

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## VŘETENÍK PRO ZAVĚŠENÍ ROTAČNÍHO FILTRU HEADSTOCK FOR HANGING OF ROTARY FILTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL KUNORZA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN BRANDEJS, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2011/12

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Michal Kunorza

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Vřeteník pro zavěšení rotačního filtru**

v anglickém jazyce:

### **Headstock for hanging of rotary filter**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je konstrukční návrh vřeteníku, na jehož hřídeli je na plochém řemenu zavěšen buben rotačního filtru s těmito parametry: Tah v řemenu 7500 N, frekvence otáčení 2,4 1/min, doba chodu/doba klidu 1:5, antikorozi provedení.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci):

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho technickou a vývojovou analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Návrh variant řešení a výběr optimální varianty
7. Konstrukční řešení
8. Závěr (Konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení)

Forma práce: Průvodní zpráva, 3D model, výkresová dokumentace

Typ BP: konstrukční

Účel zadání: pro potřeby průmyslu

Seznam odborné literatury:

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G. Konstruování strojních součástí.  
Překlad 7. vydání, VUTIUM, Brno 2010, 1186 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Brandejs, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 15.11.2011



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

---

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá návrhem vřeteníku pro zavěšení rotačního diskového filtru. První část pojednává o možnostech zavěšení bubny k nosné konstrukci a výběru vhodného převodového prvku. Dále bylo provedeno experimentální měření součinitele smykového tření mezi plochým řemenem, který je použit pro zavěšení bubny, a povrchem nerezového plechu při různých drsnostech povrchu a za různých provozních podmínek. Druhá část se zabývá samotným konstrukčním řešením vřeteníku a ekonomickým zhodnocením výroby.

## **ABSTRACT**

The purpose of this bachelor thesis is to design headstock for hanging of rotary filter. First part deals about possibilities of hanging drum to supporting frame and choice of suitable transmitting element. Then it was provided experimental measuring of coefficient of sliding friction between flat belt, which is used to hanging of drum, and surface of stainless sheet in case of different rough surfaces and in case of different working conditions. Second part focuses on the design headstock for hanging of rotary filter and economical evaluation of fabrication.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Vřeteník pro zavěšení rotačního filtru, diskový filtr, součinitel smykového tření

## **KEYWORDS**

Headstock for hanging of rotary filter, disk filter, coefficient of sliding friction

---



---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KUNORZA, M. *Vřeteník pro zavěšení rotačního filtru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 73 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Brandejs, CSc..



---

## ČESTNÉ PROHÁŠENÍ

Čestně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, za použití uvedené literatury a pod odborným vedením doc. Ing. Jana Brandejse, CSc.

V Brně, dne 20.5.2012

.....

Podpis





---

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této bakalářské práce. Zvláště pak vedoucímu práce panu doc. Ing. Janu Brandejse, CSc za vstřícný přístup a za cenné rady, které mi poskytl. Také bych rád poděkoval rodině a především rodičům za podporu během celého studia.

---



---

## Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| Úvod.....  | 11        |
| <b>1 Přehled vyráběných diskových filtrů.....</b>  | <b>12</b> |
| 1.1 Princip činnosti diskových filtrů.....   | 12        |
| 1.2 Hydrotech.....   | 13        |
| 1.3 Siemens Forty-X Diskfilter.....  | 15        |
| 1.4 Huber RoDisk.....  | 15        |
| 1.5 Idrosid Rotating Disk Filter.....  | 16        |
| <b>2 Formulace řešeného problému.....</b>  | <b>17</b> |
| 2.1 Požadavky na zařízení.....   | 17        |
| <b>3 Cíl práce.....</b>  | <b>18</b> |
| <b>4 Varianty zavěšení bubnu.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>5 Použitelné převodové prvky.....</b>   | <b>22</b> |
| 5.1 Rozdělení převodů.....   | 22        |
| 5.2 Plochý řemen.....  | 23        |
| 5.3 Klínový řemen.....   | 23        |
| 5.4 Ozubený řemen.....   | 24        |
| 5.5 Řetězový převod.....   | 24        |
| <b>6 Výběr optimální varianty.....</b>   | <b>25</b> |
| <b>7 Experiment – měření součinitele smykového tření.....</b>  | <b>26</b> |
| 7.1 Měření drsnosti povrchu.....   | 26        |
| 7.2 Měření součinitele smykového tření.....  | 26        |
| 7.3 Vlastnosti sil tření.....  | 27        |
| 7.4 Smykové tření u polymerů.....  | 30        |
| 7.4.1 Vliv normálového zatížení na koeficient tření.....   | 30        |
| 7.4.2 Vliv skluzové rychlosti na koeficient tření.....   | 31        |
| 7.5 Minimální potřebný součinitel tření.....   | 32        |
| 7.6 Nominální výkon přenášený řemenem.....   | 33        |
| 7.7 Postup měření.....   | 33        |
| 7.7.1 Definice vzorků.....   | 35        |
| 7.7.2 Závislost statického a dynamického (maximálního) součinitele tření na měrném tlaku při suchém a mokřém kontaktu..... | 36        |
| 7.7.3 Vyhodnocení výsledků.....  | 49        |
| <b>8 Konstrukční řešení.....</b>   | <b>53</b> |
| 8.1 Popis nejdůležitějších součástí.....   | 54        |
| 8.2 Pevnostní výpočet.....   | 57        |
| 8.2.1 Celková síla $F$ působící na hřídel.....   | 57        |
| 8.2.2 Uvolnění.....  | 57        |
| 8.2.3 Výpočet reakcí v ložiscích.....  | 58        |
| 8.2.4 Výsledné vnitřní účinky.....   | 58        |
| 8.2.5 Materiál.....  | 61        |
| 8.2.6 Bezpečnost.....  | 61        |
| 8.3 Přepočet otáček bubnu a řemenice.....  | 62        |
| 8.4 Kontrola životnosti ložiska.....   | 62        |
| 8.5 Kontrola úhlu natočení pod ložiskem.....   | 64        |
| <b>9 Ekonomické zhodnocení.....</b>  | <b>66</b> |
| <b>10 Závěr.....</b>   | <b>67</b> |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>11</b> | <b>Seznam použitých zdrojů .....</b>            | <b>68</b> |
| <b>12</b> | <b>Seznam použitých zkratek a symbolů .....</b> | <b>69</b> |
| <b>13</b> | <b>Seznam obrázků a grafů.....</b>              | <b>70</b> |
| <b>14</b> | <b>Seznam tabulek .....</b>                     | <b>72</b> |
| <b>15</b> | <b>Seznam příloh.....</b>                       | <b>73</b> |

---

## ÚVOD

Cílem práce je konstrukční návržení vřeteníku, na jehož hřídeli je na plochem řemenu zavěšen buben rotačního diskového filtru. Diskové filtry se používají k filtraci vody v úpravárnách pitné vody, v čistírnách odpadních vod, k čištění vody pro průmyslové použití atd. Jsou vhodné především pro čištění vody od různých mechanických nečistot.

## **1 PŘEHLED VYRÁBĚNÝCH DISKOVÝCH FILTRŮ**

Mezi nejvýznamnější výrobce diskových filtrů patří tyto společnosti:

- Hydrotech
- Siemens
- Huber
- Idrosid

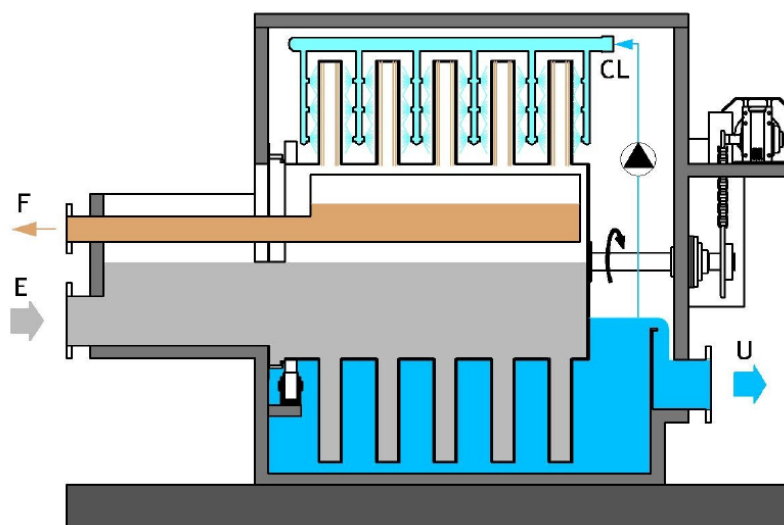
Vhodné aplikace:

- filtrace v úpravách pitné vody
- filtrace vody pro průmyslové použití
- filtrace v čistírnách odpadních vod
- filtrace vody v rybích sádkách
- filtrace vody z řek, jezer nebo moře

---

### **1.1 Princip činnosti diskových filtrů**

Filtr je umístěn uvnitř nerezového nebo betonového tanku a je ponořen asi z 60 %. Voda obsahující částice nečistot prochází ve směru osy rotace dutým bubnem, na kterém jsou po obvodu upevněny disky filtru, a gravitačně přes ně protéká zevnitř ven. Disky jsou vyrobeny z nerezového rámu podpírajícího PP (polypropylén) konstrukci, na které je bez použití lepidla upevněna filtrační tkanina. Pevné částice jsou zachycovány na vnitřní straně filtračních elementů. Během této operace nejsou žádné části zařízení v pohybu a není zde tedy žádná spotřeba energie. Kvůli pokračujícímu ucpávání filtrační tkaniny začne vzrůstat hladina vody na přítoku, až dosáhne maximální dovolené hladiny. Čidlo výšky hladiny poté automaticky spustí oplachovací proceduru. Motor s převodovkou otáčí disky, na které je pod vysokým tlakem stříkána voda z trysek a tím dojde k vyčištění filtrační tkaniny. Otáčení disku zajistí dokončení čištění filtrační tkaniny v krátkém čase. Pevné částice zachycené na filtrační tkanině jsou odplaveny tryskem vody a zachyceny v odpadním kanále a odplaveny pryč. Díky oplachovací proceduře klesne hladina vody na normální úroveň. Čidlo automaticky zastaví rotaci a oplachování. Cyklus se opakuje, když hladina vody opět vzroste na maximální hladinu. To vše se děje bez omezení či zastavení přítoku vody.



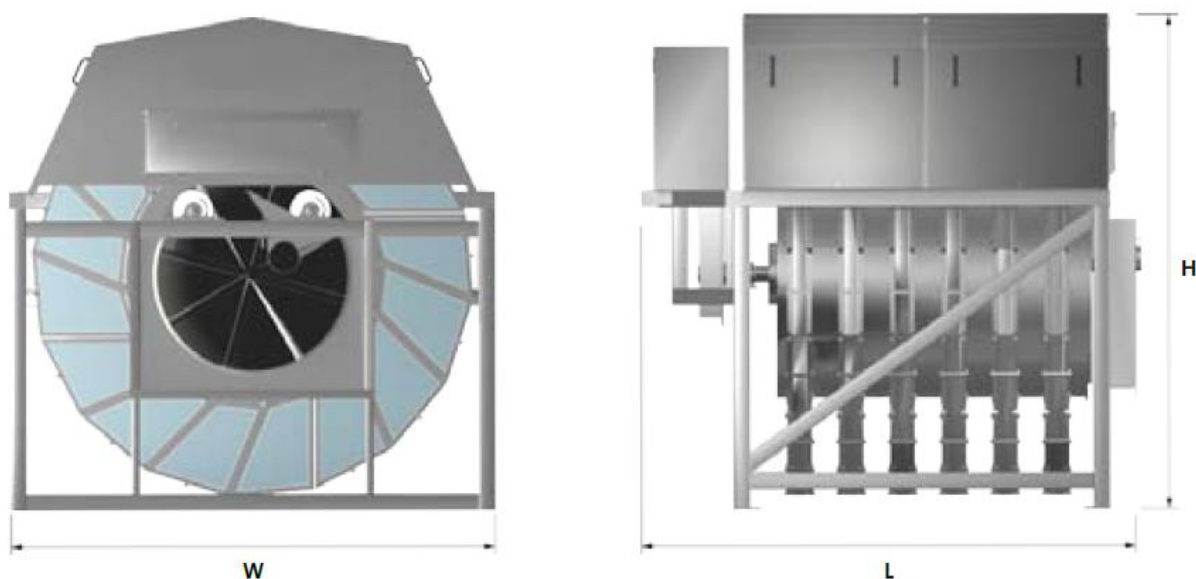
- E : raw water inlet
- U : filtered water outlet
- CL : back-washing water inlet
- F : back-washing water outlet

**Obr. 1.1** Schéma diskového filtru Idrosid [10]

## 1.2 Hydrotech

1.2

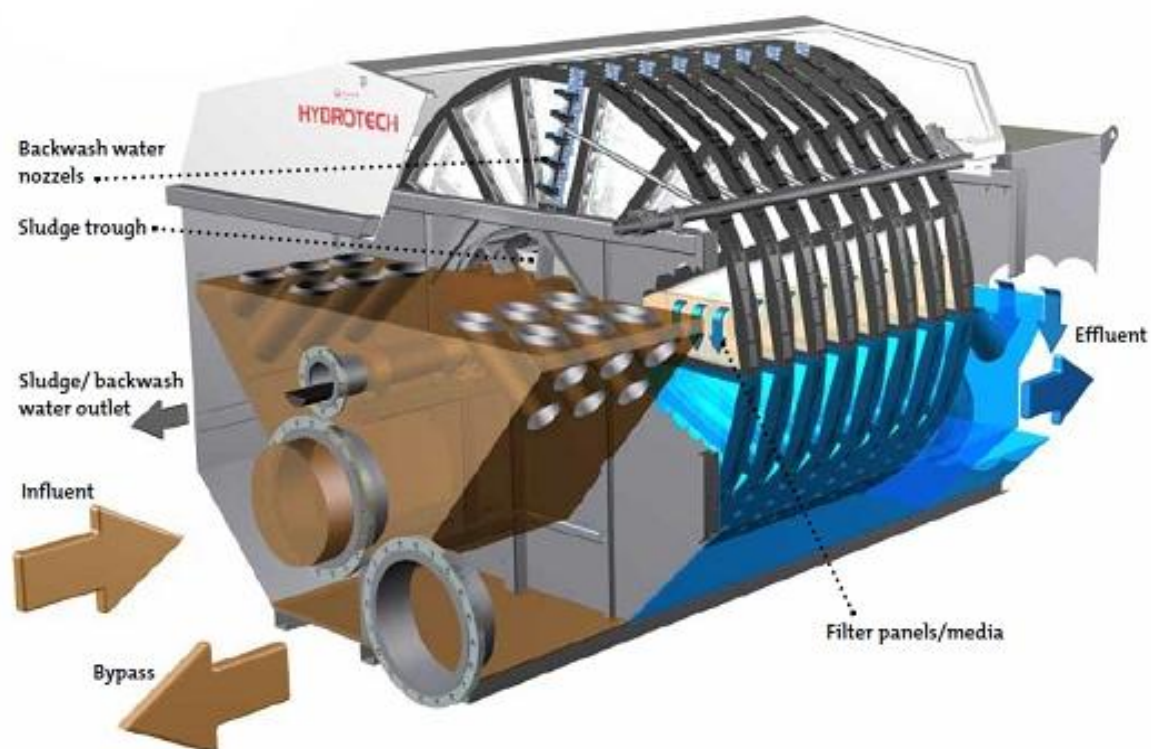
Hydrotech vyrábí několik typů diskových filtrů. Jsou to série 17/21/31, 2200 a HSF 2600. Tyto filtry mají velmi podobnou konstrukci. Na jedné straně jsou zavěšeny pomocí řetězu k převodovce a na druhé straně je podepřen dvojicí kladek. Filtry se vyrábí ve dvou variantách. V provedení s vlastní nerezovou nádrží nebo bez nerezové nádrže. U tohoto provedení se filtr umísťuje do vybetonovaného koryta. Jednotlivé filtry se od sebe liší svou velikostí a filtračním průtokem.



**Obr. 1.2** Diskfilter Hydrotech 17/21/31-series [7]



Obr. 1.3 Diskfilter Hydrotech 2200-series [7]



Obr. 1.4 Diskfilter Hydrotech HSF 2600 [7]

### 1.3 Siemens Forty-X Diskfilter

1.3

---

Forty – X Diskfilter nabízí při malých rozměrech velký filtrační výkon díky inovativnímu skládanému panelu filtrů. Celé zařízení se skládá z jednotlivých modulů, což zaručuje snadnou údržbu a vyměnitelnost dílů.



Obr. 1.5 Siemens Forty-X Diskfilter [8]

### 1.4 Huber RoDisk

1.4

---

Vyrábí se v provedení až s 20 disky, to umožňuje průtok filtrované vody až 1500 m<sup>3</sup>/h přes síto s oky o velikosti 10-100 μm.



Obr. 1.6 Huber RoDisk [9]

### 1.5 Idrosid Rotating Disk Filter

Tento filtr je schopen přefiltrovat 650-2500 m<sup>3</sup>/h v závislosti na požadované jemnosti filtrace. Na jedné straně je zavěšen pomocí řetězu k převodovce a na druhé straně je podepřen dvojicí kladek.



**Obr. 1.7** Idrosid Rotating Disk Filter [10]

## **2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU**

**2**

---

Segmenty diskového filtru jsou připevněny k otočnému dutému hřídeli - bubnu. Konce bubnu jsou utěsněny vzhledem k čelním stěnám. Uvnitř bubnu je umístěn žlab pro odtok nečistot při ostříku segmentů, který prochází jeho konci, takže buben nemůže být uložen v centrálních ložiscích.

### **2.1 Požadavky na zařízení**

2.1

---

Průměr bubnu 800 mm

Průměr filtru 1 700 mm

Frekvence otáčení max. 2,4 1/min

Počet disků 4 až 26

Hladina vody max. 350 mm nad osou filtru

Trvanlivost ložisek a těsnění min. 20 let

Použití konstrukčních kovových materiálů - nerez

Minimalizace nákladů.

### **3 CÍL PRÁCE**

Cílem práce je návrh vřeteníku, na jehož konci bude zavěšen buben rotačního filtru. Stěžejní bude návrh hřídele a jeho pevnostní analýza, návrh ložisek a kontrola jejich životnosti. Dále návrh řemenice a konzoly, za níž bude celek uchycen k rámu.

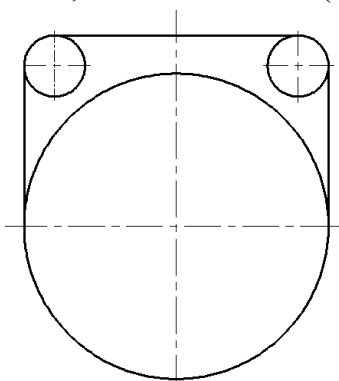
## 4 VARIANTY ZAVĚŠENÍ BUBNU

### a) Zavěšení bubnu na dvou kladkách

Stávající řešení u bubnových filtrů v provedení s plochým řemenem, kde jedna kladka je hnací, druhá hnaná. Jako hnací prvek lze použít plochý řemen, klínový řemen, ozubený řemen a řetěz.

**Výhodou** je stabilnější poloha bubnu a menší boční rázy při rozběhu a doběhu bubnu, nižší radiální zatížení kladek. Provedení řeší současně uložení i pohon bubnu.

**Nevýhodou** je menší úhel opásání, delší hnací řemen (řetěz), dvě kladky.

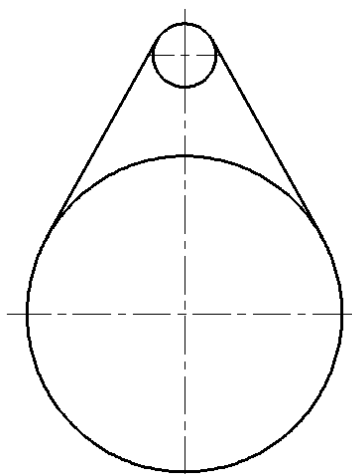


Obr. 4.1 Schéma zavěšení bubnu na dvou kladkách

### b) Zavěšení bubnu na jedné kladce.

**Výhodou** je pouze jedna hnací kladka a větší úhel opásání. Provedení řeší současně uložení i pohon.

**Nevýhodou** je menší stabilita a rázy v bočním směru při rozběhu a doběhu bubnu, vyšší radiální zatížení kladky.

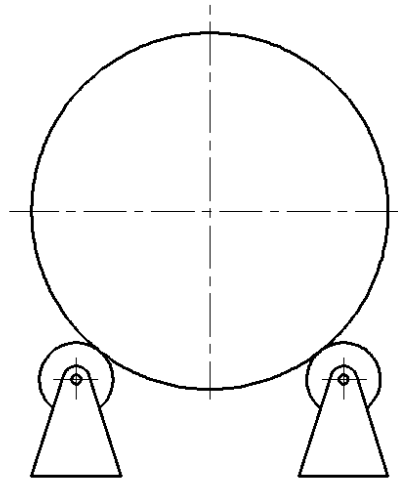


Obr. 4.2 Schéma zavěšení bubnu na jedné kladce

**c) Uložení na dvou ponořených kladkách**

**Výhodou** je jen stabilní poloha bubnu.

**Nevýhodou** je složité utěsnění ložisek kladek, nedostatečné tření mezi kladkou a bubnem a tudíž nutnost použití ještě ozubeného řemene nebo řetězu pro pohon.

