




## Elastohydrodynamické mazání za podmínek hladovění

Ing. David Košťál

prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

**Ústav konstruování**

Fakulta strojního inženýrství  
Vysoké učení technické v Brně

 ústav  
konstruování

**Pojednání ke státní doktorské zkoušce**

21. 10. 2013, FSI VUT

Úvod

Specifikace oblasti zájmu a předběžný cíl

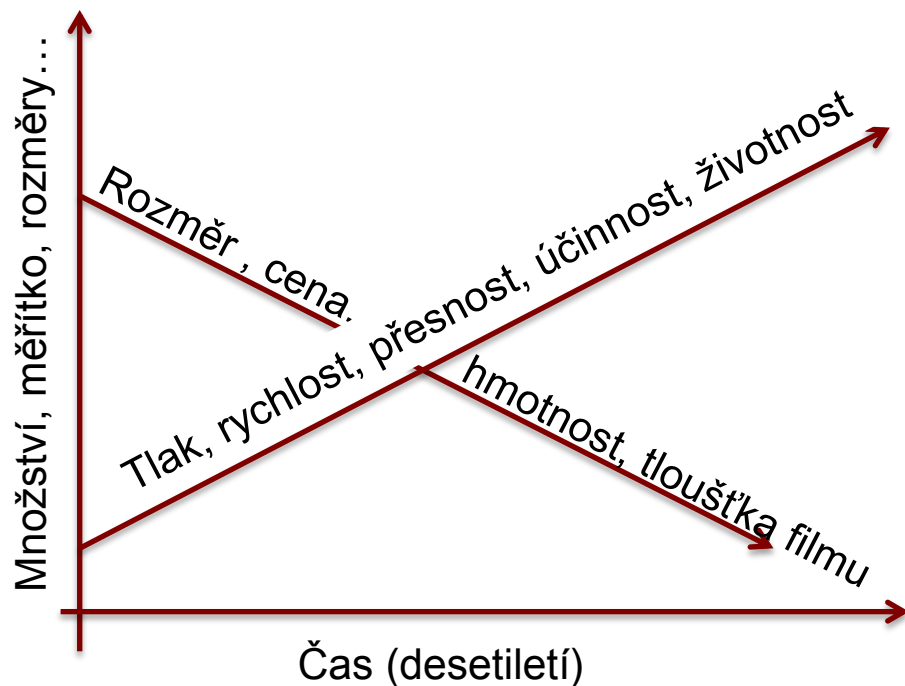
Shrnutí současného stavu poznání

Shrnutí poznatků získaných na základě řešení

Cíle disertační práce a navrhované metody

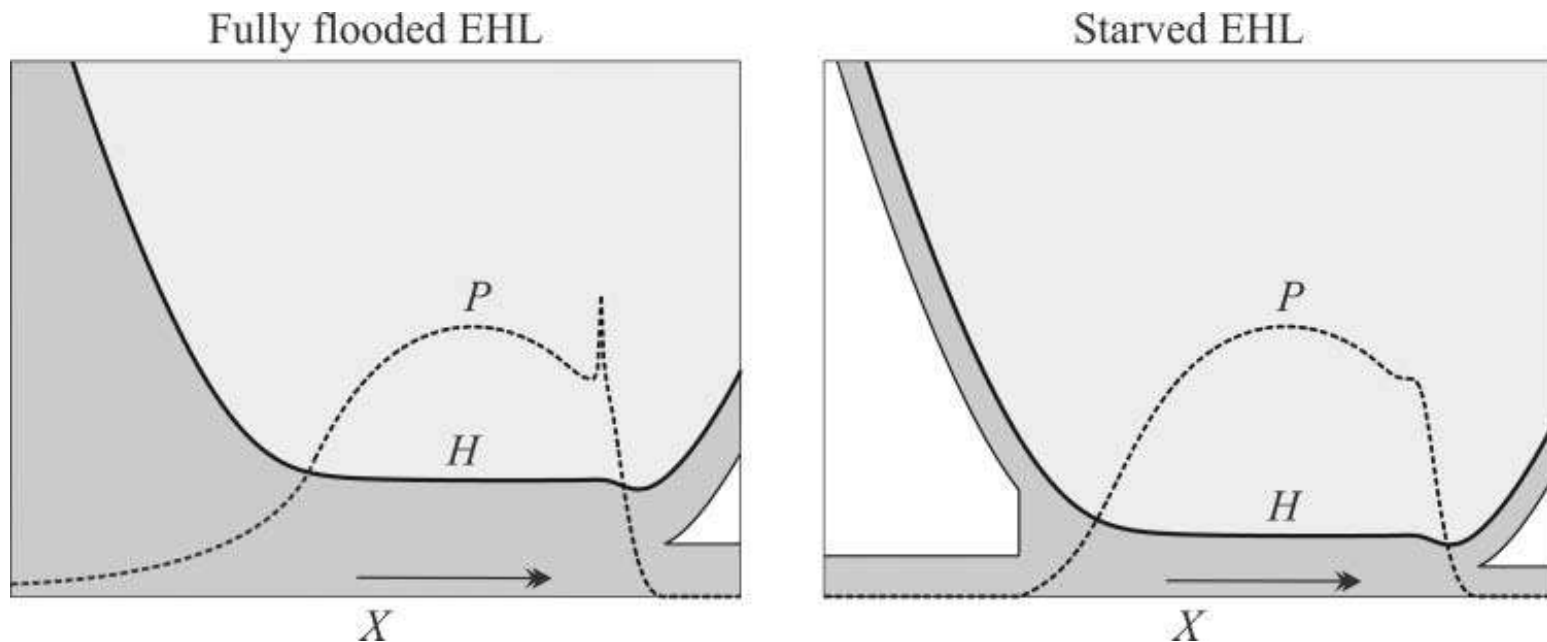
Současný stav řešení

- Nekonformní povrchy a vysoké zatížení
- Dočasný nárůst viskozity
- Mazivo je zachyceno mezi povrchy
- Úplné oddělení povrchů



Zdroj:  
<http://www.materialsviews.com>

- Vstupní meniskus se přibližuje ke kontaktní oblasti
