad (3.3.4)$$

Rovnice vyjadřuje tvar přímky, která se vkládá do grafu (Obr. 9). Grafy v programu ANSYS GRANTA EduPack [3] jsou vykresleny v logaritmickém měřítku. Rovnice (3.3.4) může mít také tvar:

$$\log(\sigma_f) = \log(M_t) + \log(\rho) \quad (3.3.5)$$



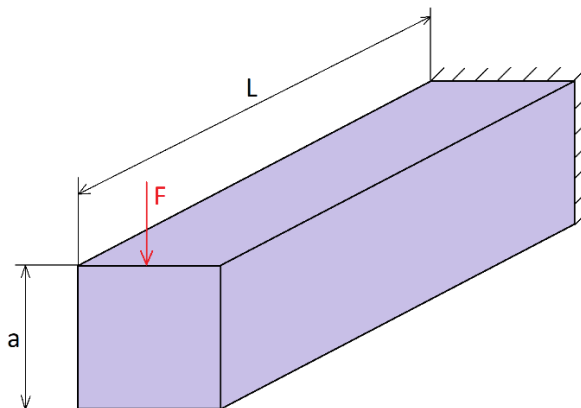
Obr. 9: Graf závislosti napětí na hustotě s indikátorem pro tah [3]

Materiály ležící na jedné přímce mají stejnou hodnotu indikátoru  $M$ . Materiály nad přímkou mají vyšší hodnotu  $M$  než materiály pod ní. Materiál s nejvyšší hodnotou  $M$  je tedy ten, který protne přímka, když je nejvíce vpravo. Podle podmínek z příkladu 1 vychází jako pět nejlepších materiálů:

1. Uhlíková vlákna, CFRP
2. Bambus
3. Titanové slitiny
4. Tažené hořčíkové slitiny
5. Borovicové dřevo

## Příklad 2

Na druhém příkladu bude ukázáno, co se stane s materiálovým indikátorem, pokud se směr síly změní o devadesát stupňů a na prut bude působit ohybovým momentem (Obr. 10). Ostatní podmínky zůstávají stejné a jsou sepsány v Tab. 2.



Obr. 10: Prut zatížený ohybovým momentem

Tab. 2: Souhrn požadavků na prut 2

Požadavky na prut	
Funkce	Přenést ohybové zatížení $F$ [N] na rameni $L$ [mm]
Omezení	Délka prutu $L$ [mm] Pevnost $\sigma_y$ [MPa] Bezpečnost $s$ [-]
Cíl	Minimalizovat hmotnost $m$ [kg]
Volné proměnné	Průřez $A$ [mm <sup>2</sup> ] (strana $a$ [mm]) Výběr materiálu

Rovnice pro výpočet hmotnosti prutu je stejná, ale pro snazší následnou úpravu rovnic je plocha vyjádřena pomocí délky strany:

$$m = A \cdot L \cdot \rho = a^2 \cdot L \cdot \rho, \quad (3.3.6)$$

rovnice obsahující napětí je od minulého příkladu odlišná:

$$\sigma_y = \frac{F \cdot L \cdot s}{\frac{I}{e}}, \quad (3.3.7)$$

kde se nově nachází kvadratický moment  $I$  [mm<sup>4</sup>] a  $e$  [mm] značící vzdálenost krajního vlákna od neutrální osy. V tomto případě pro vzdálenost krajního vlákna  $e$  a kvadratický moment čtvercového průřezu  $I$  o straně  $a$  platí:

$$e = \frac{a}{2}, \quad I = \frac{a^4}{12}. \quad (3.3.8)$$

Po dosazení rovnice (3.3.8) do (3.3.7) a vyjádření  $a$  vznikne:

$$a = \left( \frac{6 \cdot F \cdot L \cdot s}{\sigma_y} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.3.9)$$

Nakonec stačí dosadit  $a$  do rovnice (3.3.6), upravit a výsledkem je:

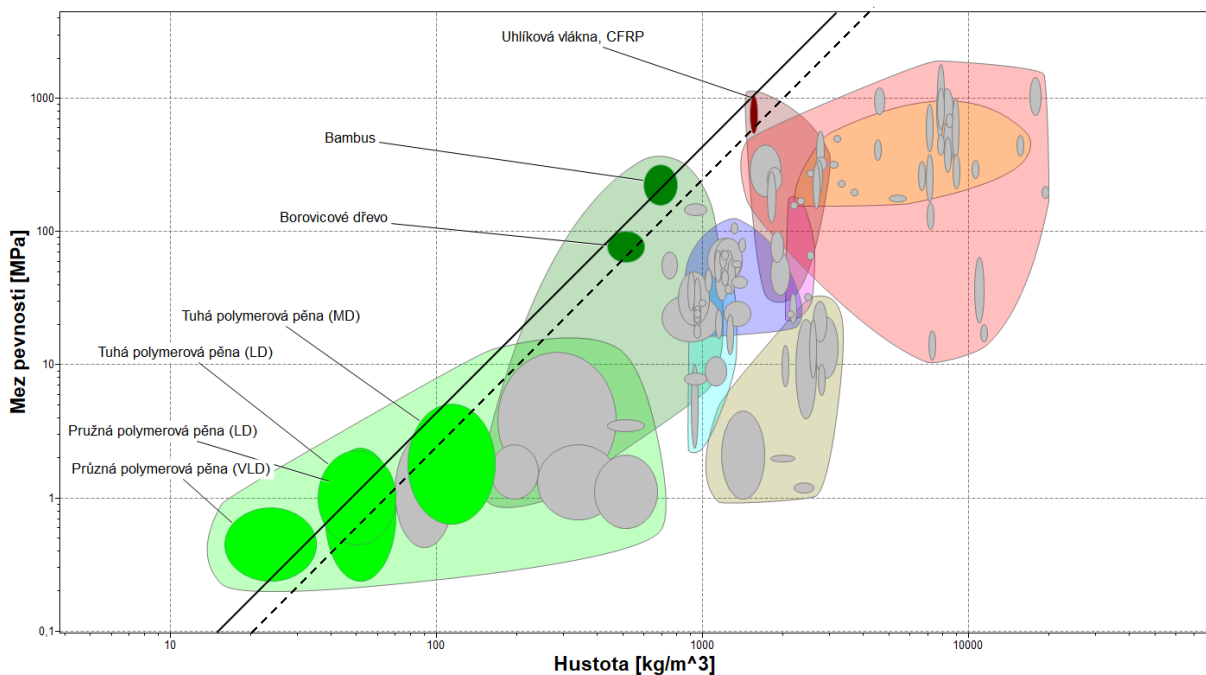
$$m = (6 \cdot F \cdot L \cdot s)^{\frac{2}{3}} \cdot (L) \cdot \left( \frac{\rho}{\sigma_y^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (3.3.10)$$

Porovnáním s rovnicí (3.3.3) je rozdíl v první a třetí závorce. Ve funkčním omezení se nyní nachází více parametrů, což materiálový indikátor neovlivní. Tento vliv má třetí závorka. Z té vychází, že bude použit ten samý graf závislosti napětí na hustotě jako u příkladu 1. To je z důvodu, se zde používají stejné veličiny. Rozdíl bude ve sklonu přímky (Obr. 11), protože napětí je tentokrát v mocnině na dvě třetiny:

$$M_o = \frac{\sigma_y^{\frac{2}{3}}}{\rho}. \quad (3.3.11)$$

Přepis do logaritmického tvaru vypadá následovně:

$$2 \text{ Log}(\sigma_y) = 3 \text{ Log}(M_o) + 3 \text{ Log}(\rho). \quad (3.3.12)$$



Obr. 11: Graf závislosti napětí na hustotě s indikátorem pro ohyb [3]

Změna směru síly způsobila, že se mezi prvních pět nejlepších materiálů dostaly mimo jiné polymerové pěny:

1. Pružná polymerová pěna (VLD)
2. Bambus
3. Tuhá polymerová pěna (LD)

4. Uhlíková vlákna, CFRP
5. Borovicové dřevo

Důsledkem logaritmického měřítka je také vysoká citlivost, která znamená, že každé posunutí přímkou v grafu popisuje výraznou změnu ve vlastnostech materiálů. Na Obr. 11 je tento rozdíl znázorněn plnou a čárkovanou přímkou. Poměr napětí ku hustotě je pro materiály ležící na plné přímce desetkrát vyšší než pro materiály na přímce čárkované, a to vzhledem k cíli činí materiály na plné přímce desetkrát lepšími.