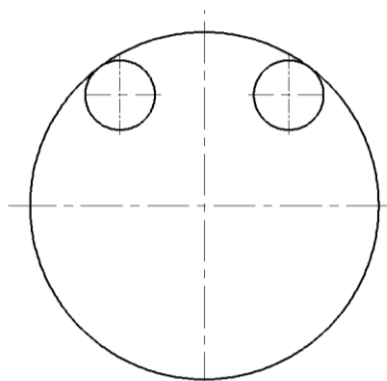


**Obr. 4.3** Schéma uložení bubnu na dvou ponořených kladkách

**d) Uložení na dvou kladkách uvnitř bubnu**

**Výhodou** je, že jsou kladky umístěny nad hladinou a je zajištěna stabilní poloha bubnu.

**Nevýhodou** je složité utěsnění bubnu na čelech, nedostatečné tření mezi kladkou a bubnem (bodový styk) a tudíž nutnost použití pro pohon ještě ozubený řemen nebo řetěz, případně ozubení.

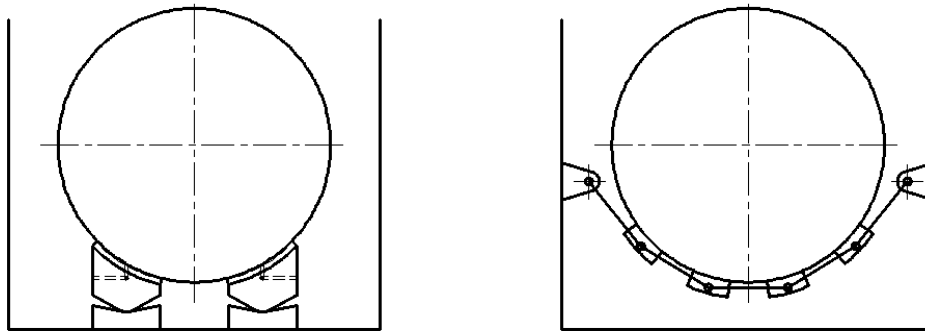


**Obr. 4.4** Schéma uložení bubnu na dvou kladkách uvnitř bubnu

**e) Uložení bubnu v kluzném ložisku**

**Výhodou** je stabilní poloha bubnu a poměrně jednoduché řešení.

**Nevýhodou** je velké tření v ložisku a nutnost použití pro pohon ještě ozubený řemen nebo řetěz. Vzhledem k nepřesnosti vnitřní kluzné plochy by bylo nutno řešit ložisko jako segmentové, případně s přívodem malého množství filtrované vody, která by nedovolila pronikání nečistot mezi kluzné plochy.



**Obr. 4.5** Schéma uložení v kluzných ložiscích

## 5 POUŽITELNÉ PŘEVODOVÉ PRVKY

**Tab. 1** Porovnání vlastností jednotlivých typů převodů [11]

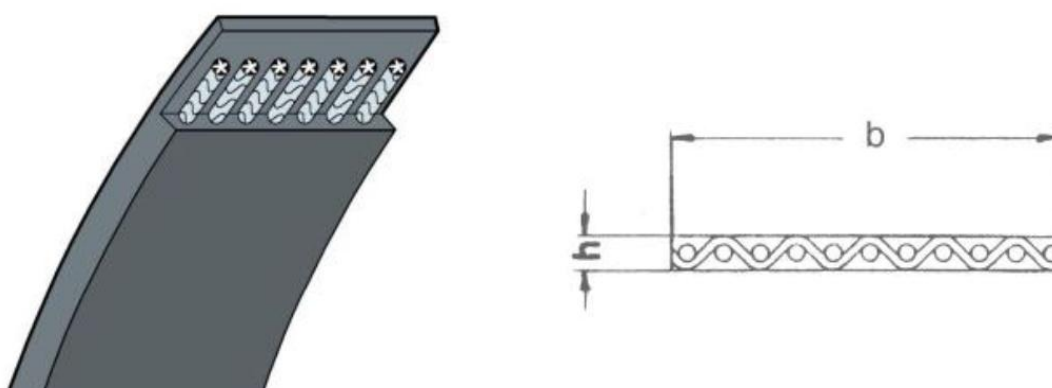
| Typ převodu                                      | Válečkový řetěz   | Ozubený řemen                           | Klínový řemen                           | Čelní ozub. kola  |
|--|-------------------|---|---|-------------------|
| <b>Synchronizace</b>                             | ++                | ++                                      | -                                       | ++                |
| <b>Účinnost</b>                                  | ++                | ++                                      | -                                       | ++                |
| <b>Tlumení rázů</b>                              | ○                 | +                                       | ++                                      | -                 |
| <b>Hluk / vibrace</b>                            | ○                 | +                                       | ++                                      | -                 |
| <b>Nepříznivé prostředí</b>                      | Vlhkost, prašnost | Vlhkost, prašnost, olej, vysoká teplota | Vlhkost, prašnost, olej, vysoká teplota | Vlhkost, prašnost |
| <b>Rozměry (vysoká rychlost / malé zatížení)</b> | -                 | ++                                      | +                                       | +                 |
| <b>Rozměry (malá rychlost / vysoké zatížení)</b> | ++                | ○                                       | -                                       | +                 |
| <b>Mazání</b>                                    | Vyžadováno        | ○                                       | Nežádoucí                               | Vyžadováno        |
| <b>Flexibilita uspořádání</b>                    | ++                | +                                       | ○                                       | -                 |
| <b>Zatížení ložisek</b>                          | ++                | ○                                       | -                                       | ++                |

### 5.1 Rozdělení převodů

- řemenový převod:
  - plochý řemen
  - ozubený řemen
  - klínový řemen
- řetězový převod

## 5.2 Plochý řemen

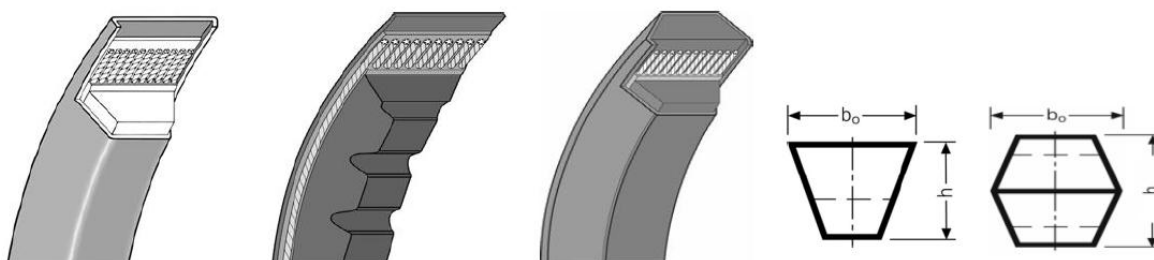
- účinnost kolem 98 %
- přenese vysoké výkony
- výkon přenášen třením
- vysoká obvodové rychlosti
- maximální převodový poměr 10-15
- přenos výkonu na velké osové vzdálenosti
- nízké výrobní náklady
- zachycuje a tlumí rázy
- tichý chod
- dochází k prokluzu mezi řemenem a řemenicí (nestálý převodový poměr)
- nutné předpětí řemenu



Obr. 5.1 Plochý řemen [12]

## 5.3 Klínový řemen

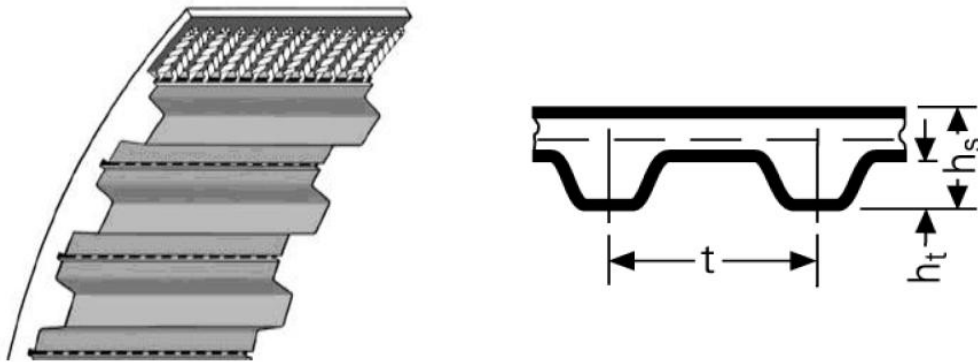
- účinnost 70–96 %
- výkon přenášen třením
- maximální převodový poměr 10–15
- menší osové vzdálenosti
- nižší účinnost než u plochých řemenů, pro přenos velkých výkonů se používá více klínových řemenu na jedné řemenici
- nízké výrobní náklady
- nutné předpětí řemenu
- zachycuje a tlumí rázy



Obr. 5.2 Klínový řemen [12]

## 5.4 Ozubený řemen

- účinnost až 97 až 99 %
- výkon přenášen tvarovým stykem
- nedochází ke skluzu – konstantní převod
- malé předpětí řemenu – nízké zatížení ložisek a hřídele
- zachycuje a tlumí rázy (ale ne tak jako ploché nebo klínové řemeny)
- široký rozsah provozních rychlostí
- nízká hmotnost
- plynulý a tichý chod
- vysoká cena
- nutná tvarová řemenice
- zachycuje a tlumí rázy (ale ne tak jako ploché nebo klínové řemeny)
- musí být zajištěny proti axiálnímu posunutí ze záběru



Obr. 5.3 Ozubený řemen [12]

## 5.5 Řetězový převod

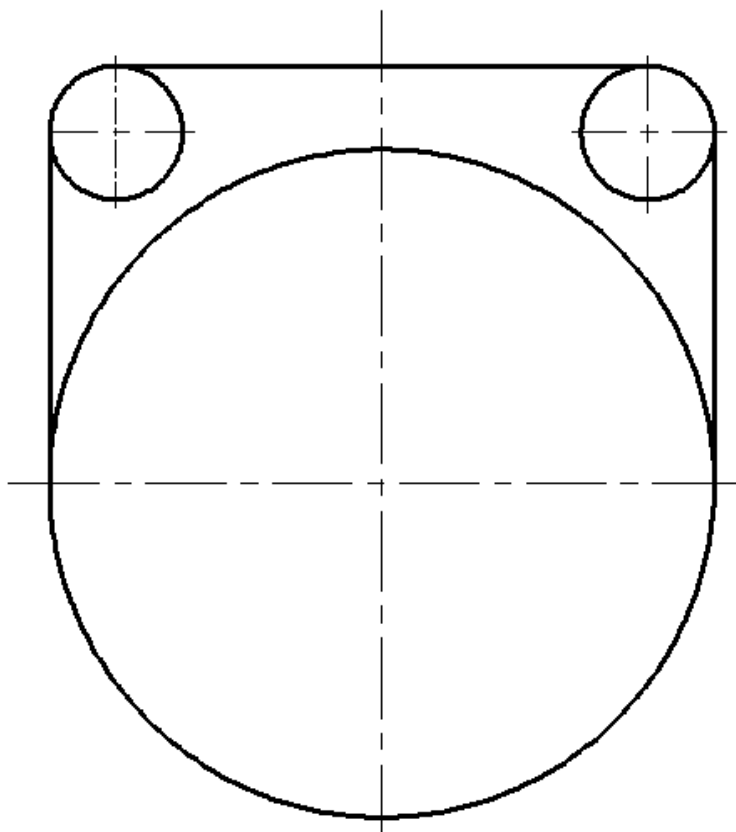
- účinnost 98 až 99 %
- výkon přenášen tvarovým stykem
- dlouhá životnost (přibližně 4x větší než u řemenových převodů)
- dobře pracuje za vyšších teplot i ve vlhku
- nutné mazání
- nerovnoměrný chod
- hlučnější než řemenové převody (zejména při vyšších rychlostech)
- jsou náchylné na znečištění, nejsou vhodné do prašného prostředí
- menší řetězové kolo musí mít minimálně 17 zubů, při menším počtu zubů je chod nepravidelný což se projeví na hlučnosti a životnosti převodu.
- převodový poměr by neměl být větší než 8 až 9



Obr. 5.4 Válečkový řetěz [13]

## 6 VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

Po zhodnocení všech pro a proti jsem se rozhodl pro variantu zavěšení bubnu na dvou kladkách. A to zejména proto, že toto uložení tlumí boční kmity, které vznikají při rozběhu a zastavení bubnu. Buben bude tedy méně kmitat než by tomu bylo při použití jediné kladky. Další výhodou bude také menší zatížení hřídelů a kladek, protože se zatížení rozloží mezi dva prvky. Toto uložení nám zároveň řeší pohon bubnu, protože jedna kladka bude hnací a druhá hnaná. Malou nevýhodou je malý úhel opásání kladek, to ale vzhledem k velké hmotnosti bubnu až tolik nevádí, protože buben svojí vlastní tíhou vyvolá v řemeni dostatečné předpětí. Jako převodový prvek bude použit plochý řemen. Mezi výhody plochého řemene patří vysoká únosnost, vysoká účinnost atd. Pro plochý řemen nemusíme na bubnu vyrábět žádnou tvarovou řemenici, což byl hlavní důvod pro volbu tohoto typu převodu.



Obr. 4.1 Schéma zavěšení bubnu na dvou kladkách

## 7 EXPERIMENT – MĚŘENÍ SOUČINITELE SMYKOVÉHO TŘENÍ

Pro ověření funkčnosti převodu jsem do této práce zařadil experiment měření součinitele smykového tření.

### 7.1 Měření drsnosti povrchu

Pro porovnání součinitele smykového tření při různých drsnostech povrchu jsme na povrchu plechu vybrousili oblasti o různé drsnosti povrchu.

Tab. 2 Měření drsnosti povrchu

| Měření č. | Drsnost |
|-----------|---------|
| 1         | 0,43    |
| 2         | 0,38    |
| 3         | 0,4     |
| 4         | 0,72    |
| 5         | 0,45    |
| 6         | 0,31    |
| 7         | 0,45    |
| 8         | 0,32    |
| 9         | 0,31    |
| 10        | 0,39    |

Průměrná drsnost:

$$Ra = 0,416$$

| Měření č. | Drsnost |
|-----------|---------|
| 1         | 0,99    |
| 2         | 0,96    |
| 3         | 0,89    |
| 4         | 1,09    |
| 5         | 0,96    |
| 6         | 1,19    |
| 7         | 0,81    |
| 8         | 1,24    |
| 9         | 0,98    |
| 10        | 0,94    |

$$Ra = 1,005$$

| Měření č. | Drsnost |
|-----------|---------|
| 1         | 0,48    |
| 2         | 0,55    |
| 3         | 0,65    |
| 4         | 0,65    |
| 5         | 0,64    |
| 6         | 0,53    |
| 7         | 0,59    |
| 8         | 0,61    |
| 9         | 0,55    |
| 10        | 0,56    |

$$Ra = 0,581$$

### 7.2 Měření součinitele smykového tření

Součinitel smykového tření je fyzikální veličina, která udává poměr třecí síly a kolmé tlakové síly mezi tělesy při smykovém tření.

Měření probíhalo mezi vzorkem řemene a povrchem nerezového plechu za těchto podmínek:

- suchý a mokrá kontakt
- na různých drsnostech povrchu plechu ( $Ra=0,41$ ;  $Ra=0,58$ ;  $Ra=1$ )
- vzorku tloušťky 4 a 4, 5 mm
- vzorku o velikosti stykových ploch 5 a 10 cm<sup>2</sup>

### 7.3 Vlastnosti sil tření

Smykové tření je fyzikální jev, který vzniká při posouvání (smýkání) jednoho tělesa po povrchu jiného tělesa. Jeho původ je především v nerovnosti obou styčných ploch, kterými se tělesa vzájemně dotýkají. Nerovnosti povrchů při posouvání těles na sebe vzájemně narážejí, deformují se a obrušují. Tak vzniká třecí síla  $F_t$ , jejíž působiště je na stykové ploše obou těles a jejíž směr míří vždy proti směru rychlosti tělesa.

Předpokládejme, že na těleso se suchým povrchem, které spočívá na podložce stejné kvality, případně je k ní tlačeno, působíme silou  $F$  ve snaze je po podložce posunout.

Experiment ukazuje, že třecí síla, jíž působí podložka proti pohybu tělesa, má tři vlastnosti:

1. Je-li těleso v klidu, má statická třecí síla  $F_s$  stejnou velikost jako průmět síly  $F$  do podložky a je vůči němu opačně orientována.

2. Velikost síly  $F_s$  dosahuje maximální hodnoty  $F_{s,max}$  dané vztahem

$$F_{s,max} = f_s \cdot N$$

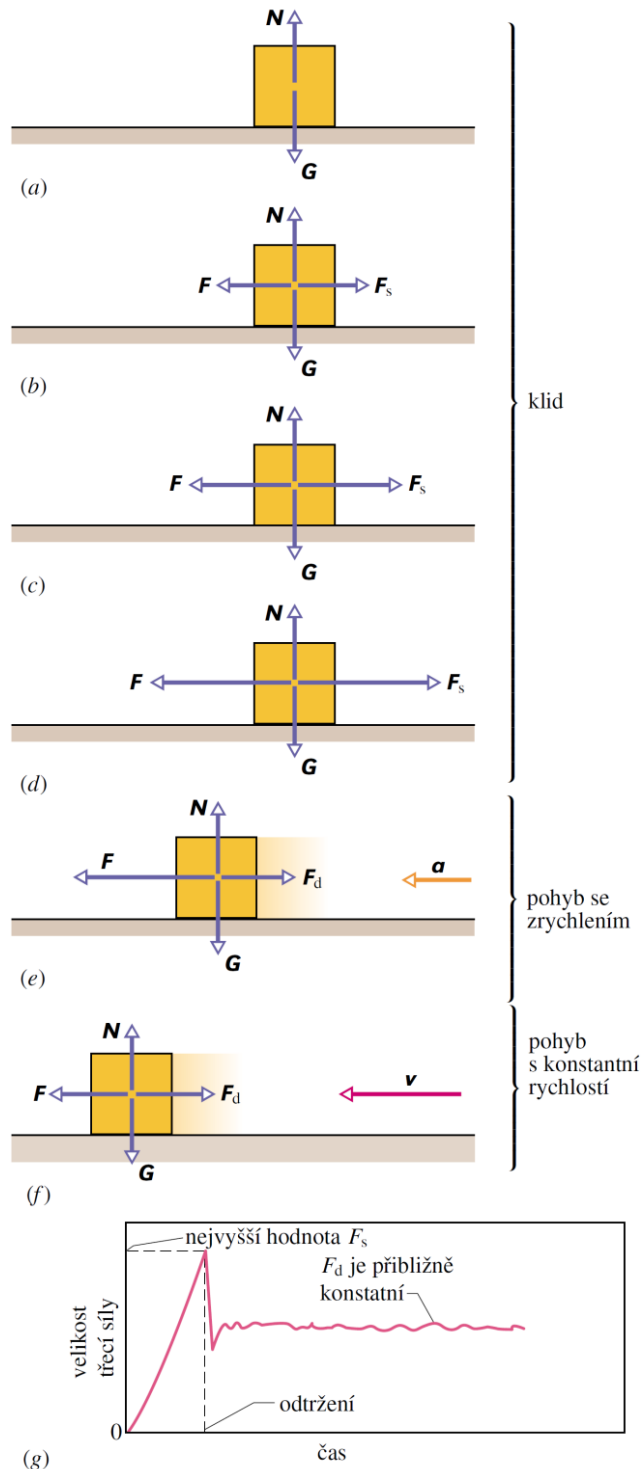
kde  $f_s$  je **koeficient statického tření** a  $N$  je velikost tlakové síly, jíž působí podložka na těleso. Převýší-li velikost průmětu síly  $F$  do podložky hodnotu  $F_{s,max}$ , začne těleso po podložce klouzat.