Tento postup určování materiálového indikátoru vychází z toho, že hmotnost závisí na stejné veličině jako omezující pevnost. Jedná se o objem materiálu. Pokud má prut nedostatečnou pevnost, pak je lze tento nedostatek vykompenzovat zvětšením průřezu prutu (čímž zároveň vzroste objem, a tím hmotnost). Navíc neexistuje materiál, který by se v grafu napětí – hustota nacházel v levém horním rohu, tj. měl vysokou pevnost a nízkou hustotu. Se vzrůstající pevností roste i hustota. Jsou tedy dva extrémní případy k dosažení dostatečné pevnosti. Buď může být prut z materiálu s nízkou hustotou, ale širokým průřezem, anebo tenký prut s vysokou hustotou. Materiálový indikátor slouží k nalezení rovnováhy mezi oběma možnostmi.

### Příklad 3

Nyní bude zopakován příklad 2 s ohybovým momentem (Obr. 10), ale s novým cílem. Prut má být co nejlevnější. Požadavky jsou shrnuty v Tab. 3.

Tab. 3: Souhrn požadavků na prut 3

Požadavky na prut	
Funkce	Přenést ohybové zatížení $F$ [N] na rameni $L$ [mm]
Omezení	Délka prutu $L$ [mm] Pevnost $\sigma_y$ [MPa] Bezpečnost $s$ [-]
Cíl	Minimalizovat cenu $C$ [kč]
Volné proměnné	Průřez $A$ [mm <sup>2</sup> ] (strana $a$ [mm]) Výběr materiálu

Výchozí rovnice, ze které lze vypočítat cenu za materiál je:

$$C = C_R \cdot m = C_R \cdot a^2 \cdot L \cdot \rho, \quad (3.3.13)$$

kde  $C_R$  je měrná cena za kilogram materiálu [kč/kg]. Dále v rovnici figuruje hmotnost, a proto je následující postup obdobný:

$$\sigma_y = \frac{F \cdot L \cdot s}{\frac{I}{e}}, \quad (3.3.14)$$

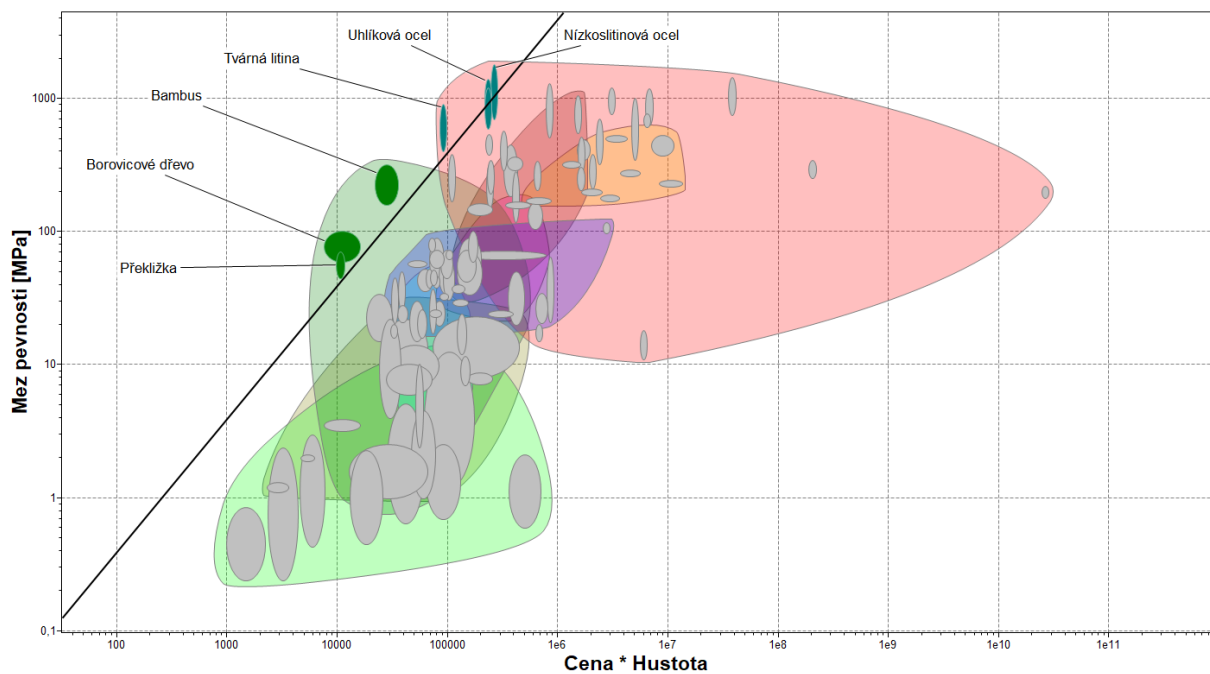
kde kvadratický modul i vzdálenost krajního vlákna jsou stejná jako v rovnici (2.3.8). Vyjádřením strany  $a$  a dosazením do rovnice (3.3.13) vyjde:

$$C = (6 \cdot F \cdot L \cdot s)^{\frac{2}{3}} \cdot (L) \cdot \left( \frac{\rho \cdot C_R}{\sigma_y^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (3.3.15)$$

Výsledkem je stejná rovnice jako v předchozím příkladu, ale navíc vynásobena měrnou cenou za kilogram materiálu. Materiálový indikátor má tvar:

$$M_{oc} = \frac{\sigma_y^{\frac{2}{3}}}{\rho \cdot C_R} \quad (3.3.16)$$

Tentokrát bude použit jiný graf, a to ten vyjadřující závislost napětí na ceně za kilogram hmoty.



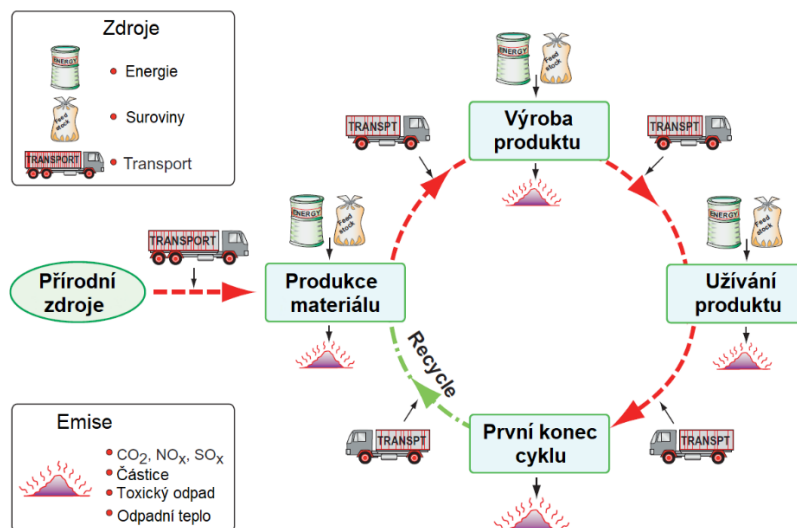
Obr. 12: Graf závislosti napětí na měrné ceně s indikátorem pro ohyb [3]

1. Tvárná litina
2. Nízkolegovaná ocel
3. Vysokouhlíková ocel
4. Středně uhlíková ocel
5. Nízkouhlíková ocel

Je důležité si uvědomit, že cena za materiál je jen část výdajů. Z grafů nelze vyčíst, kolik bude stát zpracování, údržba aj.

## 4 Ekologické zhodnocení materiálu

Životní cyklus produktu má čtyři fáze. Produkce materiálu, výroba produktu, jeho užívání a likvidace (Obr. 13). V každé etapě dochází ke znečištění ovzduší částicemi CO<sub>2</sub>, sulfidy, kyselinami a dalšími nepříznivými látkami. Dále se spotřebovává elektrická energie, jejíž produkce také životní prostředí zatěžuje. Mezi fázemi rovněž figuruje transport se stejnou problematikou. Všechny tyto formy znečištění i spotřebu je možné alespoň přibližně vyčíslit a porovnat s alternativními možnostmi výběru materiálu a zpracování.

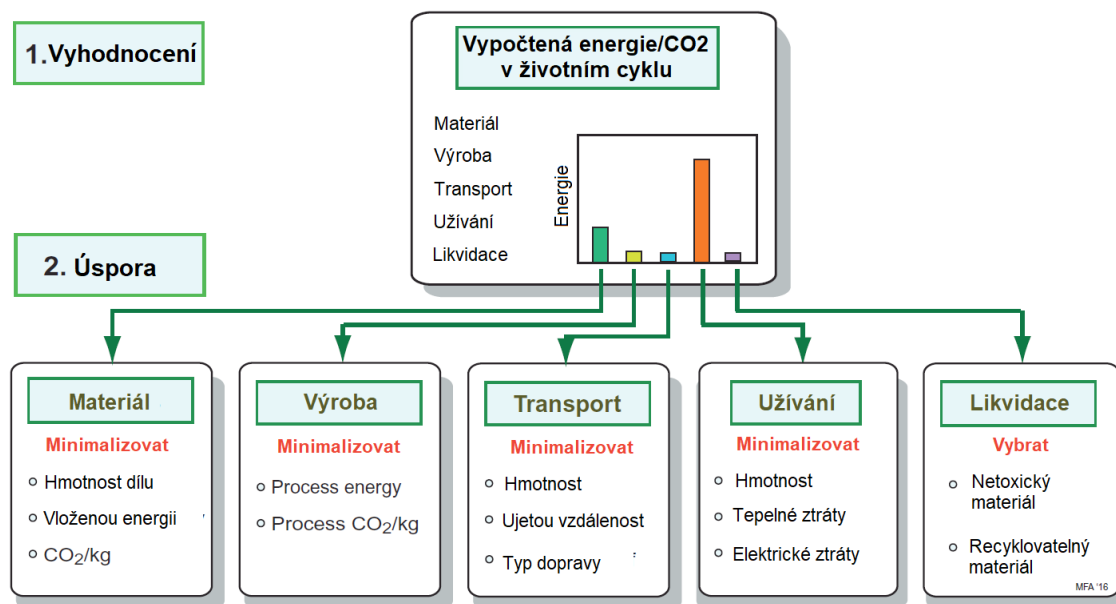


Obr. 13: Životní cyklus produktu [2]

Téměř u každého produktu existuje jedna dominantní fáze, během níž dochází k výrazně většímu znečištění než u ostatních fází. Není výjimkou, že tvoří až 90 % z celkového znečištění za celý životní cyklus. Číselné hodnoty se s výhodou vkládají do grafu, odkud lze rozložení znečištění snadno a rychle odečíst. Při hledání ekologicky nejméně zatěžujícího řešení je vhodné se zaměřit na dominantní fázi a hledat způsoby, jak omezit právě její znečišťování. Zabývat se ostatními fázemi nemá takový význam, jako u fáze dominantní.

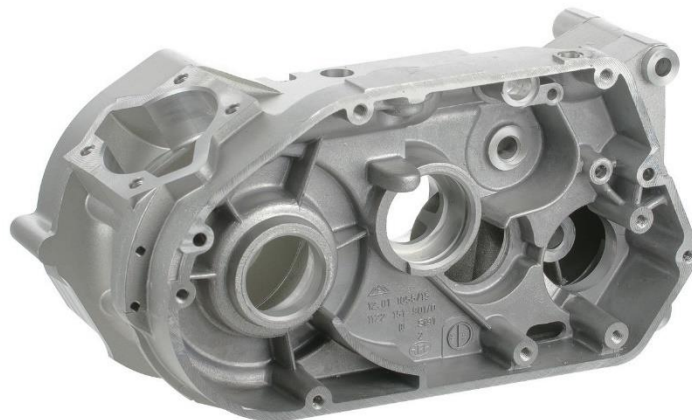
Obecně největší vliv na znečišťování má hmotnost (Obr. 14). Důsledkem vysoké hmotnosti je např. vyšší spotřeba dopravních prostředků během přepravy. S těžším, resp. objemnějším dílem, rostou též nároky na jeho zpracování (např. nutnost použití větších strojů) i likvidaci. Konstruktor se tedy zabývá i tím, jak může materiál ušetřit (např. tvarem průřezu, nebo materiál s vyšší mezí kluzu).

Další způsoby úspory energie jsou znázorněny na Obr. 14.



Obr. 14: Vyhodnocení znečištění [2]

Rozhodnutí s důrazem na ekologii často nejsou jednoznačně správná nebo špatná. Každá alternativa má své výhody a nevýhody. Na příkladu z Obr. 15. je popsána problematika, jak může vypadat rozhodování při volbě technologie výroby. Zda-li je z ekologického hlediska výhodnější slévání nebo obrábění.



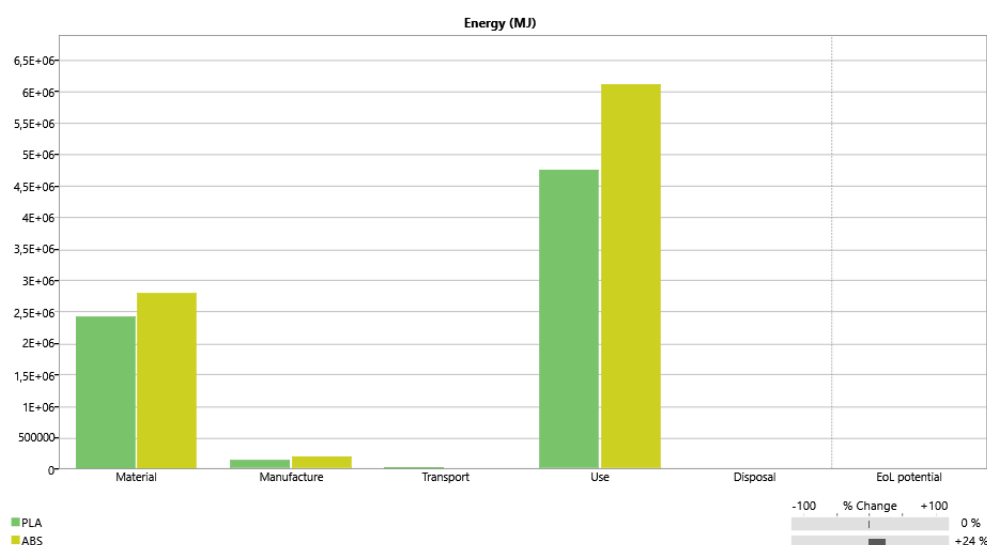
Obr. 15: Karter [7]

V tomto případě bylo vypočteno, že technologií obrábění lze dosáhnout nižší konečné hmotnosti, než když bude díl vyroben jako odlitek. Karter je součástí motorového vozidla a jeho hmotnost má vliv na spotřebu paliva. Jako obrobek bude mít tedy konečný produkt v užité fázi nižší spotřebu než odlitek. Na druhou stranu obrobek může trvat několik hodin – bude spotřebováno mnoho energie. Vyrobit tento díl jako odlitek by tedy mohlo být efektivnější, ale pouze v případě, že se bude vyrábět dostatečný počet kusů, pro který se vyplatí vyrábět odlévací formu. Navíc je třeba vzít v úvahu konečný rozdíl hmotností odlitku a obrobku a vypočítat, jestli se investice do energeticky náročnější operace (v tomto případě obrábění) ve fázi užívání vrátí a vyplatí.

Ohledně přepravy dílů je třeba vyhodnotit výhodnější typ dopravy. Takové rozhodování může mít podobu, zda nechat převézt díly jedním kamionem s větší spotřebou, nebo dvěma dodávkami se spotřebou nižší.

V této bakalářské práci je vyčíslení provedeno pomocí softwaru Ansys Granta edupack nástrojem Eco Audit. Tento nástroj poskytuje hrubý odhad znečištění. Výhodou je velice rychlé a snadné zhodnocení ekologického zatížení a porovnávání více variant v jednom grafu.

Ukázka bude provedena na 10 000 kusech senzorkové jednotky. Tato jednotka je připevněna na motocyklu, odkud snímá situaci na vozovce. V případě zaznamenání překážky posílá signál řidiči. Skládá se z baterie, mikropočítače (raspberry) a plastového krytu. Životnost produktu se očekává po dobu sedmi let. Bylo požadováno vyhodnocení mezi kryty vyrobenými z termoplastu PLA a ABS. Nástroj Eco Audit po vyhodnocení poskytl následující graf (Obr. 16):



Obr. 16: Vyhodnocení spotřeby energie termoplastů PLA a ABS [3]

Zelené sloupce znázorňují materiál PLA a žluté ABS. Z prvních dvou sloupečků zleva je zřejmé, že zpracování materiálu PLA je energeticky méně náročné než ABS. Transport jednotek byl nastaven na průměrnou vzdálenost 1 000 km menšími dodávkami ze skladu k zákazníkům. Jeho spotřeba je ale ve srovnání s ostatními fázemi tak zanedbatelně malá, že v grafu téměř ani není vidět. Ve fázi užívání je třeba zmínit informaci, kterou z grafu nelze vyčíst. Materiál ABS má lepší mechanické vlastnosti než PLA, a proto byla jeho životnost zvýšena ze sedmi na devět let. Graf ukazuje spotřebu v součtu za celý životní cyklus. V přepočtu na rok je spotřeba energie pro PLA  $1,05 \cdot 10^6$  MJ/rok a pro ABS  $1,02 \cdot 10^6$  MJ/rok. Při těchto podmínkách je tedy kryt z termoplastu ABS výhodnější, protože má spotřebu energie o 30 000 MJ/rok nižší.