3. V okamžiku, kdy se těleso dá do pohybu, klesne velikost třecí síly prakticky skokem na hodnotu  $F_d$ , určenou vztahem

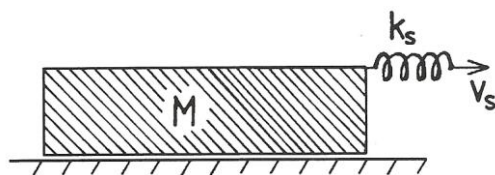
$$F_{d,max} = f_d \cdot N$$

kde  $f_d$  je **koeficient dynamického (též kinetického) tření**. Tuto velikost má dynamická třecí síla  $F_d$  v průběhu celého pohybu.

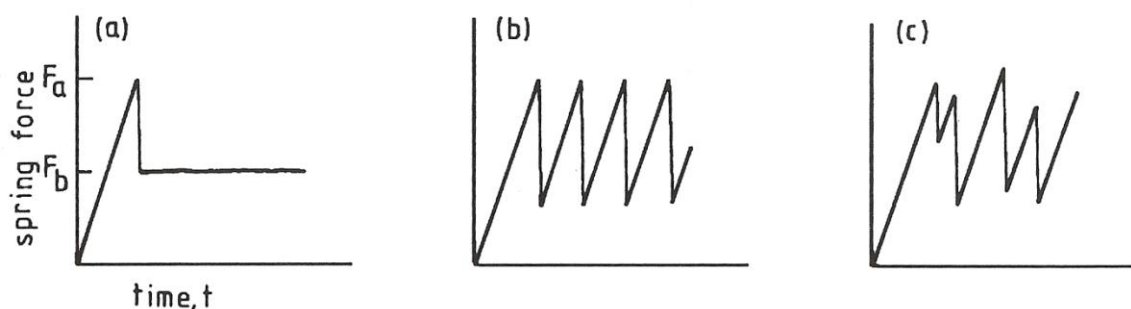
Vlastnosti 1 a 2, které jsme formulovali pro případ jedné síly  $F$ , zůstanou v nezměněné podobě i v případě, že  $F$  je výslednicí několika sil působících na těleso. Rovnice nemají vektorový charakter. Síly  $F_d$ , resp.  $F_s$  jsou totiž vždy rovnoběžné s podložkou a směřují proti pohybu, resp. zamyšlenému pohybu tělesa, zatímco síla  $N$  je k podložce kolmá. Koeficienty  $f_s$  a  $f_d$  jsou bezrozměrové a zjišťují se experimentálně. Jejich hodnoty závisejí na vlastnostech tělesa i podložky, takže hovoříme o koeficientech tření mezi podložkou a tělesem či mezi dvěma materiály (např. řekneme, že „hodnota statického koeficientu tření  $f_s$  mezi saněmi a asfaltem je 0,5“). Předpokládáme, že hodnota  $f_d$  není závislá na rychlosti pohybu tělesa po podložce.



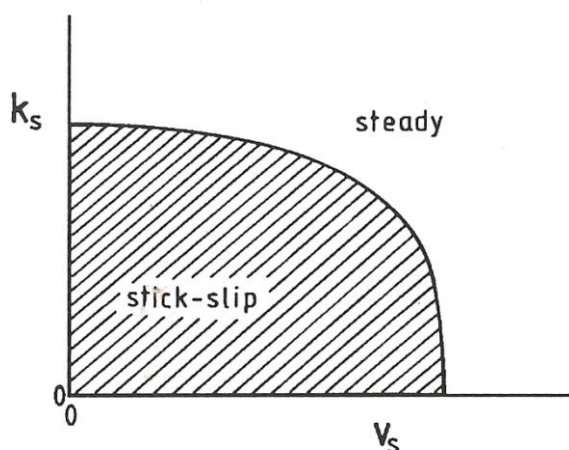
**Obr. 7.1** Třecí síla (a) Síly působící na kostku v klidu. (b–d) Vnější síla  $F$  působící na kostku je vyvážena stejně velkou, opačně orientovanou silou statického tření  $F_s$ . Při rostoucí velikosti síly  $F$  roste i velikost síly  $F_s$ , až dosáhne jisté nejvyšší hodnoty. (e) Kostka se pak najednou „utrhne“ a začne se urychlovat směrem vlevo. (f) Má-li se kostka dále pohybovat rovnoměrně, je třeba velikost síly  $F$  snížit z této největší hodnoty tak, aby síla  $F$  právě kompenzovala dynamickou třecí sílu. (g) Výsledek měření třecí síly při ději (a) až (f). [4]



**Obr. 7.2** Těleso o hmotnosti  $M$  klouže po ploché podložce. K tělesu je připojena pružina o konstantní tuhosti  $k_s$  a volný konec pružiny se pohybuje rychlostí  $v_s$ . [5]



**Obr. 7.3** Skluzová dynamika tělesa pro tři různé případy. a) steady sliding (stálý skluz), b) periodic stick-slip motion (těleso se periodicky trhaně zastavuje a pohybuje), c) chaotický pohyb. [5]

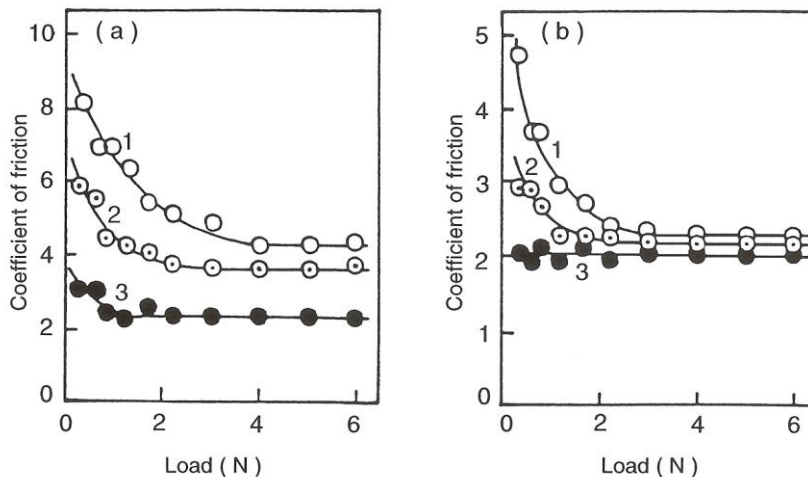


**Obr. 7.4** Kinetický fázový diagram. Šrafovaná oblast označuje oblast hodnot pro tuhosti pružiny  $k_s$  a skluzové rychlosti  $v_s$  pro které nastane stick-slip pohyb. [5]

Při měření volíme tak velkou tuhost pružiny nebo dostatečně velkou skluzovou rychlost, aby pohyb byl plynulý (steady).

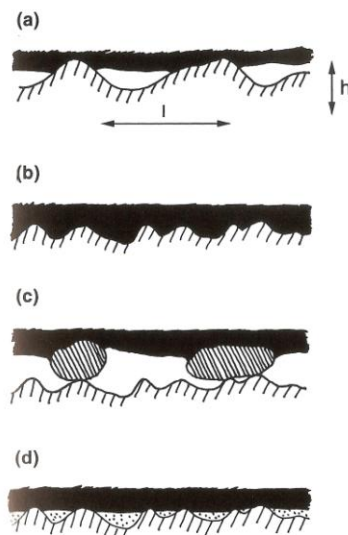
## 7.4 Smykové tření u polymerů

### 7.4.1 Vliv normálového zatížení na koeficient tření

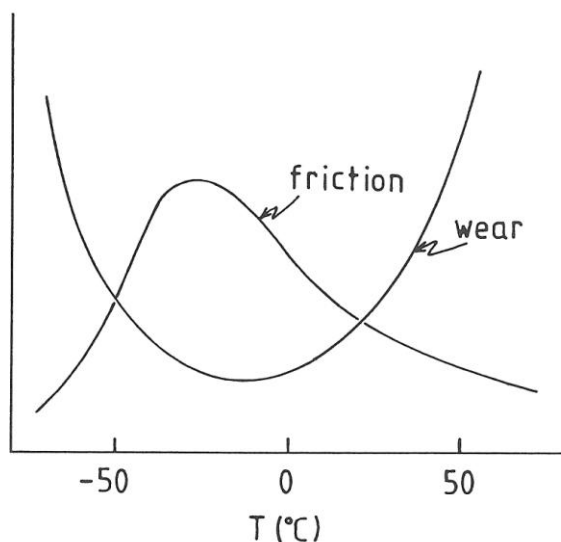


**Obr. 7.5** Efekt volné povrchové energie pryže na vztah koeficientem tření a normálovým zatížení  $L$  pro a) hliníkovou podložku a b) teflonovou podložku. [5]

Obr. 7.5 ukazuje vztah mezi kinetickým třecím koeficientem (skluzová rychlost  $v=0,5$  m/s) a normálovou silou pro tři pryžové povrchy klouzající po a) hliníkové podložce a b) teflonové podložce. Protože jde o molekulární adhezi, koeficient tření se blíží nekonečnu, když se normálové zatížení blíží nule. Se zvyšujícím se normálovým zatížením koeficient tření klesá, až se při určitém zatížení stane konstantní. Koeficient tření vzrůstá se vzrůstající volnou povrchovou energií pryžového tělesa. To znamená, že při malém normálovém zatížení jsou v kontaktu pouze vrcholky nerovností a volná povrchová energie tělesa je velká, a tedy je velký i koeficient tření. Při vzrůstajícím normálovém zatížení pryž vyplňuje povrchové nerovnosti, čímž se sníží volná povrchová energie a koeficient tření klesne. V okamžiku kdy pryž zaplní všechny nerovnosti, koeficient tření zůstává konstantní.



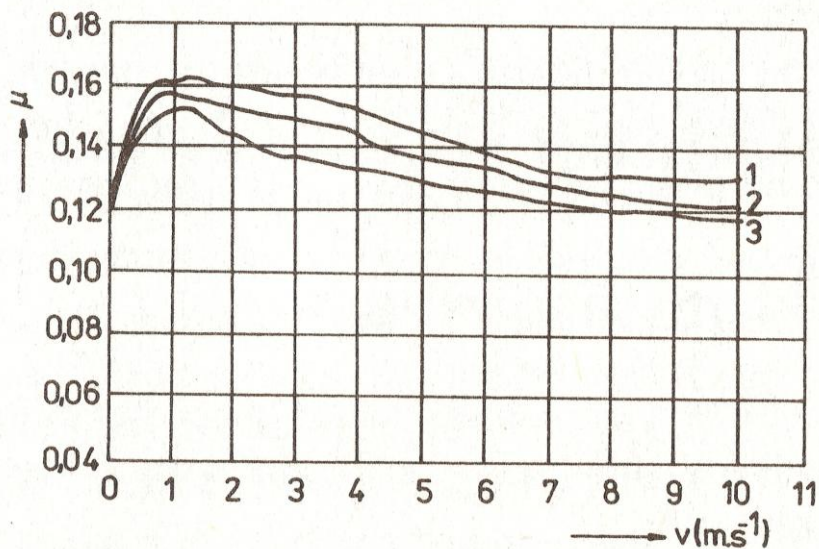
**Obr. 7.6** a) Pryž na tvrdé a drsné podložce. b) Při zatížení se pryž deformuje a vyplní všechny nerovnosti povrchu. c) Částice prachu v kontaktu pryže a tvrdé podložky. d) Kontakt pryže a tvrdé podložky pokryté vodou. [5]



**Obr. 7.7** Závislost teploty na koeficientu tření a velikosti opotřebení. Kontakt pryže s tvrdou drsnou podložkou při konstantní skluzové rychlosti. [5]

#### 7.4.2 Vliv skluzové rychlosti na koeficient tření

7.4.2



**Obr. 7.8** Průběh koeficientu tření lamely spojky z KTM v závislosti na skluzové rychlosti a počtu sepnutí 1 – 100, 2 – 500, 3 – 1000 sepnutí. [6]

## 7.5 Minimální potřebný součinitel tření [1]

Dáno:

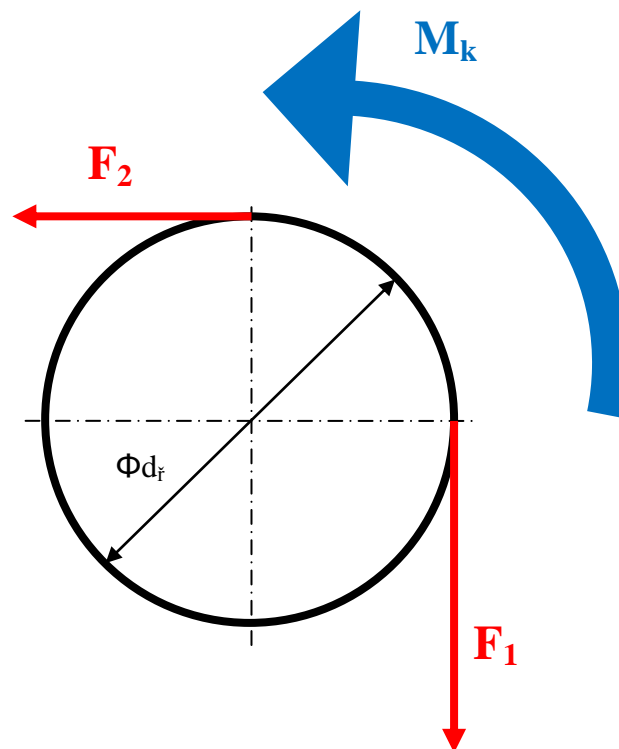
$$M_k = 150 \text{ Nm}$$

$$F_1 = 7\,500 \text{ N}$$

$$d_{\dot{R}} = 0,15 \text{ m}$$

$$n_{\dot{R}} = 13,33 \text{ min}^{-1} = 0,222 \text{ s}^{-1}$$

$$\phi = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$$



Obr. 7.9 Síly na řemenici

Z momentové rovnováhy vypočítám sílu  $F_2$ .

$$M_k + F_2 \cdot \frac{d_f}{2} - F_1 \cdot \frac{d_{\dot{R}}}{2} = 0$$

$$M_k + (F_2 - F_1) \cdot \frac{d_{\dot{R}}}{2} = 0$$

$$F_2 = F_1 - \frac{2 \cdot M_k}{d_{\dot{R}}} = 7\,500 \text{ N} - \frac{2 \cdot 150}{0,15 \text{ m}} = \underline{\underline{5\,500 \text{ N}}}$$

kde:

$F_1, F_2$  [N] - tahové síly v řemeni

Součinitel tření:

$F_c$  je síla od odstředivé síly. Vzhledem k malé obvodové rychlosti bude tato síla velmi malá a budeme ji považovat za nepodstatnou.

$$f' = \frac{1}{\phi} \ln \left( \frac{F_1 - F_c}{F_2 - F_c} \right) = \frac{1}{\frac{\pi}{2}} \ln \left( \frac{7\,500\text{ N} - 0}{5\,500\text{ N} - 0} \right) = \underline{\underline{0,198}}$$

Hodnota součinitele tření  $f'=0,198$  je minimální hodnota součinitele tření mezi řemenem a řemenicí, která zde může být, aby byla zaručena správná funkce soustavy, tedy přenos krouticího momentu. V našem případě bude hnací pouze jedna řemenice. Při použití dvou hnacích řemenic by mohl být součinitel tření o polovinu menší. Při tomto uspořádání však dochází po určité době k prokluzu vlivem různé délky řemenů, jejich roztažností a jiných rozměrových nepřesností. Tento prokluz má za důsledek rázy, které jsou pro chod zařízení nepříznivé.

Jelikož z experimentu vyplynula hodnota smykového tření  $f=0,344$  pro drsnost povrchu  $R_a 0,41$  v mokřém kontaktu, tedy pro nejméně příznivý případ. Bude řemenový převod funkční.

## 7.6 Nominální výkon přenášený řemenem [1]

7.6

$$P = (F_1 - F_2) \cdot v = (F_1 - F_2) \cdot \pi \cdot d_R \cdot n_R = (7\,500\text{ N} - 5\,500\text{ N}) \cdot \pi \cdot 0,15\text{ m} \cdot 0,222\text{ s}^{-1} = \underline{\underline{209\text{ W}}}$$

Jedná se o teoretický potřebný výkon. Ve skutečnosti budou hrát roli podmínky provozu a skutečný potřebný výkon motoru bude o něco vyšší.

## 7.7 Postup měření

1. Dokonale jsem odmastil všechny vzorky i povrch nerezového plechu.
2. Vzorek jsem vložil do držáku a položil ho i se vzorkem na povrch nerezového plechu. Poté jsem na držák zatížil závažím.



Obr. 7.10 Vzorky umístěné v držáku

- Uchytíl jsme siloměr za smyčku držáku. Poté jsem za něj začal rovnoměrně tahat ve vodorovném směru a v okamžiku, kdy se celá soustava dala do pohybu, jsem odečetl ze siloměru příslušnou velikost síly.



**Obr. 7.11** Měření třecí síly

- Měření jsem několikrát opakoval.
- Měření jsem provedl pro 4 vzorky (tloušťky 4 a 4,5 mm a velikosti ploch 5 a 10 cm<sup>2</sup>) na různých drsnostech povrchu, za sucha a ve vodě a při různých velikostech zatížení.

### 7.7.1 Definice vzorků

7.7.1

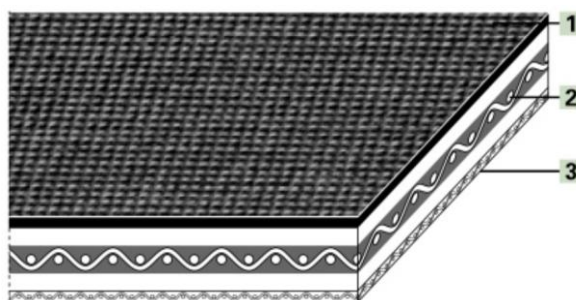
Vzorky jsem vyřízl ze stejného typu řemene avšak různých rozměrů. Vzorky o tloušťce 4 mm byly vyříznuty z řemene o rozměrech 45x4 a vzorky o tloušťce 4,5 mm byly vyříznuty z řemene o rozměrech 75x4,5. Výrobce udává součinitel smykového tření  $f = 0,4$ .