## 5 Příklad řešení – stožár městského osvětlení

V tomto příkladě bude popsán výběr materiálu pro stožáry veřejného osvětlení. Na příkladu bude praktickým způsobem ukázána metodika popsána v teoretické části bakalářské práce. Nejprve bude proveden rozbor problematiky ve fázi převedení, následně vyřazení nevyhovujících materiálů ve fázi vyšetření a zbylé materiály budou ve fázi seřazení uspořádány od nejvhodnějších po ty nejméně vhodné. Fáze seřazení bude vyhodnocena třikrát pro různé materiálové indikátory. Účelem tohoto rozdělení je ukázat, jak změna cíle ovlivní výběr materiálu při jinak stejných podmínkách.

Na závěr bude vybrán jeden z materiálů a s ním bude celá problematika dovedena až do konce včetně vyhodnocení znečištění CO<sub>2</sub> a spotřeby elektrické energie.

### 5.1 Fáze převedení

#### Účel produktu:

Zajistit stabilní podporu pro městské osvětlení navzdory různorodému působení meteorologických podmínek. Vítr způsobuje namáhání v ohybu, kterému musí stožár odolat. Stožár je namáhán také na vzpěr, ale ten je oproti ohybu zanedbatelný. Z toho důvodu bude stožár dimenzován na ohybové namáhání. Dále je třeba zajistit připojení svítidla k napájení z elektrické sítě.

#### Specifikace produktu:

##### Geometrie

Jedná se o dřívový stožár specifikovaný dle normy ČSN EN 40-2 [8]. Jmenovitá výška stožáru je  $h = 4$  [m]. Stožár má profil trubky o vnějším průměru  $D$  a vnitřním průměru  $d$ . Průměry nejsou specifikovány, a proto se pokládají za volnou proměnnou. Za účelem výpočtu s jednou proměnnou jsou oba průměry provázány vztahem  $\frac{d}{D} = \frac{3}{4}$ .

Profil trubky má několik výhod. Při nižší hmotnosti dosahuje vyšší tuhosti než plný profil. Dále je možné vnitřním otvorem vést kabely a zajistit tak elektrické vedení od země až ke svítidlu. Poslední zmíněnou výhodou je symetričnost profilu, díky kterému stačí provést výpočet v jedné svislé rovině.

##### Prostředí

Stožár bude stát v otevřeném prostranství, kde musí snést změnu teploty, působení UV záření, prudký déšť, kroupy a nepodléhat korozi. Dle [9] může být stožár vystaven teplotám od -20°C až do 60°C v závislosti na ročním období. Korozivzdornost ve fázi vyšetření nebude omezující hodnotou, protože tento nedostatek materiálu lze nahradit povrchovými úpravami. Životnost stožáru se očekává alespoň deset let.

##### Technologie

Způsob zpracování polotovaru do finálního tvaru není předem zadán, ale bude jedním z faktorů při výběru materiálu v závěrečné části příkladu. Na konci životního cyklu je od materiálu požadována recyklovatelnost.

## Zatížení

Stožár musí snést zatížení vyvolané nárazy větru s maximálním průhybem definovaným normou ČSN EN 40-3-3 [10]. Velikost maximálního průhybu vychází z Tab. 4.

Tab. 4: Maximální vodorovný průhyb [10]

Třída	Maximální vodorovný průhyb
1	$0,04(h + w)$
2	$0,06(h + w)$
3	$0,10(h + w)$

Písmeno  $h$  označuje výšku sloupu a  $w$  je délka vyložení pro výložníkové stožáry. Pro tento příklad byl zvolen dřívkový sloup třídy 3. Ten vyložení nemá a jeho délka je proto nulová. V tomto případě je hodnota maximálního průhybu:

$$\Phi_D = 0,10 \cdot 4 = 0,4 \text{ m.} \quad (5.1.1)$$

Skutečný průhyb nosníku je závislý na typu materiálu, geometrii součásti a rozložení a velikosti zatížení. Rozložení zatížení taktéž závisí na geometrii součásti. Tuhost součásti je proto v tuto chvíli neznámá. Požadavek tuhosti spadá do kategorie omezení, ale bude potřebný až během určování materiálového indikátoru a výpočtu průměru stožáru.

## Cíle

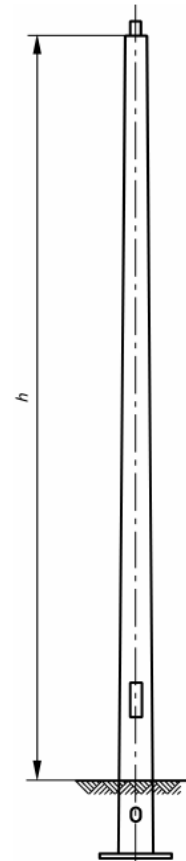
První cíl je minimalizace ceny stožáru. Ta se odvíjí od ceny za kilogram, a proto je součástí požadavku také minimalizace hmotnosti. Hmotnost ale není možné snižovat neomezeně, protože je dále závislá na objemu materiálu. Na druhou stranu, z normy ČSN EN 40-3-3 [10] vyplývá, že produkt musí být dostatečně tuhý, což znamená mimo jiné i to, že stožár musí mít dostatečně široký průřez a důsledkem širšího průřezu je vyšší hmotnost. V kapitole 5.3.1 bude proto určen materiálový indikátor udávající závislost mezi Youngovo modulem pružnosti a hustotou materiálu.

V druhém případě zůstává cíl stejný – minimalizace ceny. Na rozdíl od prvního cíle zde není řešeno statické namáhání, ale namáhání dynamické, které více odpovídá reálným podmínkám. Vítr na stožár působí proměnlivě z různých stran a v různých časových intervalech. Materiálový indikátor bude nově obsahovat i únavovou pevnost  $\sigma_c$ .

Třetí řešení je pouze teoretické a odpovídá na otázku, z jakého materiálu by se stožáry vyráběly, kdyby nezáleželo na ceně. Cílem je tedy snížení hmotnosti při zachování dostatečné únavové pevnosti.

### Souhrn požadavků:

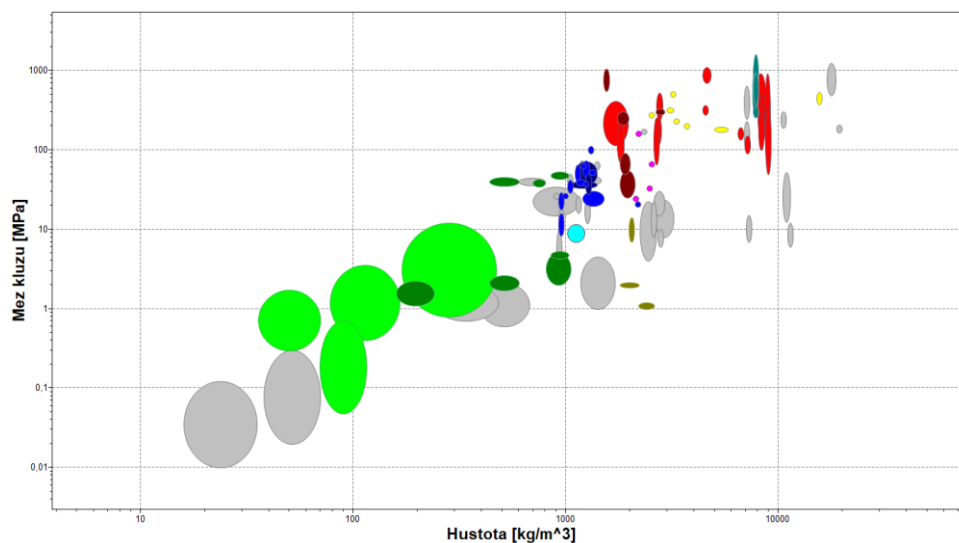
- Funkce:
  - odolat ohybovému namáhání způsobeného větrem
  - ochrana kabelů vedených sloupem.
- Omezení:
  - Geometrické
    - Výška  $h = 4m$
  - Funkční
    - Tuhost  $S [N/m]$
    - Teplotní odolnost  $(-20)$  až  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$
    - Odolat UV
    - Nerozpustnost ve vodě
  - Technologické
    - Recyklovatelnost
- Cíl:
  - a) minimalizovat cenu pro staticky namáhaný stožár
  - b) minimalizovat cenu pro dynamicky namáhaný stožár
  - c) minimalizovat hmotnost
- Volné proměnné:
  - Průměr  $D [mm]$
  - Výběr materiálu



Obr. 17: Osvětlovací stožár [8]

## 5.2 Fáze vyšetření

V databázi Ansys Granta EduPack byla zvolena druhá úroveň obsahující 100 různých materiálů. Vložením výše popsaných omezujících hodnot bylo vyřazeno 33 materiálů, které nemohou spolehlivě vykonávat předepsanou funkci. Rozdíl je vidět na Obr. 18, kde šedé značky představují vyřazené materiály. Znázornění bylo provedeno na náhodném grafu, na volbě os v tuto chvíli nezáleželo.



Obr. 18: Vyřazení materiálů nespĺňujících kritéria

## 5.3 Fáze seřazení (určení materiálového indikátoru)

### 5.3.1 Minimalizace ceny pro tuhý stožár

Při výpočtu materiálového indikátoru s cílem minimalizovat cenu je výchozím vztahem součin celkové hmotnosti a ceny za kilogram:

$$C = m \cdot C_m. \quad (5.3.1)$$

Hmotnost lze rozepsat jako součin rozměrů a hustoty:

$$m = A \cdot h \cdot \rho, \quad (5.3.2)$$

kde  $A$  je plocha průřezu [ $\text{mm}^2$ ],  $h$  je zadaná výška stožáru [ $\text{mm}$ ] a  $\rho$  hustota materiálu [ $\text{kg/m}^3$ ]. Pro plochu průřezu trubky platí vzorec:

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2), \quad (5.3.3)$$

přičemž průměry  $D$  a  $d$  [ $\text{mm}$ ] jsou volnými proměnnými. V zadání je tuhost  $S$ , závisící na rozměrech produktu a vlastnostech materiálu. Podle [2] je výpočet dán vztahem:

$$S = \frac{E \cdot I}{h^3} C_2, \quad (5.3.4)$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu [ $\text{GPa}$ ],  $I$  je kvadratický moment [ $\text{mm}^4$ ],  $h$  je výška sloupu [ $\text{mm}$ ] a  $C_2$  je konstanta vyjadřující rozložení zatížení. Kvadratický moment  $I$  je závislý na průměrech  $D$  a  $d$ :

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4). \quad (5.3.5)$$

Průměry  $D$  a  $d$  byly převedeny do poměru za účelem pracovat ve vzorcích pouze s jednou proměnnou. Za průměr  $d$  bude nyní dosazeno:

$$\frac{d}{D} = \frac{3}{4} \rightarrow d = \frac{3}{4} D \quad (5.3.6)$$

Nyní je do vzorce (5.3.4) za  $I$  dosazen vzorec (5.3.5) přičemž za průměr  $d$  je dosazeno podle (5.3.6). Ze vzorce (5.3.4) je vyjádřen průměr upraven do tvaru:

$$D^2 = \sqrt{\frac{64 \cdot 256 \cdot S \cdot h^3}{175 \cdot E \cdot \pi \cdot C_2}}. \quad (5.3.7)$$

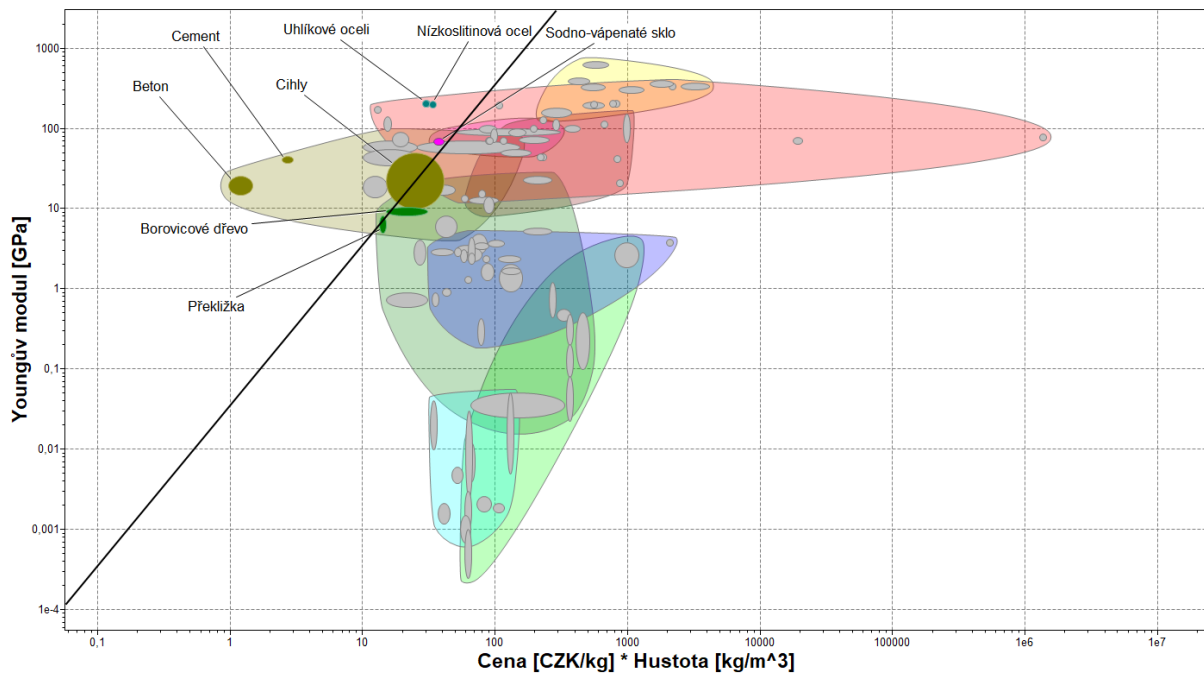
Nakonec je dosazeno (5.3.2), (5.3.3) a (5.3.7) do (5.3.1) a tím vzniká rovnice:

$$C = \left( \frac{7S}{25C_2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{\pi \cdot h^5}{64} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\rho \cdot C_m}{E^{\frac{1}{2}}}. \quad (5.3.8)$$

Rovnice je upravena tak, že první člen popisuje funkční omezení, druhý člen geometrické omezení a ve třetím členu jsou materiálové vlastnosti, ze kterých je vyjádřen materiálový indikátor. Jedná se o převrácenou hodnotu tohoto členu:

$$M_a = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho \cdot C_m} \quad (5.3.9)$$

Nejvhodnější materiál je tedy takový, který dosahuje nejvyšší hodnoty  $M_a$ . Nyní je tato rovnice aplikována do grafu (Obr. 19):



Obr. 19: Seřazení dle materiálového indikátoru  $M_a$  [3]

Dle materiálového indikátoru jsou nejvhodnější materiály:

1. Beton (obsahující cement):  $M = 3,66$
2. Uhlíkové oceli:  $M = 0,48$
3. Nízkolegovaná ocel:  $M = 0,423$
4. Sodnovápenaté sklo:  $M = 0,223$
5. Cihly:  $M = 0,19$
6. Borovicové dřevo:  $M = 0,142$

Beton a cement jsou dva různé materiály s různými hodnotami materiálového indikátoru. Existuje mezi nimi ale spojitost, protože cement je součástí betonové směsi. Aby se do výčtu materiálů dostalo více diverzity, byly sloučeny na prvním místě. To samé platí pro uhlíkovou ocel. Program Ansys Granta EduPack rozlišuje vysoko, středně a nízko uhlíkovou ocel. V tomto případě mají dokonce identickou hodnotu materiálového indikátoru a byly sloučeny na jedno místo ze stejného důvodu, jako beton a cement.

Rozbor materiálů bude proveden ve fázi dokumentace (kap. 5.4).

### 5.3.2 Minimalizace ceny pro dynamicky namáhaný stožár

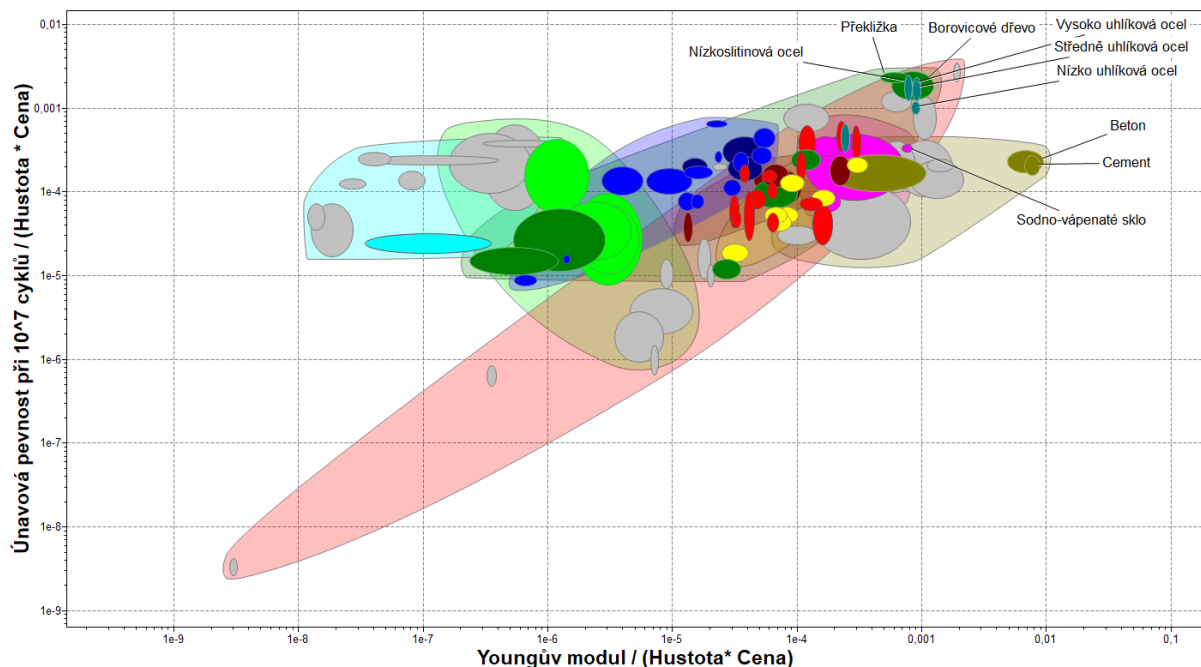
Tento případ je od předchozího složitější v tom, že je třeba řešit hned dva materiálové indikátory. Stožár musí stále splňovat tu samou podmínku tuhosti z předchozího řešení:

$$M_a = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho \cdot C_m} \quad (5.3.10)$$

a materiálový indikátor pro únavovou pevnost je převzat z [2]:

$$M_b = \frac{\sigma_c^{\frac{2}{3}}}{\rho \cdot C_m} \quad (5.3.11)$$

Tyto hodnoty byly vyneseny na osy x a y. Tím, že jsou indikátory vztažené do os, není potřebná přímka určující nejlepší poměr hodnot jako v předchozím případě. Nejlepší materiály se tentokrát nacházejí v pravém horním rohu, protože se hledá maximální hodnota pro oba poměry.



Obr. 20: Seřazení dle materiálového indikátoru  $M_b$  [3]

Za nejvhodnější materiály byly vyhodnoceny následující:

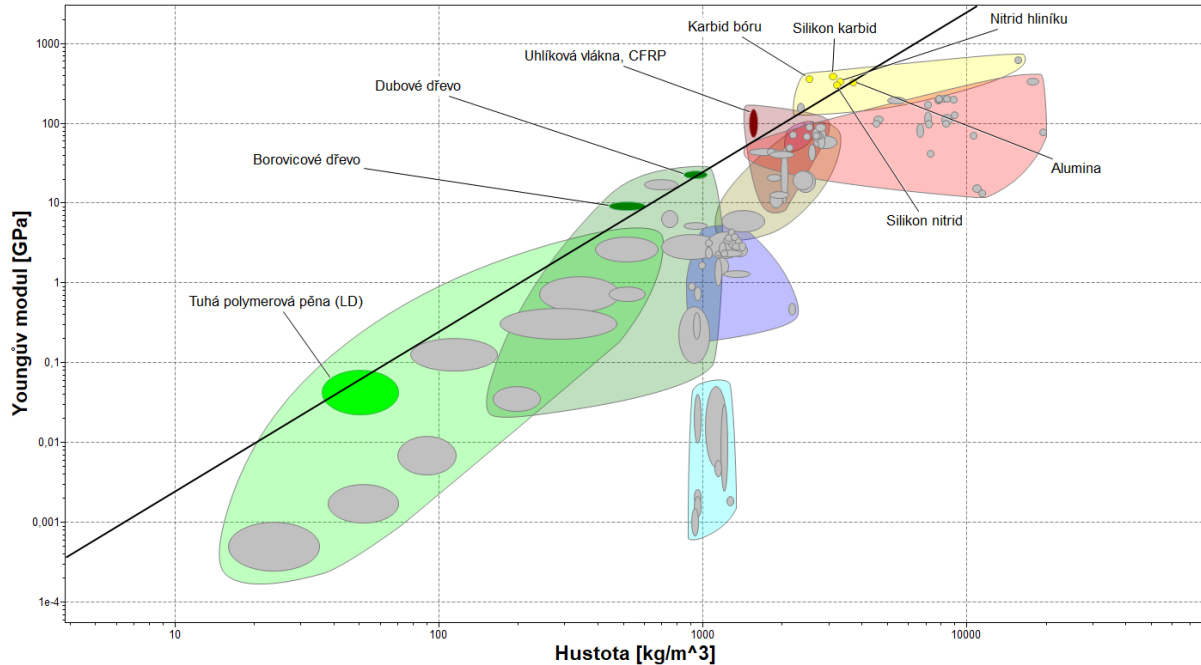
1. Vysokouhlíková ocel
2. Beton (+ cement):
3. Borovicové dřevo:
4. Středně uhlíková ocel:
5. Překližovaná deska:
6. Nízkolegovaná ocel:

Ve výčtu materiálů se nacházejí stejné materiály jako v případě 5.3.1, liší se pouze v pořadí.

### 5.3.3 Minimalizace hmotnosti

Tento indikátor byl určen podobným způsobem jako v kapitolách 3.3 a 5.3.1 a má tvar:

$$M_c = \frac{1}{\rho} E^2 \quad (5.3.12)$$



Obr. 21: Seřazení dle materiálového indikátoru  $M_c$  [3]

Nejvhodnější materiály jsou:

1. Karbid bóru
2. Uhlíková vlákna (CFRP)
3. Silikon karbid
4. Borovicové dřevo
5. Nitrid hliníku
6. Silikon nitrid

Podle očekávání se do výčtu dostaly kompozitní materiály a vysokopevnostní keramiky, které se používají např. v těžkém strojírenství, leteckém nebo armádním průmyslu. Překvapivý je výskyt borovicového dřeva a tuhé polymerové pěny. To má souvislost s velmi nízkou hustotou materiálu, především pro polymerovou pěnu. Ani jeden z materiálů však není tak pevný jako zbylé materiály z výčtu.

## 5.4 Fáze dokumentace

Výstupy z předchozích kapitol jsou shrnuty v Tab. 5. Následně je popsán výběr nevhodnějšího materiálu. Díky tomu, že materiály z druhého i třetího sloupce jsou až na pořadí stejné, mohou být vyhodnoceny oba zároveň. Platí, že čtvrtý sloupec Tab. 5 s indikátorem  $M_c$  je pouze doplňující a nebude dále vyhodnocován.

Tab. 5: Výsledek materiálových indikátorů  $M_a$ ,  $M_b$  a  $M_c$

Pořadí	$M_a$	$M_a + M_b$	$M_c$
1	Beton (+ Cement)	Vysoko uhlíková ocel	Karbid bóru
2	Uhlíkové oceli	Cement	Uhlíková vlákna (CFRP)
3	Nízkolegovaná ocel	Borovicové dřevo	Silikon karbid
4	Sodnovápenaté sklo	Beton	Borovicové dřevo
5	Cihly	Nízko a středně uhlíková ocel	Nitrid hliníku
6	Borovicové dřevo	Nízkolegovaná ocel	Silicon nitride

Ze všech těchto materiálů lze vyrobit kvalitní dřívkový stožár. Část uvedených materiálů se na výrobu stožárů skutečně používá. Rozhodujícími faktory pro výběr byla technologie výroby (výroba profilu trubky), náročnost transportu stožáru z továrny na místo určení, jednoduché sestavení a bezpečnost v provozu.

Beton je vhodný materiál, protože splňuje všechna zadaná kritéria a zároveň je velmi levný. Nevýhodou je, že se jedná o křehký materiál s nízkou pevností v tahu. Tento nedostatek lze vyvážit ocelovými výztuhami. Betonový stožár by musel být poměrně široký, čímž by vzrostla jeho hmotnost a manipulace s ním by byla náročnější. Výroba betonových konstrukcí zahrnuje čas tuhnutí a musí být vyřešeno vnitřní pnutí, které při tuhnutí nastává.

Ocelové stožáry (uhlíkové i nízkolegované) mohou být vyráběny sériově technologií válcování za tepla. Vnitřní pnutí bude odstraněno normalizačním žíháním. Díky vysokému Youngovu modulu pružnosti ( $E = 210GPa$ ) stačí menší průměr stožáru k dosažení dostatečné tuhosti. Ocel je náchylná ke korozi, a proto musí proběhnout povrchová úprava žárovým zinkováním ponorem dle ČSN EN ISO 1461 [11], což je pro kovové stožáry veřejného osvětlení vyžadovaná procedura. Ocelové stožáry jsou vhodné také z bezpečnostního hlediska, protože při srážce s automobilem je část energie absorbována ve formě plastické deformace, což snižuje účinek nárazu na řidiče. Nízkolegované oceli mají lepší mechanické vlastnosti než uhlíkové a rovněž se vyznačují větší odolností vůči korozi. Nevýhodou nízkolegovaných ocelí je naopak vyšší cena.

Stožár ze skla zahrnuje náročnou výrobu a složitý převoz. Sklo je křehký materiál špatně snášející dynamické zatížení, což se při transportu musí vzít v úvahu. Skleněný stožár také není vhodný z bezpečnostního hlediska. V případě destrukce by došlo k roztržení na střepy. Při výpočtu musí být zohledněna rovněž odolnost vůči přírodním vlivům, zejména vůči krupobití.