**Tab. 3** Definice vzorků

| Vzorek č. | $\Phi d$ [cm] | S [cm <sup>2</sup> ] | Tloušťka [mm] |
|-----------|---------------|----------------------|---------------|
| 1         | 2,52          | 5                    | 4,0           |
| 2         | 2,52          | 5                    | 4,5           |
| 3         | 3,57          | 10                   | 4,0           |
| 4         | 3,57          | 10                   | 4,5           |



**Obr. 7.12** Vzorky s držáky



**Obr. 7.13** Řemen TF-75TE [14]

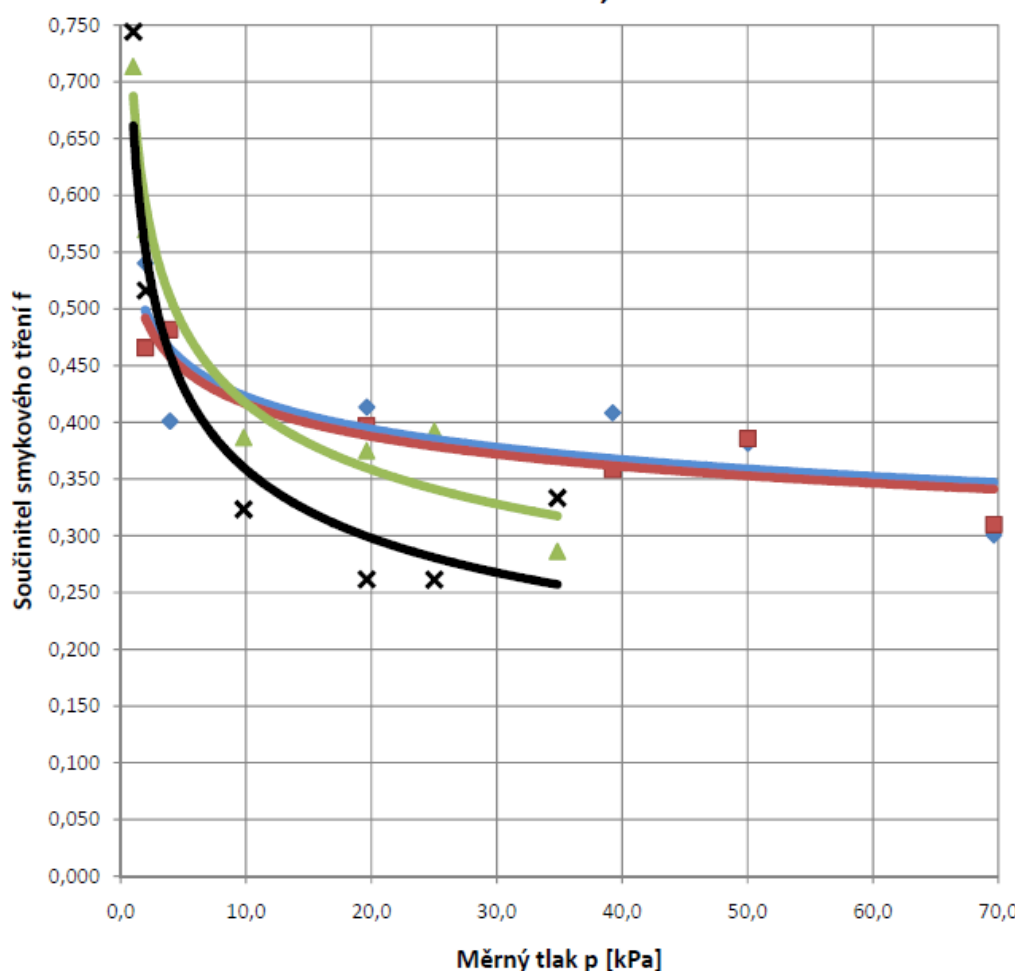
**Tab. 4** Konstrukce řemene [14]

|   |                                     |                                      |
|---|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Styková vrstva (materiál):          | Acrylonitrile-Butadiene-Rubber (NBR) |
| 1 | Styková vrstva (struktura povrchu): | Drsná struktura                      |
| 1 | Styková vrstva (barva):             | Černá                                |
| 2 | Tažná vrstva (materiál):            | Aramidová tkanina                    |
| 3 | Krycí vrstva (materiál):            | Polyesterové vlákna (PET)            |
| 3 | Krycí vrstva (struktura povrchu):   | Tkanina                              |
| 3 | Krycí vrstva (barva):               | Bílá                                 |

### **7.7.2 Závislost statického a dynamického (maximálního) součinitele tření na měrném tlaku při suchém a mokřém kontaktu**

Dynamický součinitel tření byl měřen při skluzové rychlosti  $v = 0,14 \text{ ms}^{-1}$  a jedná se o hodnotu skluzové rychlosti, kdy je dynamický součinitel tření maximální. Jak ukazuje obr. 7.8, součinitel smykového tření se zvyšující skluzovou rychlostí roste a poté při po dovršení maximální hodnoty součinitele tření začne klesat. Pro hodnoty součinitele tření v závislosti na normálovém zatížení platí, že se vzrůstajícím zatížením klesá součinitel smykového tření až se při určitém zatížení stane konstantní. Toto je typické pro polymerní materiály. U nepolymerních materiálů je tato závislost lineární. Pro použití v praxi jsou důležité hodnoty součinitele tření při vyšším zatížení, kdy je součinitel konstantní, protože většina zařízení bude pracovat v této oblasti.

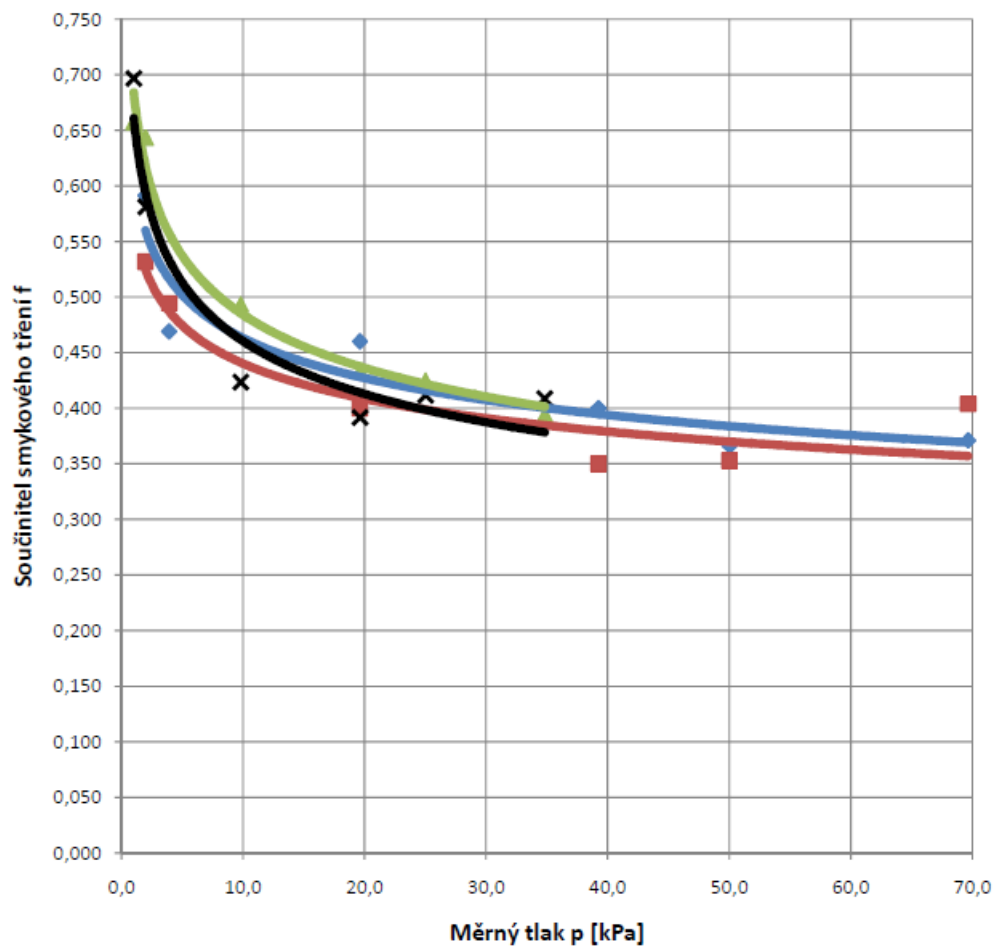
### Statický součinitel smykového tření - suchý kontakt Ra 0,41



- ◆ Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- ▲ Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- ✕ Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- Mocninný (Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

Obr. 7.14 Statický součinitel smykového tření – suchý kontakt Ra 0,41

### Statický součinitel smykového tření - suchý kontakt Ra 0,58



◆ Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm

■ Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm

▲ Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm

✕ Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm

— Mocninný (Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)

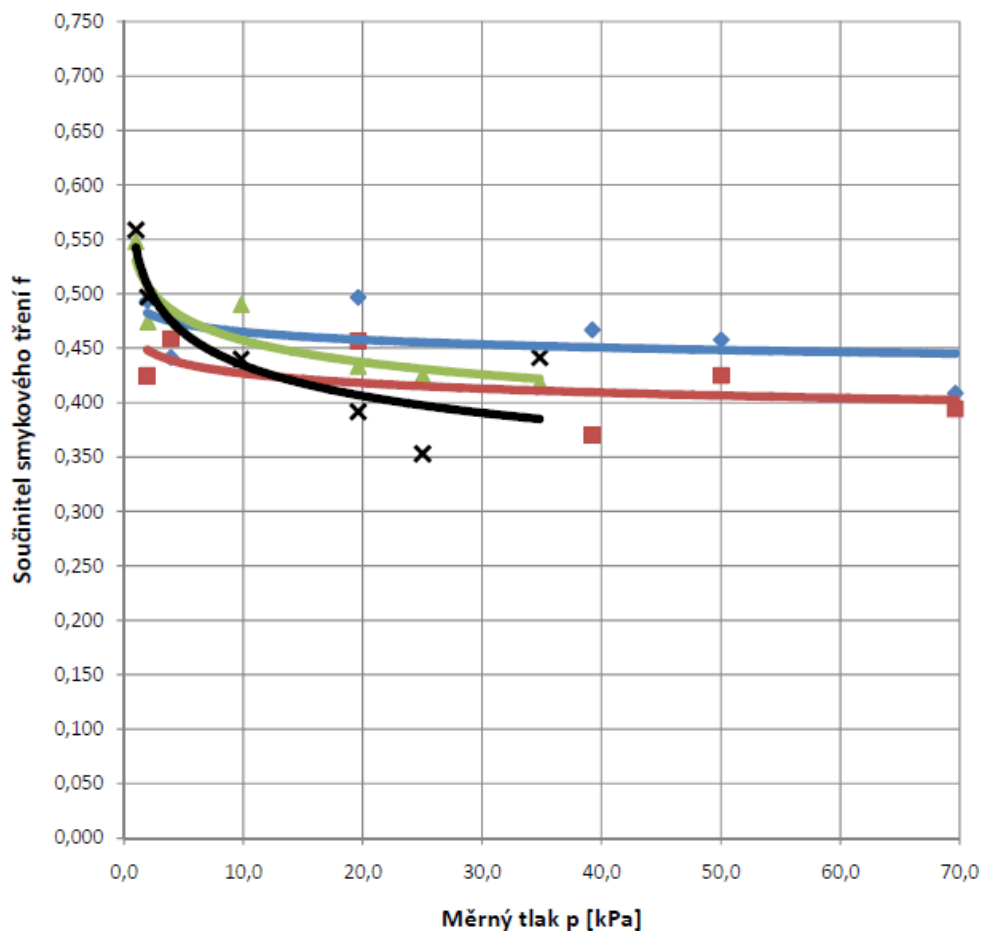
— Mocninný (Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

— Mocninný (Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)

— Mocninný (Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

**Obr. 7.15** Statický součinitel smykového tření – suchý kontakt Ra 0,58

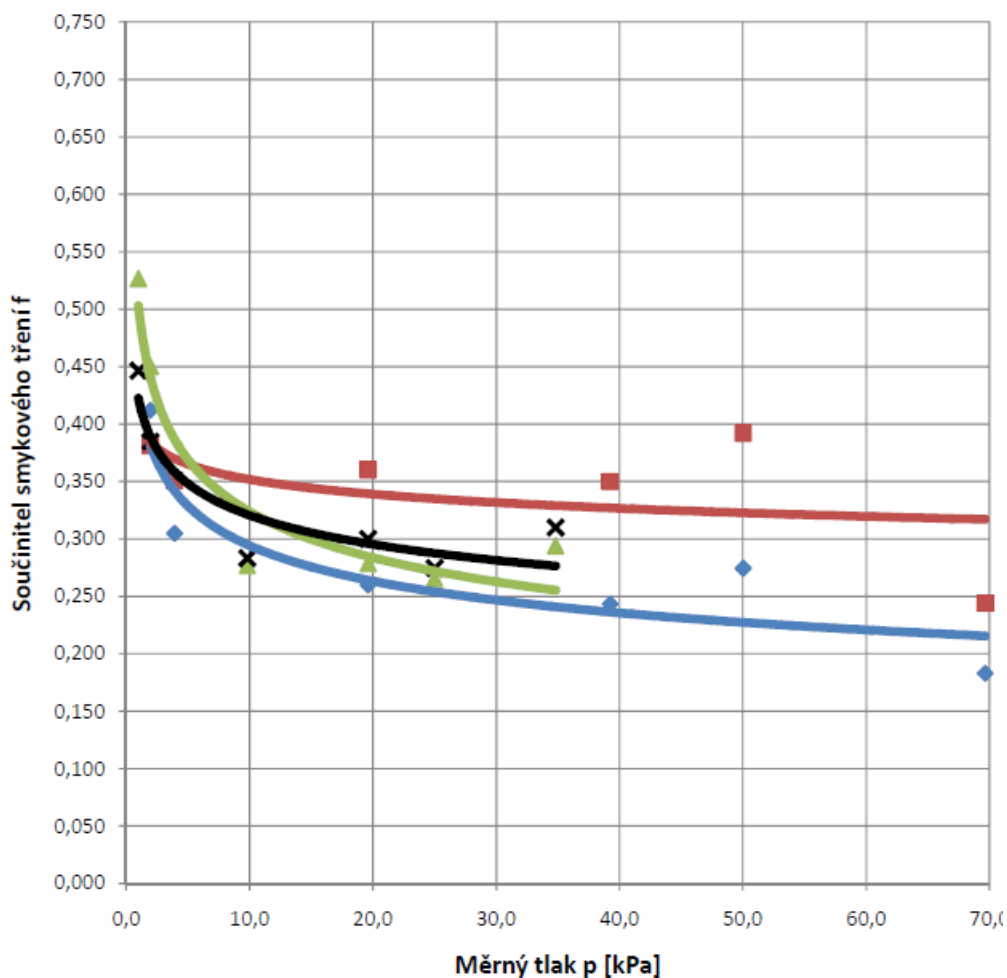
### Statický součinitel smykového tření - suchý kontakt Ra 1



- ◆ Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- ▲ Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- ✕ Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- Mocninný (Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

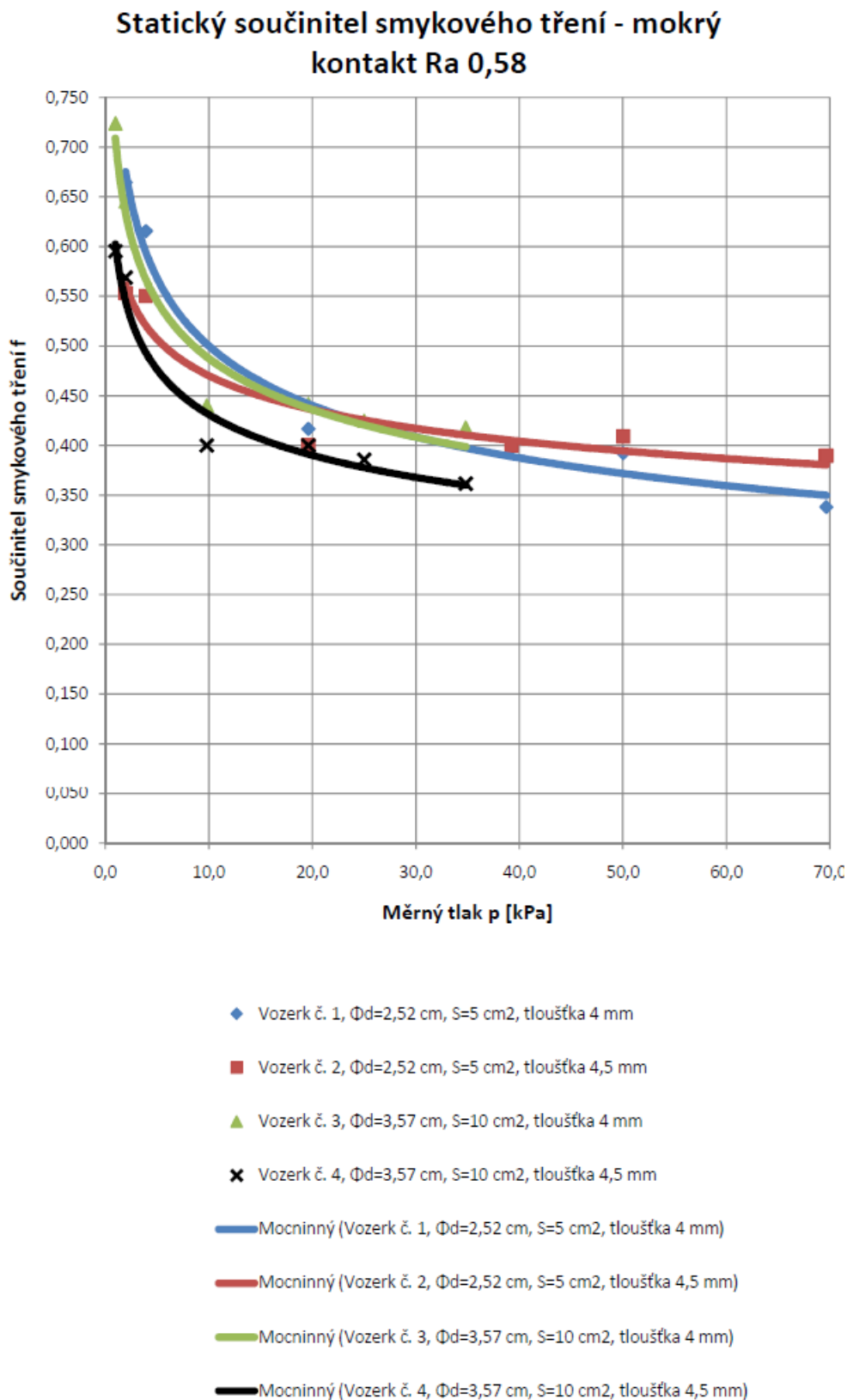
Obr. 7.16 Statický součinitel smykového tření – suchý kontakt Ra 1

### Statický součinitel smykového tření - mokrý kontakt Ra 0,41



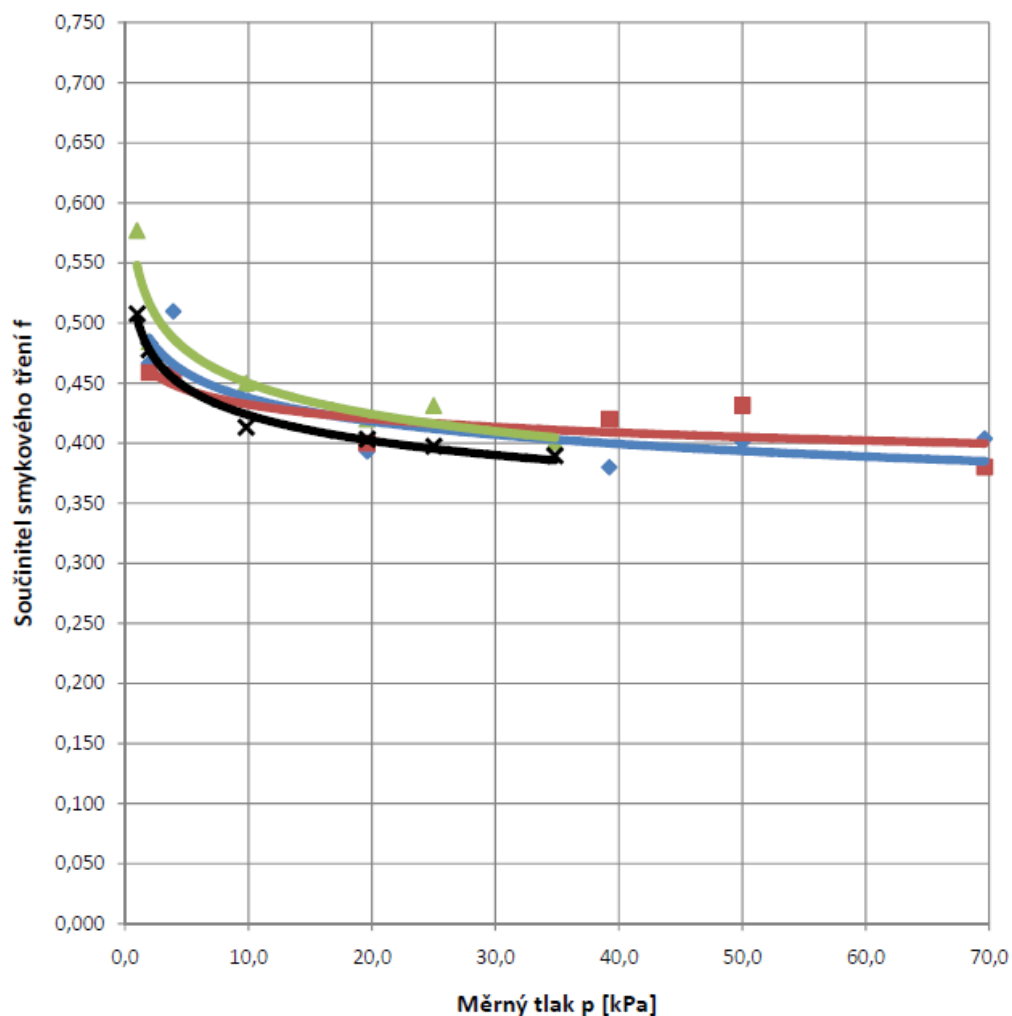
- ◆ Vozek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- Vozek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- ▲ Vozek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- ✕ Vozek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- Mocninný (Vozek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vozek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)
- Mocninný (Vozek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vozek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