Cihlové stožáry oproti stožárům betonovým nemají žádné výhody. Zejména jejich konstruování by bylo velmi obtížné, protože by musely být stavěny přímo na místě určení.



Oproti ostatním způsobům montáže by samotná výstavba probíhala dlouho a vyžadovala by zkušenější pracovníky.

Dřevěný stožár by byl vhodným materiálem v případě, že by se jednalo o stožár s plným průřezem a nemusel by do něj být tvořen otvor. Výhodou dřevěného stožáru je nízká hmotnost a malá tepelná roztažnost. Tomuto materiálu musí být poskytnuta ochrana proti dešti a biologickým vlivům, např. ve formě hniloby či dřevokazného hmyzu.

#### 5.4.1 Specifikace vybraného materiálu

Z předešlého rozboru byl pro stožár jako optimální materiál zvolena uhlíková ocel vyrobená válcováním za tepla a upravena žárovým zinkováním ponorem. Konkrétní materiál byl opět vyhledán v databázi Ansys Granta EduPack [3]. Tentokrát byla využita úroveň databáze tři (která obsahuje přes 4 000 materiálů). Byla vybrána ocel AISI 1030 s obsahem uhlíku 0,3 %. Dle [12] je českým ekvivalentem ocel ČSN 12 031. Montáž k podloží bude provedena kotevními šrouby splňující požadavky EN 10025. Toto rozhodnutí je v souladu s normou ČSN EN 40-5 [13].

Následuje výpočet průměru stožáru. K tomu je potřeba určit zatížení, které na stožár působí. Zatížení bylo vypočítáno dle normy ČSN EN 40-3-1 [14]:

$$q = \delta \cdot \beta \cdot f \cdot c_e \cdot q(10) = 1868 \text{ N/m}, \quad (5.4.1)$$

kde:

- $\delta = 0,96 [-]$  ... součinitel velikosti stožáru,
- $\beta = 1,95 [-]$  ... součinitel závislý na dynamickém chování stožáru,
- $f = 1 [-]$  ... součinitel topografie,
- $c_e = 1,56 [-]$  ... součinitel závislý na kategorii terénu a výšce lokality nad terénem,
- $q(10) = 638,76 \text{ [N/m]}$  ... referenční tlak větru ve výšce 10 metrů nad zemí při rychlosti větru 120km/h.

Výchozí vztah pro výpočet vnějšího průměru stožáru je

$$\sigma = \frac{M_{omax}}{W_o}, \quad (5.4.2)$$

kde  $M_{omax}$  je maximální ohybový moment [N.m] a  $W_o$  je modul průřezu v ohybu [ $\text{mm}^3$ ]. Při spojitém zatížení se maximální ohybový moment vyjádří jako:

$$M_{omax} = \frac{q \cdot h^2}{2}, \quad (5.4.3)$$

toto zatížení působí u paty stožáru. Pro modul průřezu v ohybu platí:

$$W_o = \frac{I}{e} = \frac{\frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)}{\frac{D}{2}}, \quad (5.4.4)$$

kde  $e$  je vzdálenost krajního vlákna [mm]. Z těchto tří vztahů se určí minimální průměr stožáru  $D_{min}$ :

$$D_{min} = \sqrt[3]{\frac{4096 \cdot q \cdot h^2}{175 \cdot \pi \cdot \frac{\sigma_c}{S_z}}} = 0,098 \text{ m}, \quad (5.4.5)$$

kde:

- $\sigma_c = 356 [MPa]$  ... mez únavy dle databáze [3],
- $s_z = 1.5 [-]$  ... zvolená bezpečnost,
- čísla 4096 a 175 vycházejí z poměru mezi vnějším a vnitřním průměrem  $\frac{d}{D} = \frac{3}{4}$ .

Dále byla dle strojnických tabulek [15] zvolena trubka TR  $\emptyset 102 \times 5$  ČSN 42 5715.01 – 12 031 S vnějším průměrem  $D = 102$  [mm] a tloušťkou stěny  $t = 5$  [mm]. Z toho vyplývá, že vnitřní průměr má velikost  $d = 92$  [mm]. Hustota oceli  $\rho_k = 7800 \text{ kg/m}^3$ . Hmotnost jednoho stožáru je:

$$m = A \cdot h \cdot \rho_k = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot h \cdot \rho_k = 47,5 \text{ kg}. \quad (5.4.6)$$

Posledním výpočtem je kontrola průhybu. Výpočet skutečného průhybu vychází z rovnice průhybové čáry. Při spojitém zatížení bude velikost průhybu u hlavy stožáru rovna:

$$\phi_{sk} = \frac{q \cdot h^4}{8 \cdot E \cdot I} = 0,158 \text{ m}. \quad (5.4.7)$$

Podílem dovoleného průhybu (viz rovnice (5.1.1)) ku skutečnému vyjde únavová bezpečnost stožáru:

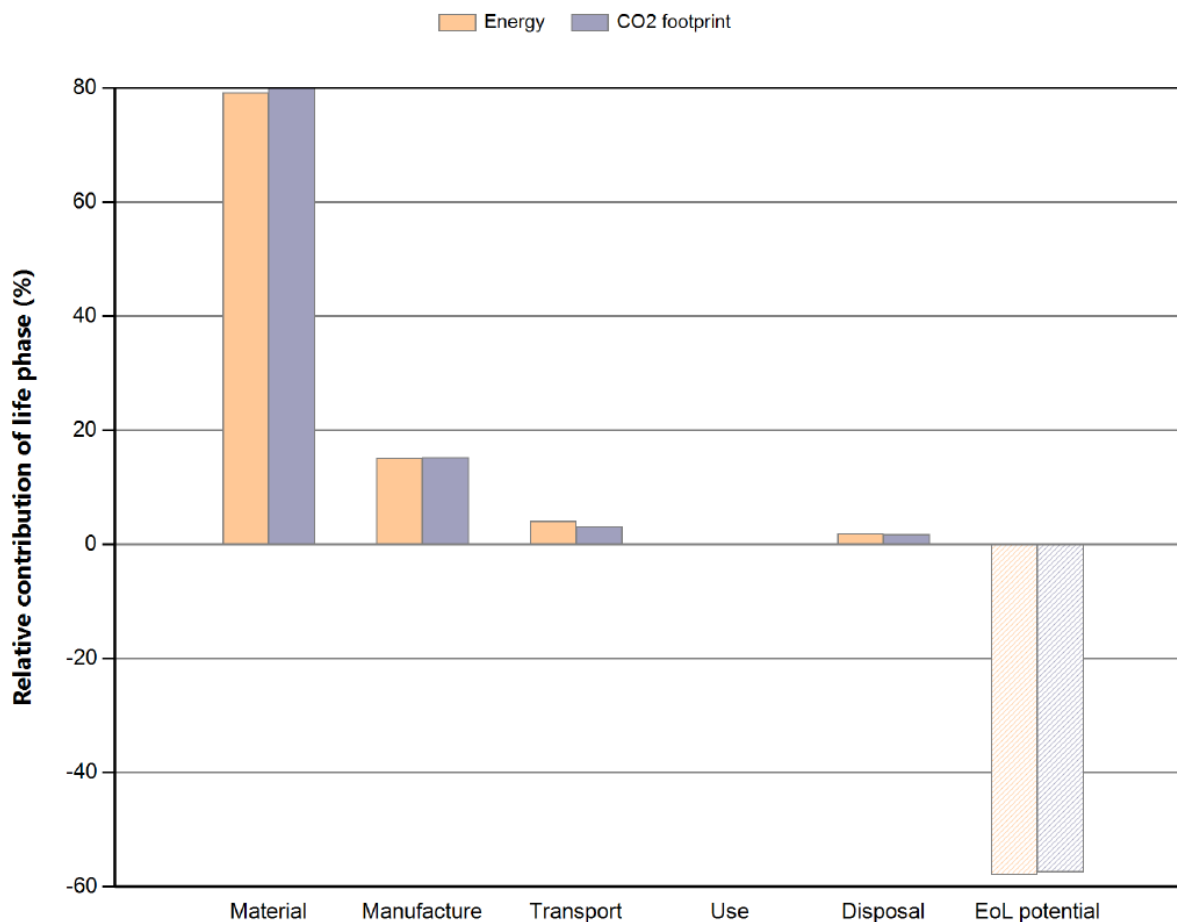
$$s = \frac{\phi_D}{\phi_{sk}} = \frac{0,4}{0,158} = 2,52. \quad (5.4.8)$$

Protože bezpečnost vyšla větší než jedna, podmínka tuhosti byla splněna.

## 5.5 Vyhodnocení spotřeby energie a uhlíkové stopy

Následuje vyhodnocení spotřeby energie a znečištění prostředí v průběhu celého životního cyklu za pomoci databáze Ansys Granta EduPack nástrojem Eco Audit [3].

Eco Audit byl vyhodnocen pro výrobu 1 000 stožárů. Zadaný materiál je uhlíková ocel AISI 1030, primárním způsobem výroby bylo zvoleno válcování za tepla, hmotnost jednoho kusu je 47,5 kg a na konci životního cyklu je nastaven způsob likvidace recyklací. Stožáry budou převáženy kamionem splňujícím normu EURO 6 s nosností více než 32 tun. Průměrná vzdálenost transportu byla určena na 1000 km. Životnost stožáru byla nastavena na 10 let. Výsledky jsou znázorněny na Obr. 22.



Obr. 22: Graf spotřeby energie a emisí CO<sub>2</sub> [3]

Graf ukazuje procentuální rozložení energetické a emisní náročnosti v průběhu celého životního cyklu. Lze z něj vyčíst, že ekologicky nejnáročnější fází je fáze produkce materiálu. Konkrétní čísla jsou zapsána do Tab. 6.

**Tab. 6: Rozložení emisí a energie v životním cyklu [3]**

Fáze	Energie [MJ]	Energie [%]	CO <sub>2</sub> [kg]	CO <sub>2</sub> [%]
Produkce materiálu	$1,64 \cdot 10^6$	79,1	$1,22 \cdot 10^5$	79,9
Výroba	$3,11 \cdot 10^5$	15,0	$2,33 \cdot 10^4$	15,9
Transport	$8,26 \cdot 10^4$	4,0	$4,75 \cdot 10^3$	3,1
Užívání	0	0	0	0
Likvidace	$3,78 \cdot 10^4$	1,8	$2,65 \cdot 10^3$	1,7
<b>Celkově</b>	<b><math>2,07 \cdot 10^6</math></b>	<b>100</b>	<b><math>1,53 \cdot 10^5</math></b>	<b>100</b>
Navracený potenciál	$-1,2 \cdot 10^6$		$-8,8 \cdot 10^4$	

Snaha eliminovat znečištění prostředí má největší smysl ve fázi produkce materiálu, protože v této fázi dochází k téměř 80% znečištění z celého životního cyklu. Jednou z možností úspory je použití již recyklovaného materiálu místo nově vyrobeného. Dále lze hledat způsoby, jak uspořit objem materiálu. Existují dvě řešení. Jednodušší je celkově snížit tloušťku stěny trubky. Hmotnost by mohla být snížena tak, že bude vybrána trubka s větším průměrem a menší tloušťkou stěny. Tímto způsobem může být dosaženo nižší hmotnosti při zachování dostatečné tuhosti.

Druhé řešení vyplývá z rozložení napětí po celé délce stožáru. Stožár je nejvíce zatížen v místě ukotvení, zatímco na hlavu stožáru již takové zatížení nepůsobí, a proto je zde dostatečný menší průměr. Celkové řešení by tedy bylo, aby byla stožár postupně osazen zmenšujícími se průměry.

U samotného stožáru je výhodné prodloužit životnost co nejdéle je možné, protože ke znečišťování emisemi a spotřebě energie dochází pouze při jeho produkci, transportu a likvidaci. Ve fázi užívání je hodnota znečištění nulová.

## 6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo popsat metodiku výběru materiálu a vše, co je s touto problematikou spojené. Nejprve byly definovány materiály jako takové. Byly popsány společné znaky jednotlivých materiálových rodin a definovány nejpoužívanější materiálové vlastnosti, podle kterých se materiály vybírají.

Dále byl popsán proces konstruování, který s výběrem materiálu úzce souvisí. Během tohoto procesu jsou zaznamenány požadavky na vyvíjený produkt, z nichž jsou převzaty požadavky na materiály. Výběr materiálů je součástí konstrukčního procesu. Má vliv na mechanické, termomechanické i další vlastnosti produktu. K výběru materiálu dochází iteracemi a postupným zpřesňováním požadavků.

Rovněž byly definovány fáze výběru materiálu – převedení, vyšetření, seřazení a dokumentace. Ve fázi převedení byly požadavky z konstrukčního procesu převedeny na materiálové vlastnosti, z nich byla určena omezení, cíle a volné proměnné. V další fázi byla na materiály aplikována omezení. Materiály, které tato omezení nesplňovaly, byly vyřazeny ze seznamu dostupných materiálů.

Byla popsána metodika sestavení materiálového indikátoru, kterým byly materiály seřazeny od nejvhodnějších po ty nejméně vhodné. Pro několik nejvýše umístěných materiálů byly ve fázi dokumentace dohledány materiálové listy a vybrán výsledný materiál.

Jako poslední v pořadí, ale neméně důležitá, byla zpracována tematika ekologického zatěžování. S ohledem na životní prostředí je vhodné odhadnout spotřebu energie a produkci emisí v rámci celého životního cyklu produktu. Tímto odhadem lze zjistit, v jaké fázi životního cyklu dochází k největšímu znečištění. Následně se hledají způsoby snižování znečištění ve vyhodnocené dominantní fázi, protože právě zde to má největší význam. Obecně má na úroveň znečištění vliv výběr technologie zpracování a likvidace, druh dopravního prostředku, jímž dochází k transportu dílů, životnost zařízení, hmotnost komponent aj.

Teoretický postup byl demonstrován na příkladu stožáru pouliční lampy. Pomocí nastavených omezení byla vyřazena třetina materiálů. Zbývající materiály byly seřazeny třemi různými materiálovými indikátory. První měl za cíl seřadit materiály tak, aby byly co nejlevnější a zároveň odolaly statickému namáhání. Druhý měl rovněž za cíl snížit cenu za materiál, ale navíc zohledňoval účinky dynamického namáhání. Cílem třetího indikátoru bylo snížení hmotnosti bez ohledu na cenu za materiál.

Pokud je cílem ušetřit co nejvíce finančních prostředků, pak nelze spoléhat pouze na cenu za jeden kilogram materiálu. Do celkové ceny taktéž vstupuje ekonomická náročnost zpracování, způsob jeho užívání, nebo snadná dostupnost materiálu.

Ze závěrů této problematiky vyplývá, že ve snaze minimalizovat cenu produktu je jistější a jednodušší vybírat z dostupných a ověřených materiálů. To pak může být jedním z důvodů, proč se nové materiály nepoužívají a do výroby nezavádějí tak často, byť by mohly přinést nové možnosti a zlepšit nejen mechanické, ale i jiné vlastnosti produktu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] DIETER, George E. a Linda C. SCHMIDT. Engineering design. 5th ed. New York: McGraw-Hill, c2013. ISBN 978-0073398143.
- [2] ASHBY, Michael F., *Materials Selection in Mechanical Design*. fifth Edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-08-100599-6
- [3] The GRANTA EduPack, *materials and proces selection platforms*, produkt firmy ANSYS/GRANTA, [www.grantadesign.com/education/](http://www.grantadesign.com/education/).
- [4] DRIML, Bohumil. Elektronická skripta: Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: [http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky\\_mat.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf)
- [5] BENEŠ, Petr. *Statické zkoušky* [přednáška]. KMM/NM. Plzeň: ZČU v Plzni
- [6] HOSNEDL, Stanislav. *Metodiky konstruování* [přednáška]. KKS/DFX. Plzeň: ZČU v Plzni
- [7] Kartery motoru Simson SR80. In: Extreme bike [online]. Vytvořeno systémem: [www.eshop-rychle.cz](http://www.eshop-rychle.cz), 2020 [cit. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.extremebike.cz/Kartery-motoru-Simson-SR80-d6316.htm>
- [8] ČSN EN 40-2. *Osvětlovací stožáry: část 2: Obecné požadavky a rozměry*. Nahrazuje EN 40-2:1976. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2005.
- [9] *How hot does pavement get in summer?* [online]. Georgia: University of Georgia, 2022 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://site.extension.uga.edu/climate/2022/05/how-hot-does-pavement-get/>
- [10] ČSN EN 40-3-3. *Osvětlovací stožáry: část 3-3: Návrh a ověření*. 2. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2013.
- [11] ČSN EN ISO 1461. *Povlaky žárového zinku nanesené ponorem na ocelové a litinové výrobky: Specifikace a zkušební metody*. 2. vydání. Praha: Český normalizační ústav, 2023.
- [12] *E-konstruktor: Převodní tabulka* [online]. Brno: Nová média, 2017 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znaceni-oceli-dle-aisi>
- [13] ČSN EN 40-5. *Osvětlovací stožáry: Část 5: Požadavky na ocelové osvětlovací stožáry*. Druhé. Praha: Český normalizační institut, 2002. ČSN EN 40-3-1, 2013
- [14] ČSN EN 40-3-1. *Osvětlovací stožáry: Část 3-1: Návrh a ověření – charakteristické hodnoty zatížení*. Druhé. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [15] VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Druhé. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. ISBN 04-234-84.