**Obr. 7.17** Statický součinitel smykového tření – mokrý kontakt Ra 0,41



**Obr. 7.18** Statický součinitel smykového tření – mokrý kontakt Ra 0,58

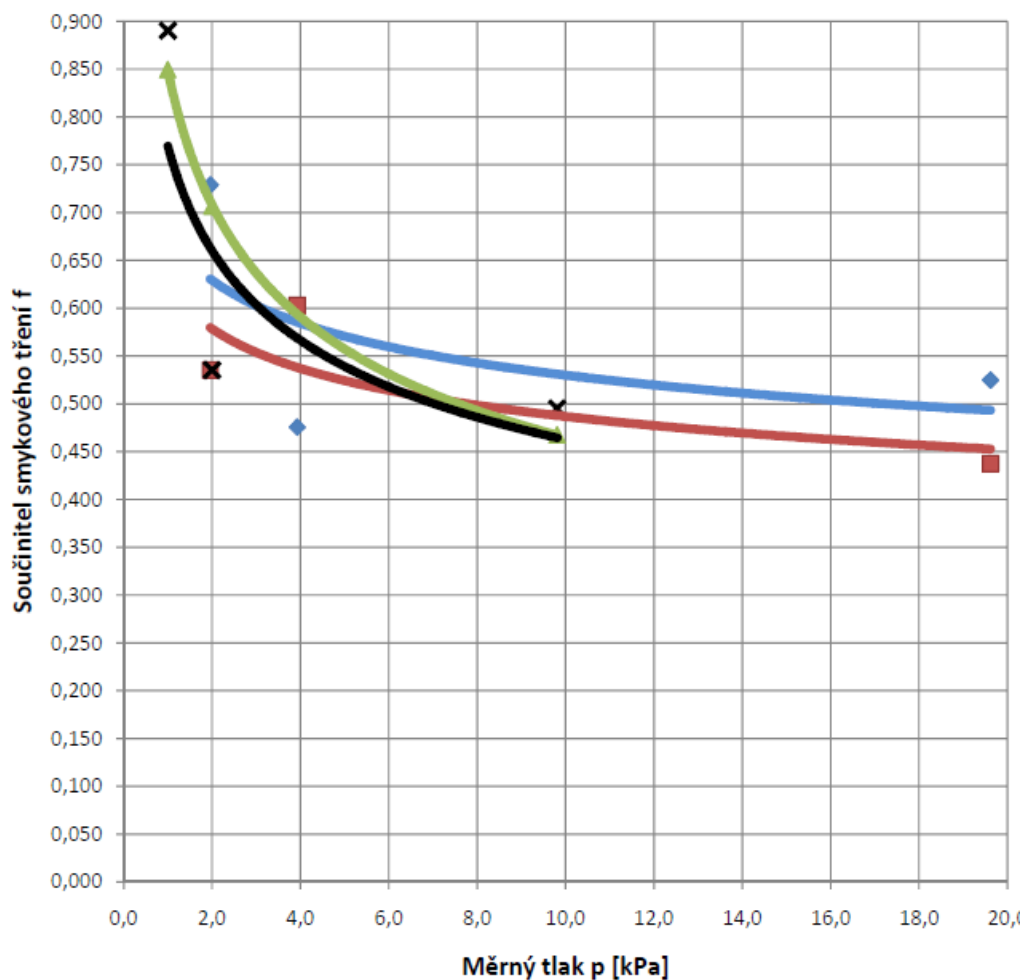
### Statický součinitel smykového tření - mokrý kontakt Ra 1



- ◆ Vozerk č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- Vozerk č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- ▲ Vozerk č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- ✕ Vozerk č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- Mocninný (Vozerk č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vozerk č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)
- Mocninný (Vozerk č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vozerk č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

Obr. 7.19 Statický součinitel smykového tření – mokrý kontakt Ra 1

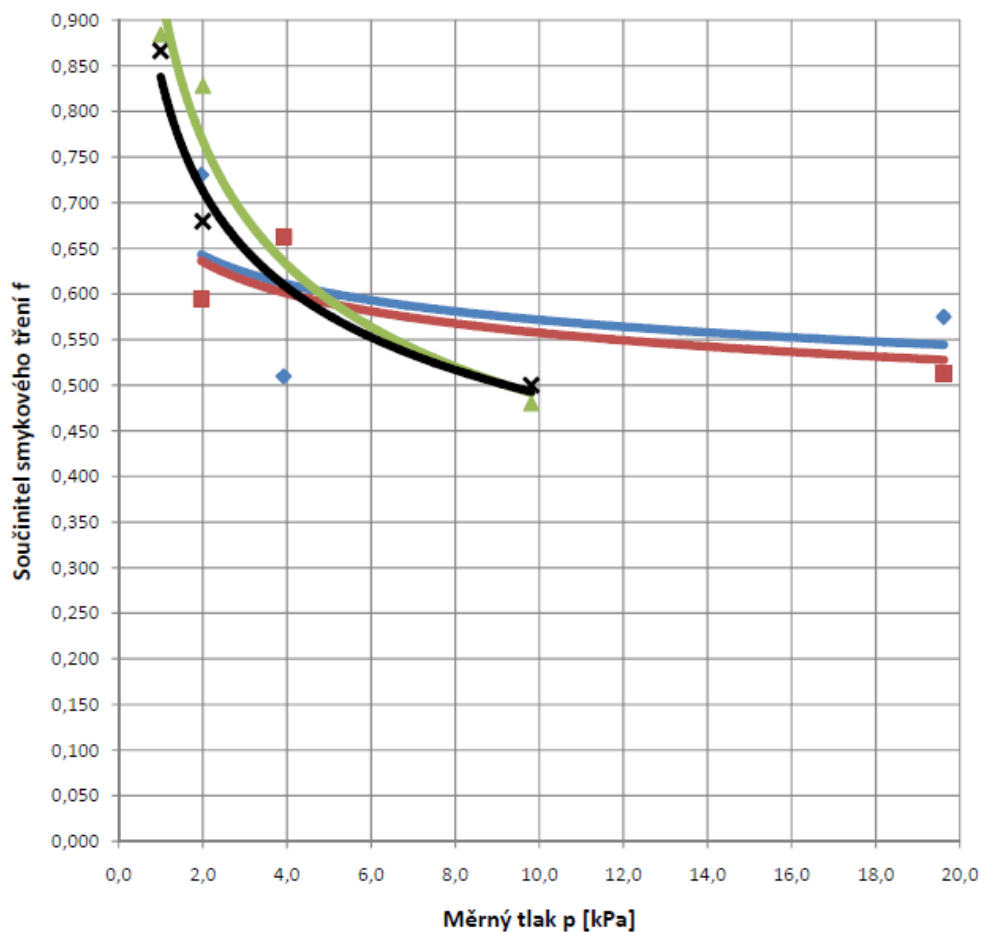
### Dynamický součinitel smykového tření - suchý kontakt $R_a 0,41$ ( $v=0,14\text{ms}^{-1}$ )



- ◆ Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- ▲ Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- ✕ Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- Mocninný (Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

**Obr. 7.20** Dynamický součinitel smykového tření – suchý kontakt  $R_a 0,41$  při skluzové rychlosti  $0,14 \text{ ms}^{-1}$

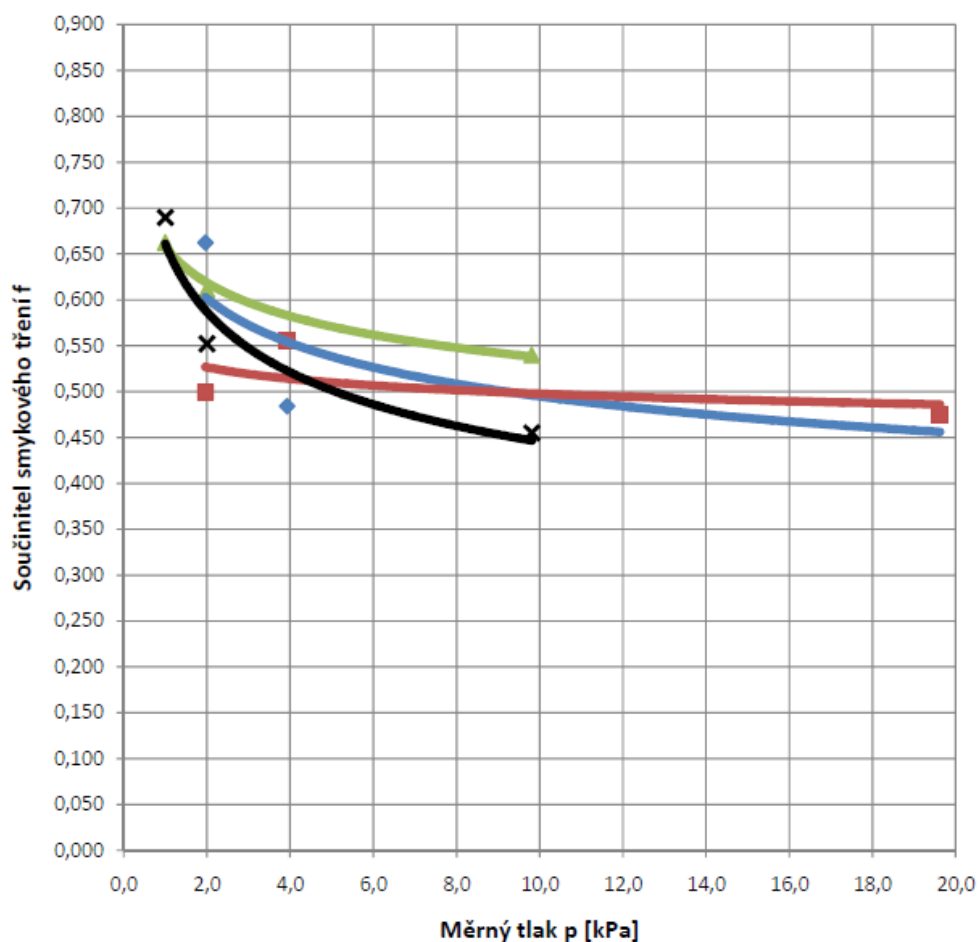
**Dynamický součinitel smykového tření - suchý kontakt  $R_a$  0,58 ( $v=0,14\text{ms}^{-1}$ )**



- ◆ Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- ▲ Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- ✕ Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- Mocninný (Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

**Obr. 7.21** Dynamický součinitel smykového tření – suchý kontakt  $R_a$  0,58 při skluzové rychlosti  $0,14\text{ms}^{-1}$

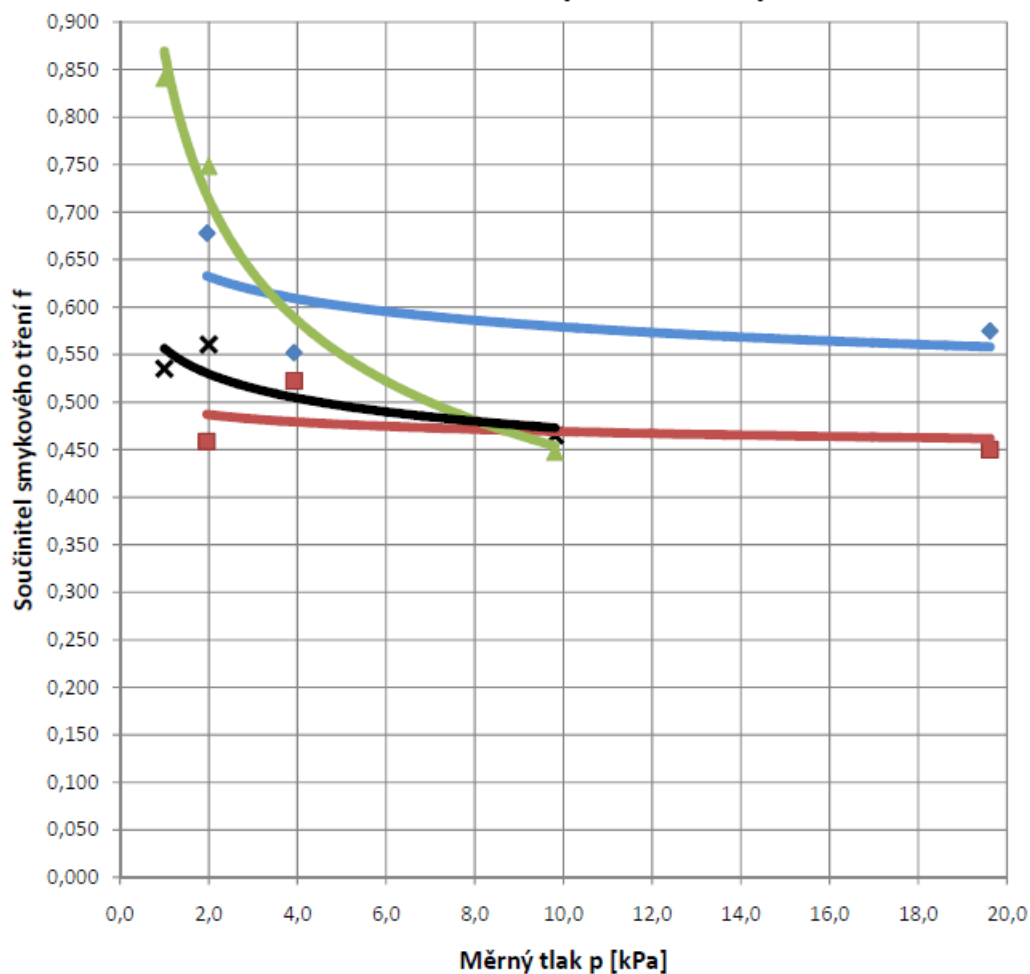
### Dynamický součinitel smykového tření - suchý kontakt Ra 1 ( $v=0,14\text{ms}^{-1}$ )



- ◆ Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- ▲ Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- ✕ Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- Mocninný (Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

**Obr. 7.22** Dynamický součinitel smykového tření – suchý kontakt Ra 1 při skluzové rychlosti  $0,14\text{ ms}^{-1}$

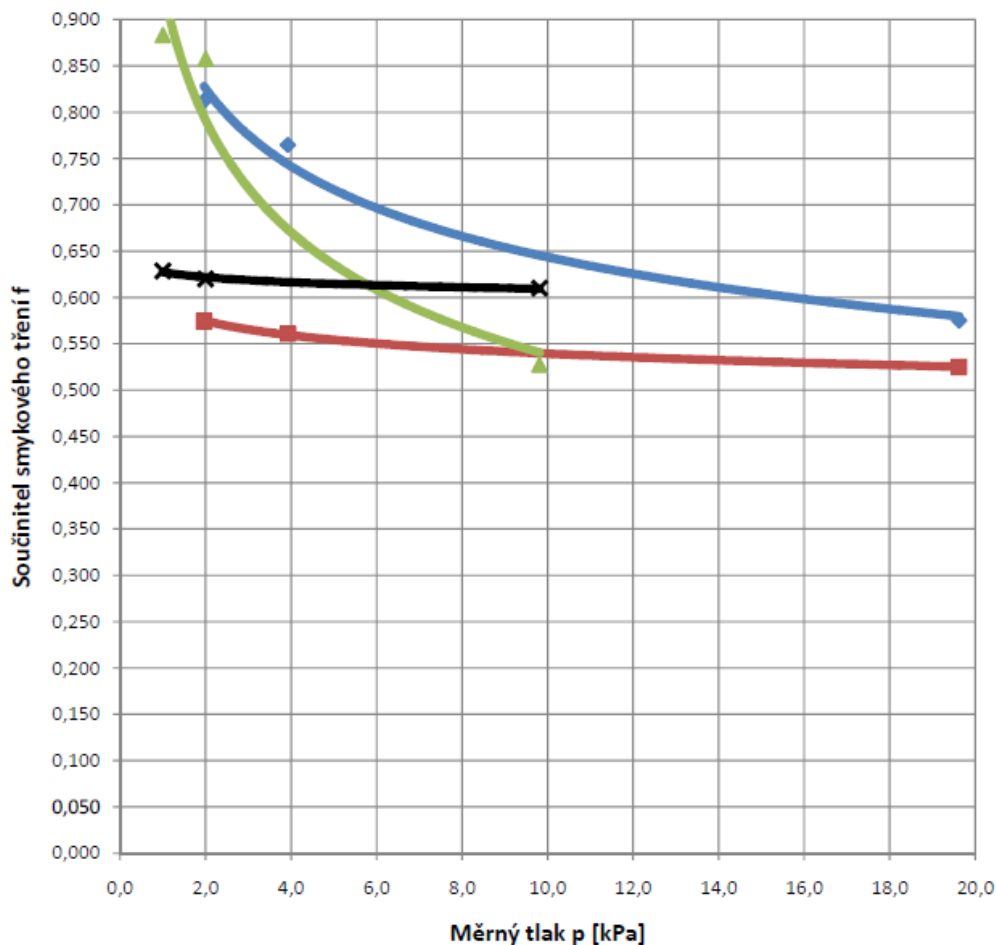
### Dynamický součinitel smykového tření - mokrý kontakt Ra 0,41 ( $v=0,14\text{ms}^{-1}$ )



- ◆ Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- ▲ Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- ✕ Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- Mocninný (Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

**Obr. 7.23** Dynamický součinitel smykového tření – mokrý kontakt Ra 0,41 při skluzové rychlosti  $0,14\text{ms}^{-1}$

### Dynamický součinitel smykového tření - mokrý kontakt Ra 0,58 ( $v=0,14\text{ms}^{-1}$ )



◆ Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm

■ Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm

▲ Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm

✕ Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm

— Mocninný (Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)

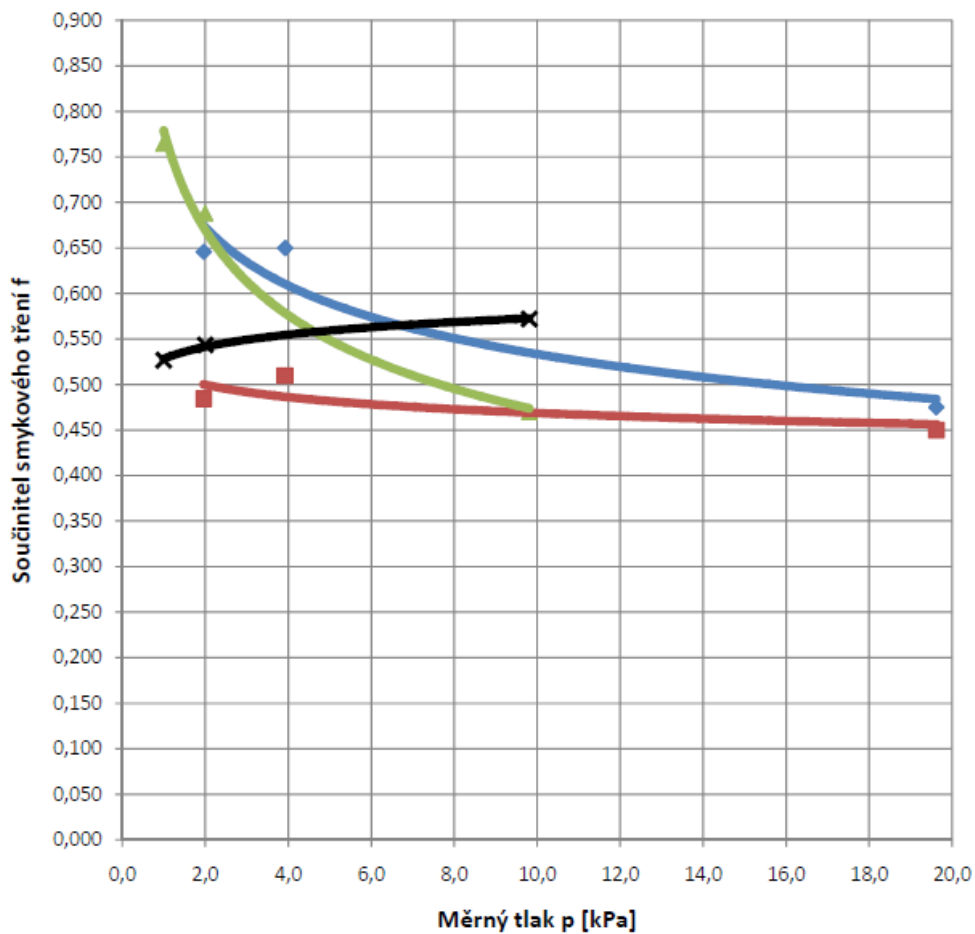
— Mocninný (Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

— Mocninný (Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)

— Mocninný (Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

**Obř. 7.24** Dynamický součinitel smykového tření – mokrý kontakt Ra 0,58 při skluzové rychlosti  $0,14\text{ ms}^{-1}$

### Dynamický součinitel smykového tření - mokrý kontakt Ra 1 ( $v=0,14\text{ms}^{-1}$ )



- ◆ Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- ▲ Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm
- ✕ Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm
- Mocninný (Vzorek č. 1,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 2,  $\Phi d=2,52$  cm,  $S=5$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 3,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4 mm)
- Mocninný (Vzorek č. 4,  $\Phi d=3,57$  cm,  $S=10$  cm<sup>2</sup>, tloušťka 4,5 mm)

**Obr. 7.25** Dynamický součinitel smykového tření – mokrý kontakt Ra 1 při skluzové rychlosti  $0,14\text{ ms}^{-1}$

## 7.7.3 Vyhodnocení výsledků

Hodnoty konečného součinitele smykového tření pro suchá a mokrá kontakt jsou uvedeny v tabulkách Tab.5, Tab. 6, Tab. 7, Tab.8.

**Tab. 5** Statický součinitel tření – suchý kontakt

| <b>Statický součinitel tření - suchý kontakt</b> |                                  |                                     |
|--|----------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Drsnost</b>                                   | <b>Průměrný součinitel tření</b> | <b>Průměrná směrodatná odchylka</b> |
| <b>Ra</b>  |                                  |                                     |
| <b>0,41</b>                                      | 0,444                            | 0,122                               |
| <b>0,58</b>                                      | 0,488                            | 0,099                               |
| <b>1,00</b>                                      | 0,454                            | 0,048                               |

**Tab. 6** Statický součinitel tření – mokrá kontakt

| <b>Statický součinitel tření - mokrá kontakt</b> |                                  |                                     |
|--|----------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Drsnost</b>                                   | <b>Průměrný součinitel tření</b> | <b>Průměrná směrodatná odchylka</b> |
| <b>Ra</b>  |                                  |                                     |
| <b>0,41</b>                                      | 0,344                            | 0,081                               |
| <b>0,58</b>                                      | 0,497                            | 0,109                               |
| <b>1,00</b>                                      | 0,445                            | 0,049                               |

**Tab. 7** Dynamický součinitel tření – suchý kontakt

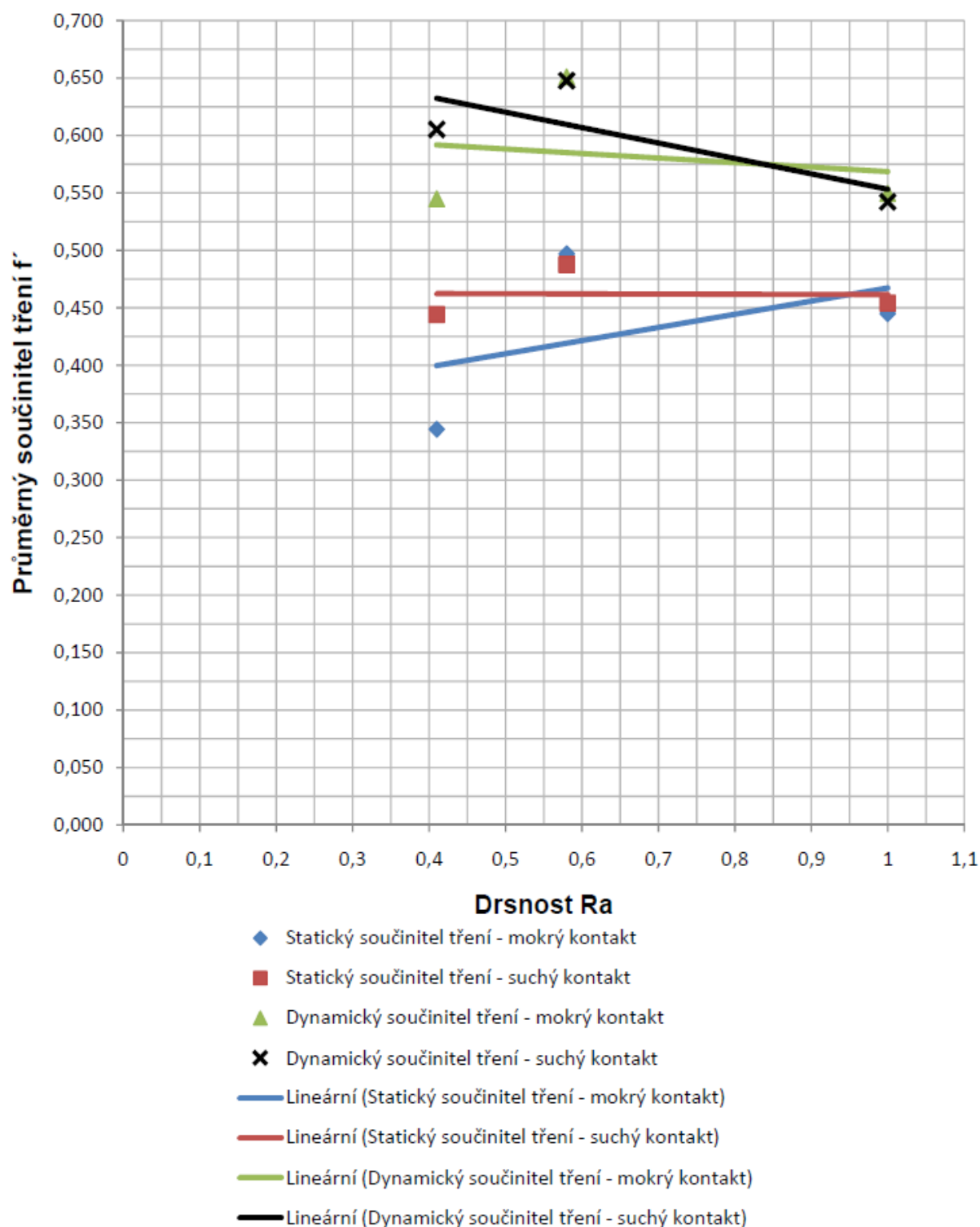
| <b>Dynamický součinitel tření - suchý kontakt</b> |                                  |                                     |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Drsnost</b>                                    | <b>Průměrný součinitel tření</b> | <b>Průměrná směrodatná odchylka</b> |
| <b>Ra</b>   |                                  |                                     |
| <b>0,41</b>                                       | 0,605                            | 0,132                               |
| <b>0,58</b>                                       | 0,648                            | 0,130                               |
| <b>1,00</b>                                       | 0,542                            | 0,068                               |

**Tab. 8** Dynamický součinitel tření – mokrý kontakt

| <b>Dynamický součinitel tření - mokrý kontakt</b> |                                  |                                     |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Drsnost</b>                                    | <b>Průměrný součinitel tření</b> | <b>Průměrná směrodatná odchylka</b> |
| <b>Ra</b>   |                                  |                                     |
| <b>0,41</b>                                       | 0,545                            | 0,082                               |
| <b>0,58</b>                                       | 0,651                            | 0,082                               |
| <b>1,00</b>                                       | 0,550                            | 0,070                               |

Výrobce udává pro řemen TF-75TE hodnotu součinitele smykového tření  $f=0,4$ . Nemám bližší informace o podmínkách měření výrobce řemene, ale předpokládám, že se jedná o statický součinitel. Hodnota součinitele smykového tření udávaná výrobcem odpovídá námi naměřené hodnotě.

## Porovnání suchého a mokrého kontaktu

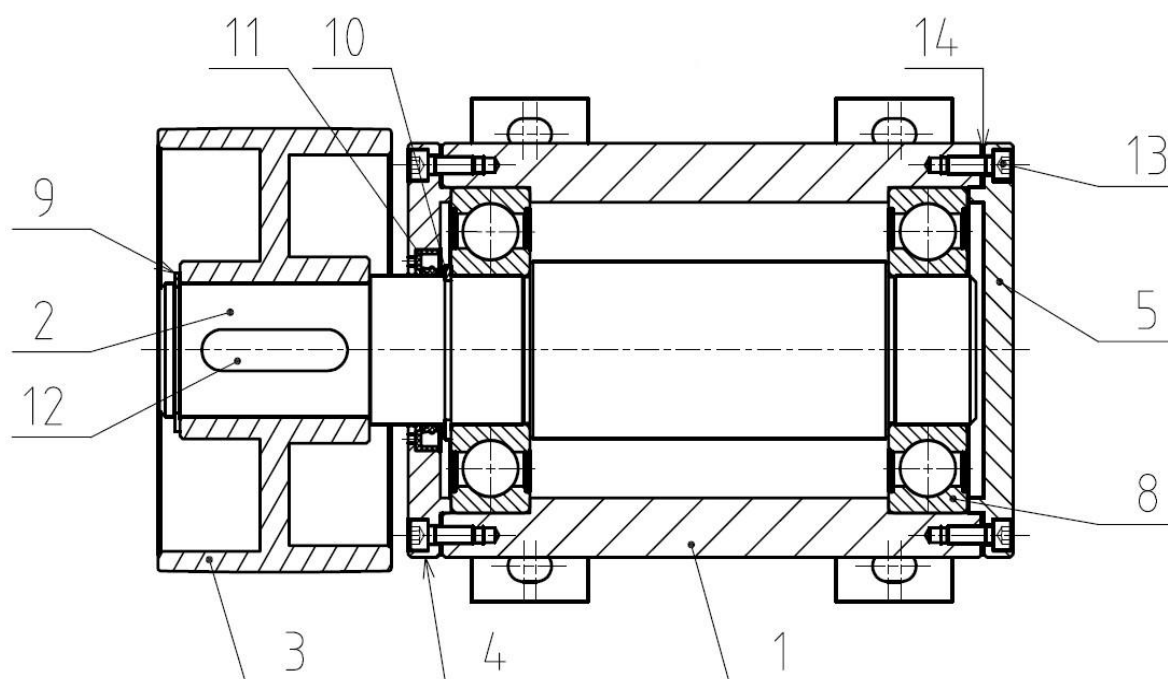


Obr. 7.26 Porovnání suchého a mokrého kontaktu

Pro statický součinitel tření platí, že průměrný součinitel tření se zvětšuje s rostoucí drsností. To se dalo předpokládat, protože drsnost má velký vliv na součinitel smykového tření. U dynamického součinitele tření to není tak jednoznačné. Může jít o chybu měření, protože měření ovlivňuje řada faktorů. Jako například to, že drsnost povrchu není všude stejná. Pro ověření výsledků bychom museli provést větší počet měření. Avšak pro naše potřeby jsou výsledky dostačující. Protože jsme chtěli pouze orientačně ověřit hodnoty udávané výrobcem řemene. Jednotlivé body jsou lineárně interpolovány. Přímký mají velice podobný úhel stoupání což naznačuje správnost provedení měření. Je zajímavé, že hodnoty součinitele dynamického tření jsou větší než hodnoty statického součinitele, taková situace může nastat, jak ukazuje obr. 7.8 součinitel smykového tření se zvyšující skluzovou rychlostí roste a poté při po dovršení maximální hodnoty součinitele tření začne klesat. Experimentem jsme také dokázali, že převod plochým řemenem bude funkční, protože teoretický součinitel tření vyšel  $f=0,198$  a všechny naměřené hodnoty jsou větší.

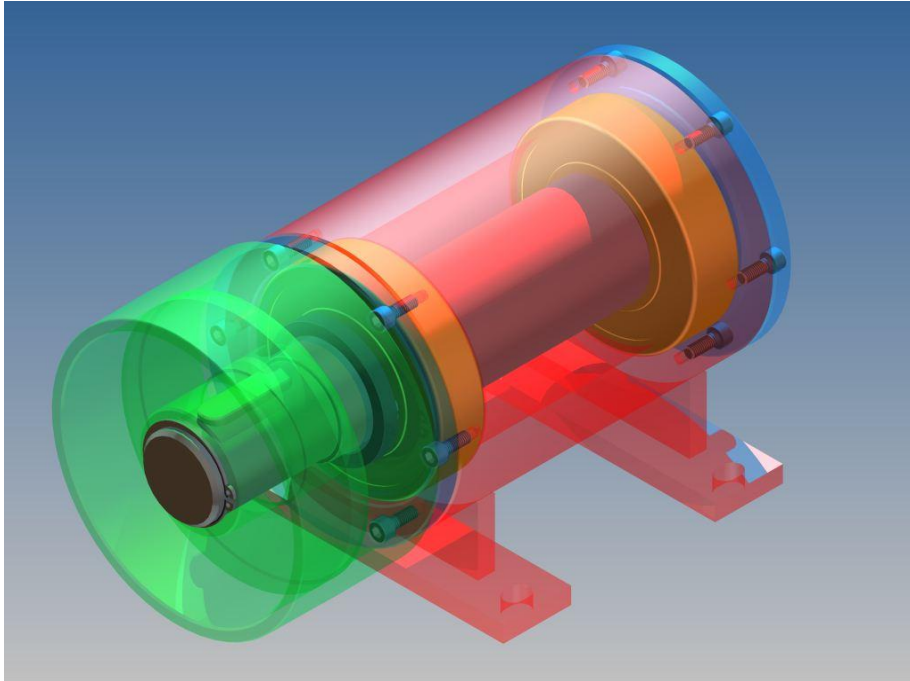
## 8 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Hřídel je uložena v konzole, jejíž hlavní část tvoří trubka, ve dvou kuličkových ložiscích. Zařízení je uzavřeno dvěma víčky, z nichž jedním víčkem prochází hřídel. Těsnost mezi víčkem a hřídelí zaručuje hřídelový těsnicí kroužek. Víčka jsou ke konzole připevněna šrouby s vnitřním šestihranem. Řemenice je svařovaná a na hřídeli zajištěna pojistným kroužkem. Jelikož bude zařízení pracovat v korozním prostředí, jsou součásti zhotoveny z nerezové oceli. Protože se, předpokládá výroba pouze v malé sérii je vřeteník konstruován ze svařovaných součástí.



**Obr. 8.1** Vřeteník pro zavěšení rotačního filtru v řezu

**1** – Konzola, **2** – Hřídel, **3** – Řemenice, **4** – Víko s dírou, **5** – Víko, **8** – Ložisko 6310-2Z, **9** – Pojistný kroužek pro hřídel  $\Phi 45$ , **10** – Pojistný kroužek pro hřídel  $\Phi 50$ , **11** – Hřídelový těsnicí kroužek G 50x68x8–NBR, **12** – Pero, **13** – Šroub s vnitřním šestihranem, **14** – Těsnění



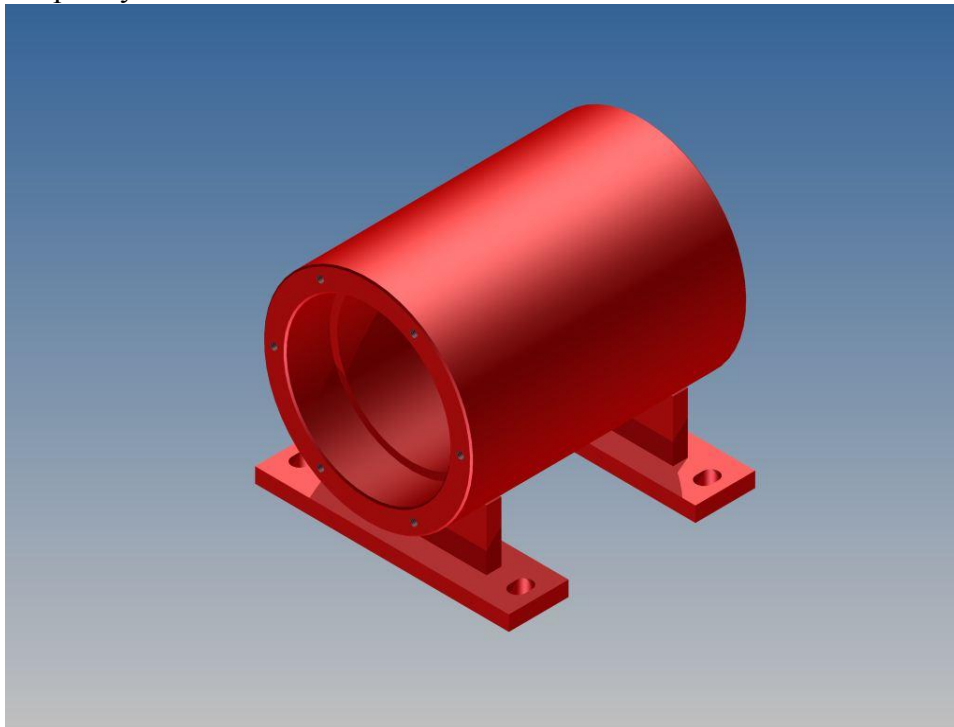
**Obr. 8.2** Vřeteník pro zavěšení rotačního filtru

---

## 8.1 Popis nejdůležitějších součástí

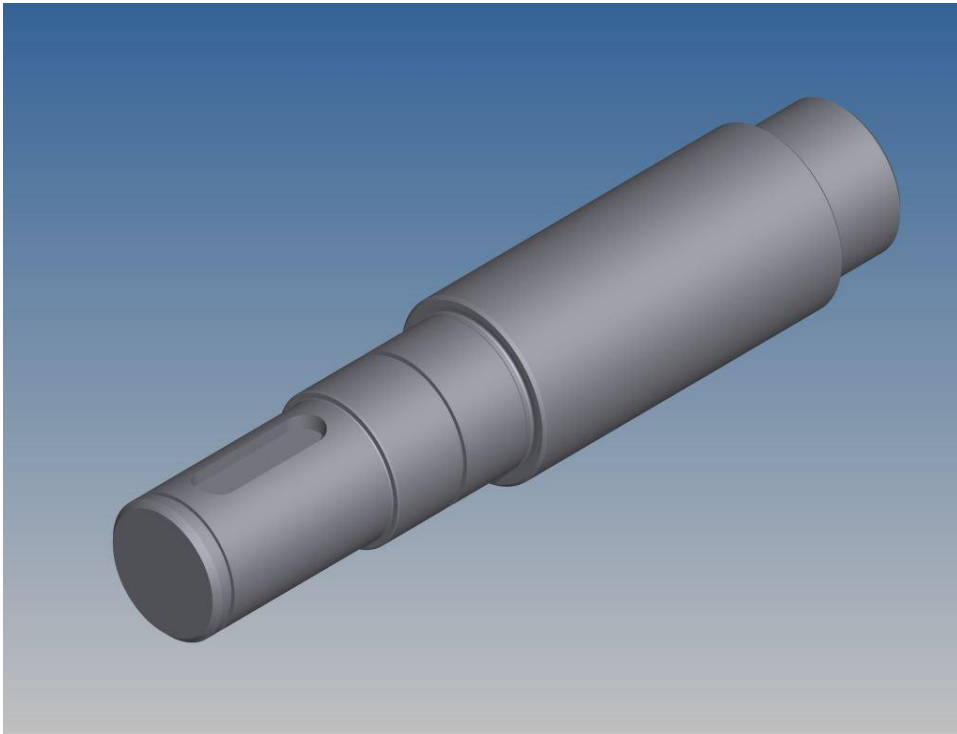
### 1 – Konzola

Konzola je svařenec a skládá se z několika částí. Hlavní část tvoří silnostěnná trubka, v níž jsou vysoustruženy otvory pro uložení ložisek. Na tuto část jsou přivařeny tyče obdélníkového průřezu s otvory pro šrouby, za které bude celá soustava přichycena k rámu.



**Obr. 8.3** Konzola

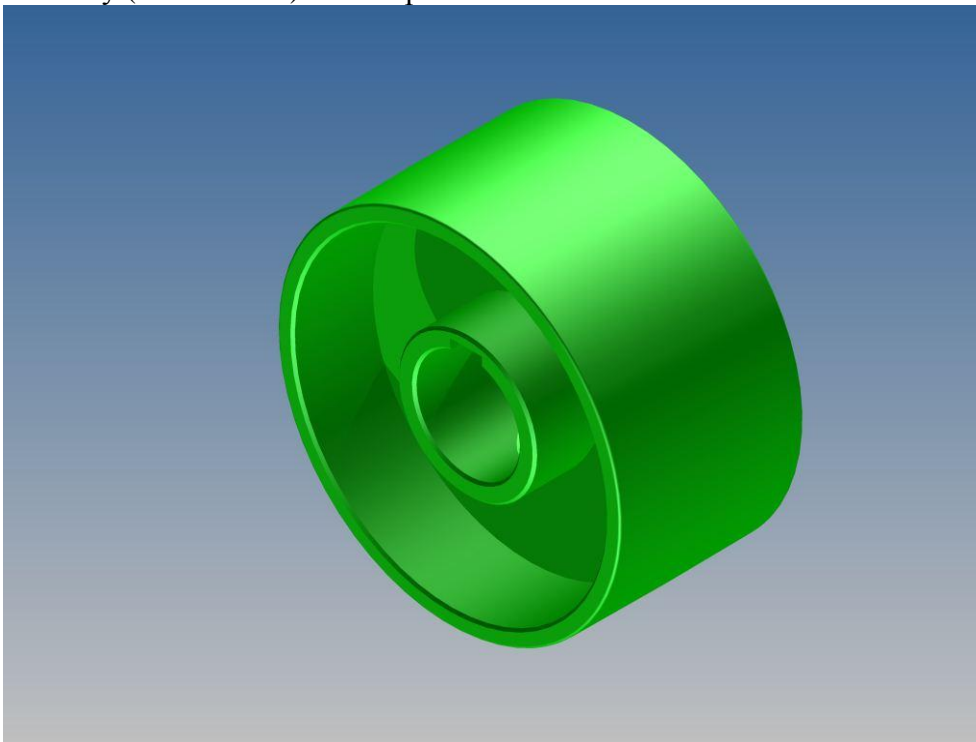
## 2 – Hřídel



**Obr. 8.4** Hřídel

## 3 – Řemenice

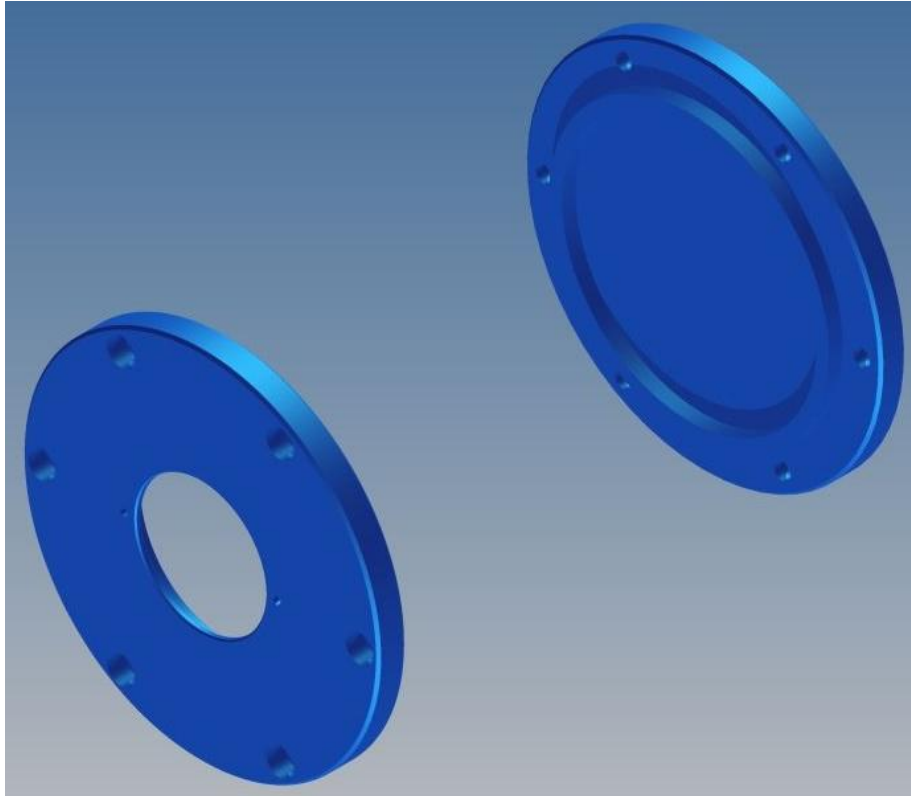
Řemenice je svařenec. Povrch řemenice, kde dochází ke styku s řemenem je bombírovaný ( $R=2000\text{mm}$ ) kvůli lepšímu vedení řemene.



**Obr. 8.5** Řemenice

**4 – Víko s dírou, 5 - Víko**

Víko spolu s hřídelovým těsnícím kroužkem chrání ložisko před nečistotami a vlhkostí. Nejdůležitější je ochrana před vlhkostí, protože ložiska na rozdíl od ostatních součástí nebudou vyrobena z nerezové oceli. Osazení na víku nám zároveň ustavuje ložisko v požadované poloze.



**Obr. 8.6** Vívka

**8 – Ložisko 6310-2Z**

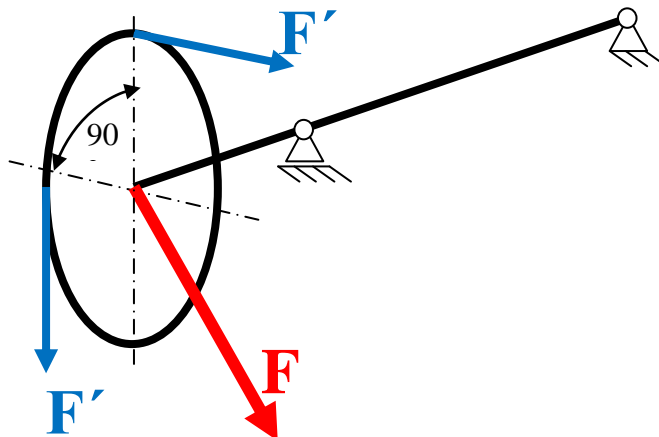
Ložiska jsou kuličková radiální. Vystačíme si s tímto nejjednodušším typem, protože zatížení je pouze v radiálním směru. Ložiska jsou zakrytovaná z obou dvou stran. Tento typ ložisek má uvnitř mazivo na celou dobu své životnosti a nemusí se domazávat v průběhu provozu.

## 8.2 Pevnostní výpočet [1]

8.2

8.2.1 Celková síla  $F$  působící na hřídel

8.2.1



Obr. 8.7 Síly na řemenici

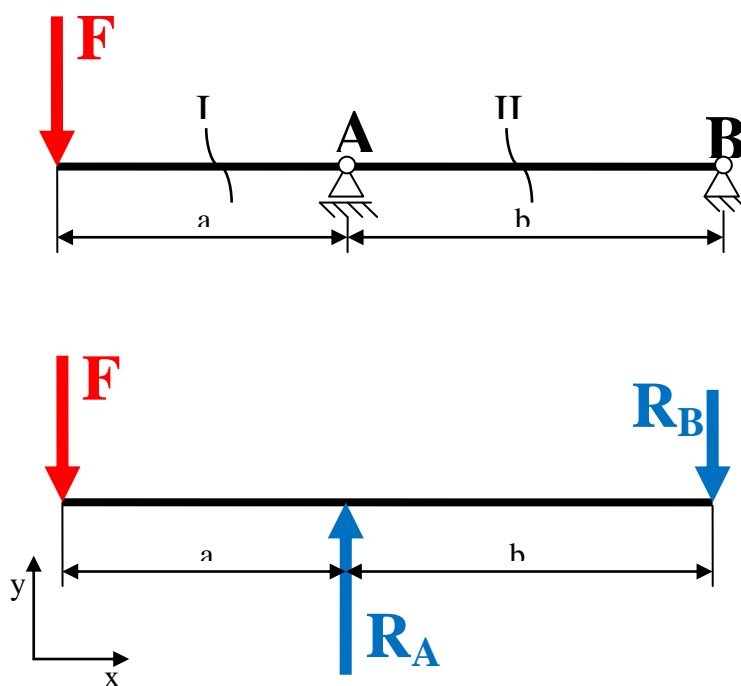
$$F = \sqrt{F'^2 + F''^2} = \sqrt{(7\,500\text{ N})^2 + (7\,500\text{ N})^2} = \underline{\underline{10\,607\text{ N}}}$$

kde:

 $F$  [N] - celková síla působící na hřídel $F', F''$  [N] - největší tahová síla v řemeni

## 8.2.2 Uvolnění

8.2.2



Obr. 8.8 Uvolněný prut

### 8.2.3 Výpočet reakcí v ložiscích

$$a = 74 \text{ mm} = 0,074 \text{ m}$$

$$b = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$$

$$\sum F_y = 0: -F + R_A - R_B = 0$$

$$\sum M_A = 0: F \cdot a - R_B \cdot b = 0$$

$$R_B = F \frac{a}{b} = 10\,607 \text{ N} \frac{0,074 \text{ m}}{0,15 \text{ m}} = \underline{\underline{5\,232,8 \text{ N}}}$$

$$R_A = F + R_B = F \frac{a+b}{b} = 10\,607 \text{ N} \frac{0,074 \text{ m} + 0,15 \text{ m}}{0,15 \text{ m}} = \underline{\underline{15\,839,8 \text{ N}}}$$

kde  $R_A$  [N] - reakce v ložisku A

$R_B$  [N] - reakce v ložisku B

### 8.2.4 Výsledné vnitřní účinky

Pro zjednodušení budu uvažovat prut stálého průřezu. Napětí od posouvající síly je ve srovnání s napětím od ohybového momentu zanedbatelné. Proto budu dále uvažovat, že prut je namáhán pouze ohybovým momentem.

$$I. \quad x \in \langle 0, a \rangle$$

$$M_o^I = -F \cdot x$$

kde:

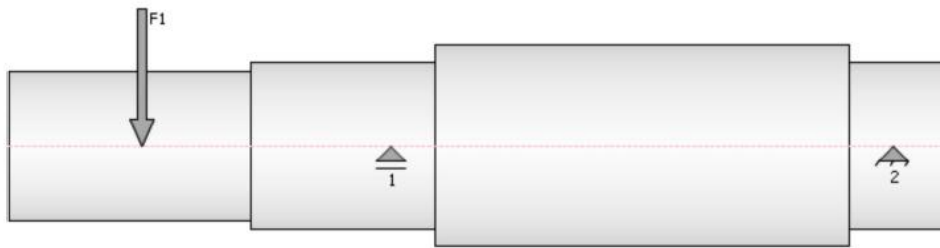
$$M_o^I \text{ [Nm]} \quad - \text{ ohybový moment v I. úseku}$$

$$II. \quad x \in \langle 0, b \rangle$$

$$M_o^{II} = -F(a+x) + R_A \cdot x$$

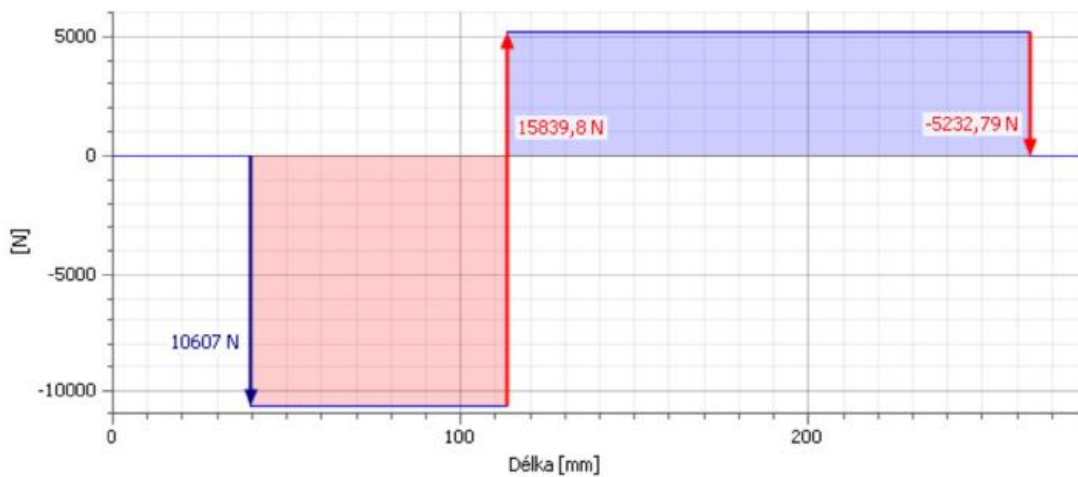
kde:

$$M_o^{II} \text{ [Nm]} \quad - \text{ ohybový moment v II. úseku}$$



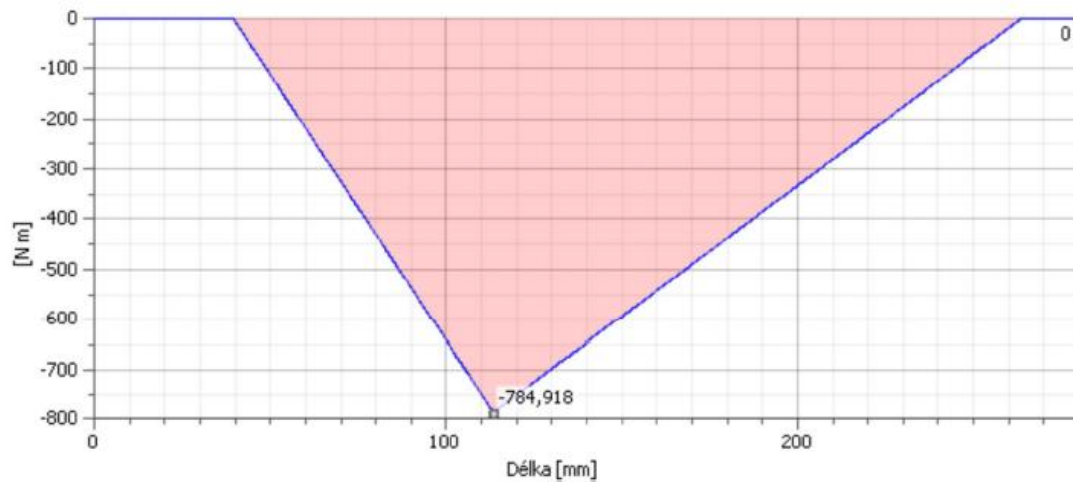
Obr. 8.9 Zatížená hřídel s podporami

Posouvající síla:



Obr. 8.10 Průběh posouvající síly

Ohybový moment:



Obr. 8.11 Průběh ohybového momentu

Kritické místo bude v bodě A:

$$M_o^A = -F \cdot a = -10\,607 \text{ N} \cdot 0,074 \text{ m} = \underline{\underline{-784,9 \text{ Nm}}}$$

kde:

$$M_o^A [\text{Nm}] \quad - \text{ ohybový moment v místě A}$$

Předběžný návrh průměru hřídele vzhledem k meznímu stavu pružnosti:

Dáno:

$$k_n = 2$$

$$R_{p0,2} = 210 \text{ MPa} = 210 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_o^A = \frac{|M_o^A|}{\frac{\pi \cdot d_{\min}^3}{32}} \leq \frac{R_{p0,2}}{k_n}$$

$$d_{\min} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot |M_o^A| \cdot k_n}{\pi \cdot R_{p0,2}}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot |-784,9 \text{ Nm}| \cdot 2}{\pi \cdot 210 \cdot 10^6 \text{ Pa}}} = 0,0424 \text{ m} = 42,4 \text{ mm} \Rightarrow d = \underline{\underline{45 \text{ mm}}}$$

kde:

$$k_n [-] \quad - \text{ návrhový součinitel}$$

$$R_{p0,2} [\text{Pa}] \quad - \text{ smluvní mez kluzu}$$

$$d_{\min} [\text{m}] \quad - \text{ minimální průměr hřídele, který ještě přenesese dané zatížení}$$

$$d [\text{mm}] \quad - \text{ zvolený průměr hřídele (vychází z } d_{\min} \text{)}$$

Napětí v místě A:

$$\sigma_o^A = \frac{|M_o^A|}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} = \frac{|-784,9 \text{ Nm}|}{\frac{\pi \cdot (45 \text{ mm})^3}{32}} = \underline{\underline{87,7 \text{ MPa}}}$$

kde:

$$\sigma_o^A [\text{MPa}] \quad - \text{ ohybový moment v místě A}$$

### 8.2.5 Materiál

Zařízení bude pracovat v korozním prostředí, a proto budou jeho součásti vyrobeny z nerezové oceli **DIN 1.4301 - AISI 304**.

Ocel je odolná proti vodě, vodní páře, vlhkosti vzduchu, slabým organickým a anorganickým kyselinám do středních teplot. Má široké možnosti použití jako např. v potravinářském, mlékárenském, pivovarnickém a vinařském průmyslu, ve farmaceutickém a kosmetickém průmyslu, pro předměty a přístroje pro domácnost, při stavbě chemických přístrojů, v architektuře, pro chirurgické nástroje, při stavbě výčepů a kuchyní, u sanitárních zařízení.

### 8.2.6 Bezpečnost

a) Bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti

$$k_{MSP} = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_o^A} = \frac{210 \text{ MPa}}{87,7 \text{ MPa}} = \underline{\underline{2,39}}$$

b) Bezpečnost vzhledem k meznímu stavu únavového porušení

$$k_{MSU} = \frac{\sigma'_{co}}{\sigma_o^A} = \frac{166,8 \text{ MPa}}{87,7 \text{ MPa}} = \underline{\underline{1,9}}$$

Tab. Součinitele pro výpočet korigované meze únavy

|   |               |
|---|---------------|
| Součinitel vlivu jakosti povrchu $k_a$ :<br>- <i>koeficienty pro obrábění nebo tažení za studena.</i> | $k_a = 0,86$  |
| Součinitel vlivu velikosti tělesa $k_b$ :   | $k_b = 0,825$ |
| Součinitel vlivu způsobu zatěžování $k_c$ :<br>- <i>pro ohyb</i>                                      | $k_c = 1$     |
| Součinitel vlivu teploty $k_d$ :<br>- <i>pro teplotu 20°C</i>   | $k_d = 1$     |
| Součinitel spolehlivosti $k_e$ :<br>- <i>pro spolehlivost 90%</i>                                     | $k_e = 0,897$ |
| Součinitel zahrnující další vlivy $k_f$ :   | $k_f = 1$     |

#### 8.2.6.1 Výpočet korigované meze únavy $\sigma'_{co}$

$$R_m = 520 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{co} = 0,504 \cdot R_m = 0,504 \cdot 520 \text{ MPa} = 262,08 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_{co} = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot \sigma_{co} = 0,86 \cdot 0,825 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,897 \cdot 1 \cdot 262,08 \text{ MPa} = \underline{\underline{166,8 \text{ MPa}}}$$

kde:

$\sigma'_{co}$  [MPa] - korigovaná mez únavy materiálu

$\sigma_{co}$  [MPa] - mez únavy materiálu

$R_m$  [MPa] - mez pevnosti materiálu

### 8.3 Přepočet otáček bubnu a řemenice

Otáčky bubnu:

$$n_B = 0,04167 \text{ s}^{-1}$$

Otáčky řemenice:

$$\pi \cdot D_{\dot{R}} \cdot n_{\dot{R}} = \pi \cdot D_B \cdot n_B$$

$$n_{\dot{R}} = \frac{D_B \cdot n_B}{D_{\dot{R}}} = \frac{0,8 \text{ m} \cdot 0,04167 \text{ s}^{-1}}{0,15 \text{ m}} = \underline{\underline{0,222 \text{ s}^{-1}}} = \underline{\underline{13,33 \text{ min}^{-1}}}$$

kde:

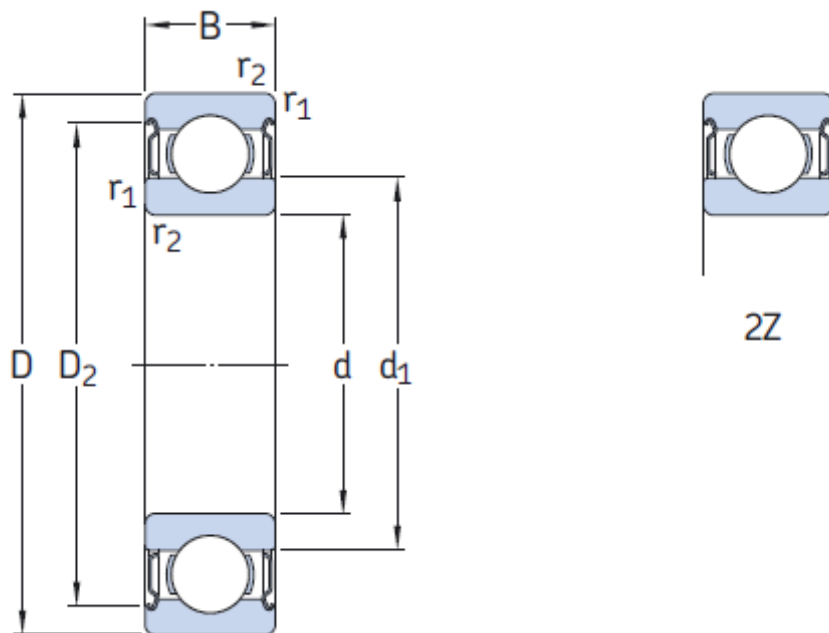
- $n_B$  [ $\text{s}^{-1}$ ] - otáčky bubnu
- $D_B$  [m] - průměr bubnu
- $n_{\dot{R}}$  [ $\text{s}^{-1}$ ] - otáčky řemenice
- $D_{\dot{R}}$  [m] - průměr řemenice

### 8.4 Kontrola životnosti ložiska [1]

Volím radiální kuličková ložiska s oboustranným zakrytováním, protože na hřídel nebude působit axiální síla.

Požadovaná životnost ložiska je 20 let. To je při provozním poměru

$$\frac{\text{Doba chodu}}{\text{Doba klidu}} = \frac{1}{5} \Rightarrow \text{Doba chodu za 1 rok: } L_{h/\text{rok}} = 1460 \text{ h}$$



Obr. 8.12 Ložisko s oboustranným zakrytováním

Ložisko 6310:

d=50 mm

D=110 mm

B=27 mm

**SKF:**

C<sub>0</sub>=38 kN

C=65 kN

a=3 (pro kuličková ložiska)

P<sub>A</sub>=R<sub>A</sub>=15,8398 kN

Základní trvanlivost ložiska při spolehlivosti 90%:

$$L_{10h} = \left( \frac{C}{P} \right)^a \frac{10^6}{60 \cdot n_{\dot{R}}} = \left( \frac{65 \text{ kN}}{15,8398 \text{ kN}} \right)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 13,33 \text{ min}^{-1}} = 86\,399 \text{ h}$$

kde:

C [kN] - dynamická únosnost ložiska

P<sub>A</sub> [kN] - ekvivalentní zatížení v ložisku A

L<sub>10h</sub> [h] - základní trvanlivost ložiska v hodinách

Provozní doba:

$$T = \frac{L_{10h}}{L_{h/rok}} = \frac{86\,399 \text{ h}}{1460 \text{ h}} = 59,2 \text{ let}$$

kde:

L<sub>h/rok</sub> [h] - doba chodu v jednom roce

**ZKL:**

C<sub>0</sub>=37,745 kN

C=61,754 kN

a=3 (pro kuličková ložiska)

P<sub>A</sub>=R<sub>A</sub>=15,8398 kN

Základní trvanlivost ložiska při spolehlivosti 90%:

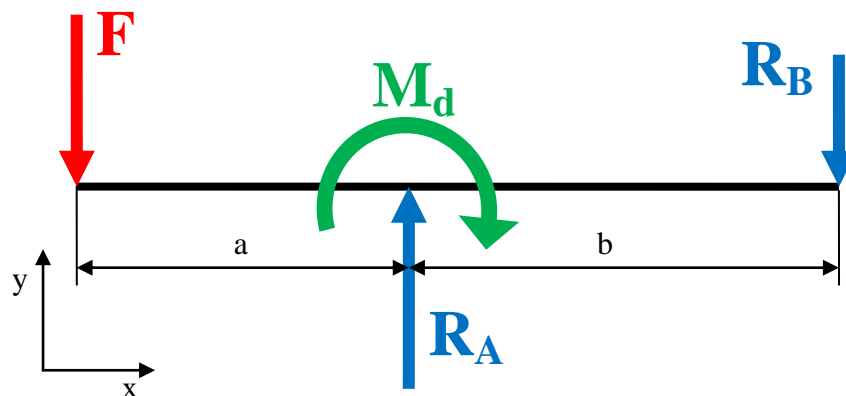
$$L_{10h} = \left( \frac{C}{P} \right)^a \frac{10^6}{60 \cdot n_{\dot{R}}} = \left( \frac{61,754 \text{ kN}}{15,8398 \text{ kN}} \right)^3 \frac{10^6}{60 \cdot 13,33 \text{ min}^{-1}} = 74\,091 \text{ h}$$

Provozní doba:

$$T = \frac{L_{10h}}{L_{h/rok}} = \frac{74\,091 \text{ h}}{1460 \text{ h}} = 50,8 \text{ let}$$

Životnost ložiska bude při zachování provozního poměru pro ložisko od SKF 59,2 let a pro ložisko od ZKL 50,8 let. Pokud ovšem zvolíme ložisko o třídu níže (6210), pak už tohle ložisko nebude vyhovovat z hlediska požadované životnosti.

## 8.5 Kontrola úhlu natočení pod ložiskem [1]



Obr. 8.13 Uvolnění pro výpočet úhlu natočení pod ložiskem

Dáno:

$$E = 200 \text{ GPa}$$

$$M_d = 0 \text{ Nm}$$

$$d = 45 \text{ mm}$$

Kvadratický moment průřezu:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot (0,045 \text{ m})^4}{64} = 2,012\,889\,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I. \quad x \in \langle 0, a \rangle$$

$$M_o' = -F \cdot x$$

$$II. \quad x \in \langle 0, b \rangle$$

$$M_o'' = -F(a + x) + R_A \cdot x + M_d$$

$$\frac{dM_o'}{dM_d} = 0$$

$$\frac{dM_o''}{dM_d} = 1$$

$$\begin{aligned}
\varphi_A &= \frac{1}{E \cdot J} \left[ \int_0^a M_o^I \frac{dM_o^I}{dM_d} dx + \int_0^b M_o^{II} \frac{dM_o^{II}}{dM_d} dx \right] = \\
&= \frac{1}{E \cdot J} \left[ \int_0^a -F \cdot x \cdot 0 \cdot dx + \int_0^b (-F(a+x) + R_A \cdot x + M_d) \cdot 1 \cdot dx \right] = \\
&= \frac{1}{E \cdot J} \left[ -Fab - F \frac{b^2}{2} + R_A \frac{b^2}{2} \right] = \\
&= \frac{1}{E \cdot J} \left[ -10\,607 \text{ N} \cdot 0,074 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m} - 10\,607 \text{ N} \frac{(0,15 \text{ m})^2}{2} + 15\,839,8 \text{ N} \frac{(0,15 \text{ m})^2}{2} \right] = \\
&= \underline{\underline{-1,4623 \cdot 10^{-3} \text{ rad}}} = \underline{\underline{-0,084^\circ}}
\end{aligned}$$

kde:

- $E$  [Pa] - modul pružnosti v tahu  
 $J$  [m<sup>4</sup>] - kvadratický moment průřezu  
 $\varphi_A$  [rad] - úhel natočení hřídele v místě A

Dovolená hodnota úhlu natočení podle SKF:  $\varphi_D = 2' - 10' = 0,033 - 0,167^\circ$

Hodnota úhlu natočení  $\varphi_A$  leží v dovoleném intervalu  $\varphi_D = 2' - 10' = 0,033 - 0,167^\circ$ . A vzhledem k tomu, že pro zjednodušení je uvažován prut o průměru  $\phi d = 45 \text{ mm}$  což je minimální průměr, který se na hřídeli vyskytuje a průměr pod ložiskem je  $\phi d_L = 50 \text{ mm}$ , bude skutečná hodnota natočení ještě menší než vypočítaná. Z tohoto důvodu jsou rozměry hřídele z hlediska kontroly úhlu natočení zcela dostačující.

## 9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

**Tab. 9** Tabulka nákladů na materiál

| Název                               | ks | Rozměry [mm]                  | Délka [m] | Cena [Kč/m; Kč/ks] | Náklady na položku [Kč] |
|-------------------------------------|----|-------------------------------|-----------|--------------------|-------------------------|
| Tělo                                | 1  | trubka $\Phi$ 140- $\Phi$ 100 | 0,19      | 19 205,0 Kč        | 3 649,0 Kč              |
| Víko s dírou                        | 1  | $\Phi$ 140                    | 0,016     | 14 763,0 Kč        | 236,2 Kč                |
| Víko                                | 1  | $\Phi$ 140                    | 0,017     | 14 763,0 Kč        | 251,0 Kč                |
| Hřídel                              | 1  | $\Phi$ 60                     | 0,282     | 3 000,0 Kč         | 846,0 Kč                |
| Podpěra                             | 2  | 40x10                         | 0,11      | 300,0 Kč           | 66,0 Kč                 |
| Úchyt                               | 2  | 40x10                         | 0,17      | 300,0 Kč           | 102,0 Kč                |
| Ložisko 6310-2Z ZKL                 | 2  |                               |           | 237,0 Kč           | 474,0 Kč                |
| M6-16                               | 12 |                               |           | 1,3 Kč             | 16,0 Kč                 |
| Pojistný kroužek $\Phi$ 50          | 1  |                               |           | 10,0 Kč            | 10,0 Kč                 |
| Pojistný kroužek $\Phi$ 45          | 1  |                               |           | 10,0 Kč            | 10,0 Kč                 |
| Hřídelový těsnící kroužek G 50x68x8 | 1  |                               |           | 40,0 Kč            | 40,0 Kč                 |
| Pero 14x9x50:1                      | 1  |                               |           | 16,8 Kč            | 16,8 Kč                 |
| Kontaktní díl                       | 1  | trubka $\Phi$ 150- $\Phi$ 132 | 0,084     | 5 322,0 Kč         | 447,0 Kč                |
| Mezikruží                           | 1  | 136x136x10                    |           |                    | 132,0 Kč                |
| Náboj                               | 1  | trubka $\Phi$ 63- $\Phi$ 40   | 0,068     | 3 200,0 Kč         | 217,6 Kč                |
| Těsnění                             | 2  |                               |           | 100,0 Kč           | 200,0 Kč                |

**Celkové materiálové náklady: 6714,5 Kč**

Do ekonomického zhodnocení je započítána pouze cena materiálu, a průměrná cena komponent, výrobní a jiné náklady nejsou zahrnuty. Musíme tedy tuto částku brát pouze jako informativní. Dá se předpokládat, při výrobě více kusů by tyto náklady byli ještě nižší.

## **10 ZÁVĚR**

Jako optimální variantu jsem zvolil zavěšení na dvou kladkách viz. obr. 4.1. Protože se bude jednat o malosériovou výrobu, budou vřeteník a řemenice svařenec. Hmotnost celé sestavy bude 25,4 kg. Náklady na nákup materiálu a komponentů se budou pohybovat kolem 6700 Kč. Zařízení bude pracovat v korozním prostředí, proto budou součásti vyrobeny z nerezové oceli. Požadovaná životnost zařízení je 20 let, ale jsou použity ložiska s vyšší životností, takže vzhledem k použitým ložiskům zařízení může pracovat teoreticky třikrát déle. Zařízení bude bezúdržbové s dlouhou životností.

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G. *Konstruování strojních součástí*. Překlad, 7. vydání, VUTIUM, Brno 2010, 1186 s.
- [2] KRÍŽ, R., VÁVRA, P. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích. Svazek 6, R - Části strojů a převody. (2. část)*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1995, 291 s. ISBN 8085827883.
- [3] BOHÁČEK, František. *Části a mechanismy strojů III. Převody*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1987, 267 s.
- [4] HALLIDAY, D., RESNICK, R. a WALKER, J. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2003. ISBN 8021418680.
- [5] PERSSON, Bo N. *Sliding Friction: physical principles and applications /*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2000, 511 s. ISBN 3540671927.
- [6] BLÁŠKOVITŠ, Pavel, Jozef BALLA a Marián DZIMKO. *Tribológia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990, 360 s. ISBN 8005006330.
- [7] Hydrotech s.r.o [online] <<http://www.hydrotech-group.com/cz/>>
- [8] Siemens [online] <<http://www.siemens.com>>
- [9] Huber technology [online] <<http://www.huber.de>>
- [10] Idrosid [online] <<http://www.idrosid.it>>
- [11] Přednášky z konstruování strojů – převody [online] <<https://www.vutbr.cz/elearning>>
- [12] Tyma CZ, s.r.o. [online] <<http://www.tyma.cz>>
- [13] CONTRA Praha, s.r.o. [online] <<http://www.contra.cz>>
- [14] Habasit AG [online] <<http://www.habasit.com>>

**12 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

|                                    |   |  |  |  |  |
|------------------------------------|---|--|--|--|--|
| $C$ [kN]                           | – dynamická únosnost ložiska                                    |  |  |  |  |
| $d_{\min}$ [m]                     | – minimální průměr hřídele, který ještě přenesení dané zatížení |  |  |  |  |
| $d$ [mm]                           | – zvolený průměr hřídele (vychází z $d_{\min}$ )                |  |  |  |  |
| $D_B$ [m]                          | – průměr bubnu  |  |  |  |  |
| $D_{\tilde{r}}$ [m]                | – průměr řemenice   |  |  |  |  |
| $E$ [Pa]                           | – modul pružnosti v tahu  |  |  |  |  |
| $f_s$ [-]                          | – statický součinitel smykového tření                           |  |  |  |  |
| $f_d$ [-]                          | – dynamický součinitel smykového tření                          |  |  |  |  |
| $f'$ [-]                           | – minimální potřebná hodnota součinitele smykového tření        |  |  |  |  |
| $F$ [N]                            | – celková síla působící na hřídel                               |  |  |  |  |
| $F_1, F_2$ [N]                     | – tahové síly v řemeni  |  |  |  |  |
| $F', F''$ [N]                      | – největší tahová síla v řemeni                                 |  |  |  |  |
| $J$ [m <sup>4</sup> ]              | – kvadratický moment průřezu                                    |  |  |  |  |
| $k_{MSP}$ [-]                      | – bezpečnost vzhledem meznímu stavu pružnosti                   |  |  |  |  |
| $k_{MSU}$ [-]                      | – bezpečnost vzhledem meznímu stavu únavového porušení          |  |  |  |  |
| $k_n$ [-]                          | – návrhový součinitel   |  |  |  |  |
| $L$ [N]                            | – normálové zatížení  |  |  |  |  |
| $L_{10h}$ [h]                      | – základní trvanlivost ložiska v hodinách                       |  |  |  |  |
| $L_{h/rok}$ [h]                    | – doba chodu v jednom roce                                      |  |  |  |  |
| $M_o^I$ [Nm]                       | – ohybový moment v I. úseku                                     |  |  |  |  |
| $M_o^{II}$ [Nm]                    | – ohybový moment v II. úseku                                    |  |  |  |  |
| $M_o^A$ [Nm]                       | – ohybový moment v místě A                                      |  |  |  |  |
| $M_k$ [Nm]                         | – kroucí moment   |  |  |  |  |
| $n_B$ [s <sup>-1</sup> ]           | – otáčky bubnu  |  |  |  |  |
| $n_{\tilde{r}}$ [s <sup>-1</sup> ] | – otáčky řemenice   |  |  |  |  |
| $P$ [W]                            | – výkon   |  |  |  |  |
| $P_A$ [kN]                         | – ekvivalentní zatížení v ložisku A                             |  |  |  |  |
| $R_A$ [N]                          | – reakce v ložisku A  |  |  |  |  |
| $R_B$ [N]                          | – reakce v ložisku B  |  |  |  |  |
| $R_{p0,2}$ [Pa]                    | – smluvní mez kluzu   |  |  |  |  |
| $R_m$ [MPa]                        | – mez pevnosti materiálu v tahu                                 |  |  |  |  |
| $v_s$ [ms <sup>-1</sup> ]          | – skluzová rychlost   |  |  |  |  |
| $\sigma'_{Co}$ [MPa]               | – korigovaná mez únavy materiálu                                |  |  |  |  |
| $\sigma_{Co}$ [MPa]                | – mez únavy materiálu   |  |  |  |  |
| $\varphi_A$ [rad]                  | – úhel natočení hřídele v místě A                               |  |  |  |  |

## 13 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

- Obr. 1.1** Schéma diskového filtru Idrosid [10]  
**Obr. 1.2** Diskfilter Hydrotech 17/21/31-series [7]  
**Obr. 1.3** Diskfilter Hydrotech 2200-series [7]  
**Obr. 1.4** Diskfilter Hydrotech HSF 2600 [7]  
**Obr. 1.5** Siemens Forty-X Diskfilter [8]  
**Obr. 1.6** Huber RoDisk [9]  
**Obr. 1.7** Idrosid Rotating Disk Filter [10]  
**Obr. 4.1** Schéma zavěšení bubnu na dvou kladkách  
**Obr. 4.2** Schéma zavěšení bubnu na jedné kladce  
**Obr. 4.3** Schéma uložení bubnu na dvou ponořených kladkách  
**Obr. 4.4** Schéma uložení bubnu na dvou kladkách uvnitř bubnu  
**Obr. 4.5** Schéma uložení v kluzných ložiscích  
**Obr. 5.1** Plochý řemen [12]  
**Obr. 5.2** Klínový řemen [12]  
**Obr. 5.3** Ozubený řemen [12]  
**Obr. 5.4** Válečkový řetěz [13]  
**Obr. 7.1** Třecí síla [4]  
**Obr. 7.2** Těleso o hmotnosti  $M$  klouže po ploché podložce. [5]  
**Obr. 7.3** Skluzová dynamika tělesa pro tři různé případy [5]  
**Obr. 7.4** Kinetický fázový diagram. [5]  
**Obr. 7.5** Efekt volné povrchové energie pryže na vztah koeficientem tření a normálovým zatížením  $L$  [5]  
**Obr. 7.6** Pryž na tvrdé drsné podložce [5]  
**Obr. 7.7** Závislost teploty na koeficientu tření a velikosti opotřebení. [5]  
**Obr. 7.8** Průběh koeficientu tření lamely spojky z KTM v závislosti na skluzové rychlosti a počtu sepnutí 1 – 100, 2 – 500, 3 – 1000 sepnutí. [6]  
**Obr. 7.9** Síly na řemenici  
**Obr. 7.10** Vzorky umístěné v držáku  
**Obr. 7.11** Měření třecí síly  
**Obr. 7.12** Vzorky s držáky  
**Obr. 7.13** Řemen TF-75TE [14]  
**Obr. 7.14** Statický součinitel smykového tření – suchý kontakt  $R_a 0,41$   
**Obr. 7.15** Statický součinitel smykového tření – suchý kontakt  $R_a 0,58$   
**Obr. 7.16** Statický součinitel smykového tření – suchý kontakt  $R_a 1$   
**Obr. 7.17** Statický součinitel smykového tření – mokrý kontakt  $R_a 0,41$   
**Obr. 7.18** Statický součinitel smykového tření – mokrý kontakt  $R_a 0,58$   
**Obr. 7.19** Statický součinitel smykového tření – mokrý kontakt  $R_a 1$   
**Obr. 7.20** Dynamický součinitel smykového tření – suchý kontakt  $R_a 0,41$  při skluzové rychlosti  $0,14 \text{ ms}^{-1}$   
**Obr. 7.21** Dynamický součinitel smykového tření – suchý kontakt  $R_a 0,58$  při skluzové rychlosti  $0,14 \text{ ms}^{-1}$   
**Obr. 7.22** Dynamický součinitel smykového tření – suchý kontakt  $R_a 1$  při skluzové rychlosti  $0,14 \text{ ms}^{-1}$   
**Obr. 7.23** Dynamický součinitel smykového tření – mokrý kontakt  $R_a 0,41$  při skluzové rychlosti  $0,14 \text{ ms}^{-1}$

- Obr. 7.24** Dynamický součinitel smykového tření – mokrý kontakt Ra 0,58 při skluzové rychlosti  $0,14 \text{ ms}^{-1}$
- Obr. 7.25** Dynamický součinitel smykového tření – mokrý kontakt Ra 1 při skluzové rychlosti  $0,14 \text{ ms}^{-1}$
- Obr. 7.26** Porovnání suchého a mokrého kontaktu
- Obr. 8.1** Vřeteník pro zavěšení rotačního filtru v řezu
- Obr. 8.2** Vřeteník pro zavěšení rotačního filtru
- Obr. 8.3** Konzola
- Obr. 8.4** Hřídel
- Obr. 8.5** Řemenice
- Obr. 8.6** Víka
- Obr. 8.7** Síly na řemenici
- Obr. 8.8** Uvolněný prut
- Obr. 8.9** Zatížená hřídel s podporami
- Obr. 8.10** Průběh posouvající síly
- Obr. 8.11** Průběh ohybového momentu
- Obr. 8.12** Ložisko s oboustranným zakrytváním
- Obr. 8.13** Uvolnění pro výpočet úhlu natočení pod ložiskem

---

## 14 SEZNAM TABULEK

|               |   |
|---------------|---|
| <b>Tab. 1</b> | Porovnání vlastností jednotlivých typů převodů [11] |
| <b>Tab. 2</b> | Měření drsnosti povrchu                             |
| <b>Tab. 3</b> | Definice vzorků                                     |
| <b>Tab. 4</b> | Konstrukce řemene [14]                              |
| <b>Tab. 5</b> | Statický součinitel tření – suchý kontakt           |
| <b>Tab. 6</b> | Statický součinitel tření – mokrý kontakt           |
| <b>Tab. 7</b> | Dynamický součinitel tření – suchý kontakt          |
| <b>Tab. 8</b> | Dynamický součinitel tření – mokrý kontakt          |
| <b>Tab. 9</b> | Tabulka nákladů na materiál                         |

## **15 SEZNAM PŘÍLOH**

**15**

---

- Příloha 1**      Datový list řemenu Habasit TF-75TE
- Příloha 2**      Výkres sestavy vřeteníku pro zavěšení rotačního filtru **2-3A5-100**
- Příloha 3**      Seznam položek vřeteníku pro zavěšení rotačního filtru **K-4-3A5-100**