- Snížení vzdálenosti pro nárůst tlaku
- Výsledkem je menší tloušťka maziva



*Schématické znázornění tloušťky filmu a průběhu tlaku pro plně zaplavený a hladovějící kontakt .*

*Van Zoelen, M. T. (2010), Thin Layer Flow in Rolling Element Bearings.*

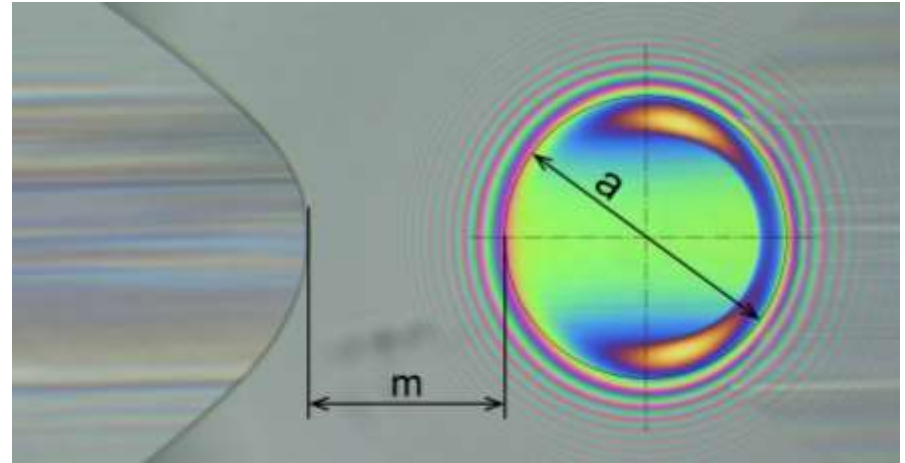
# Úvod – kvantifikace hladovění

Poloha menisku

- Nelze využít pro všechny stupně hladovění

Parametr redukce tloušťky filmu

- Pro všechny úrovně
- Potřeba výsledků pro plně zaplavené podmínky

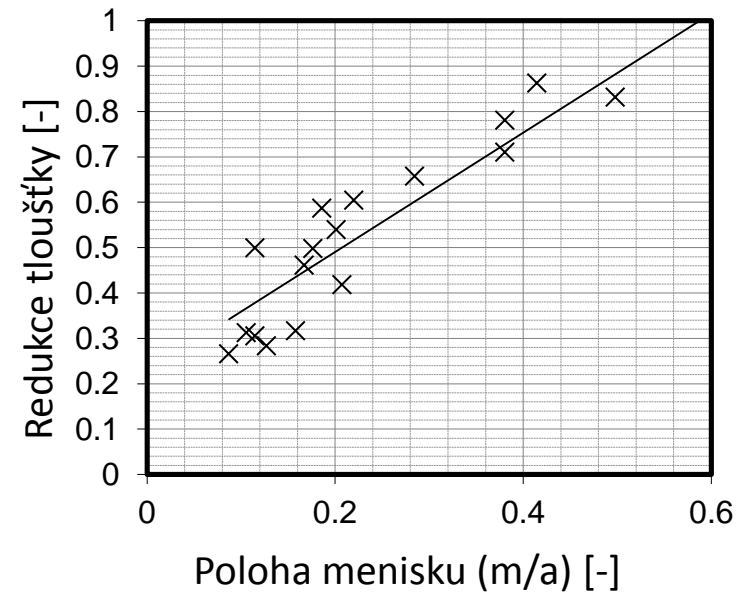


$$R = \frac{\text{centrální tloušťka hladovějícího kontaktu}}{\text{centrální tloušťka plně zaplaveného kontaktu}}$$

$$R = \frac{h_c}{h_{cff}} \in \langle 0; 1 \rangle$$

R = 1 – plně zaplavený režim mazání

R = 0 – suchý kontakt

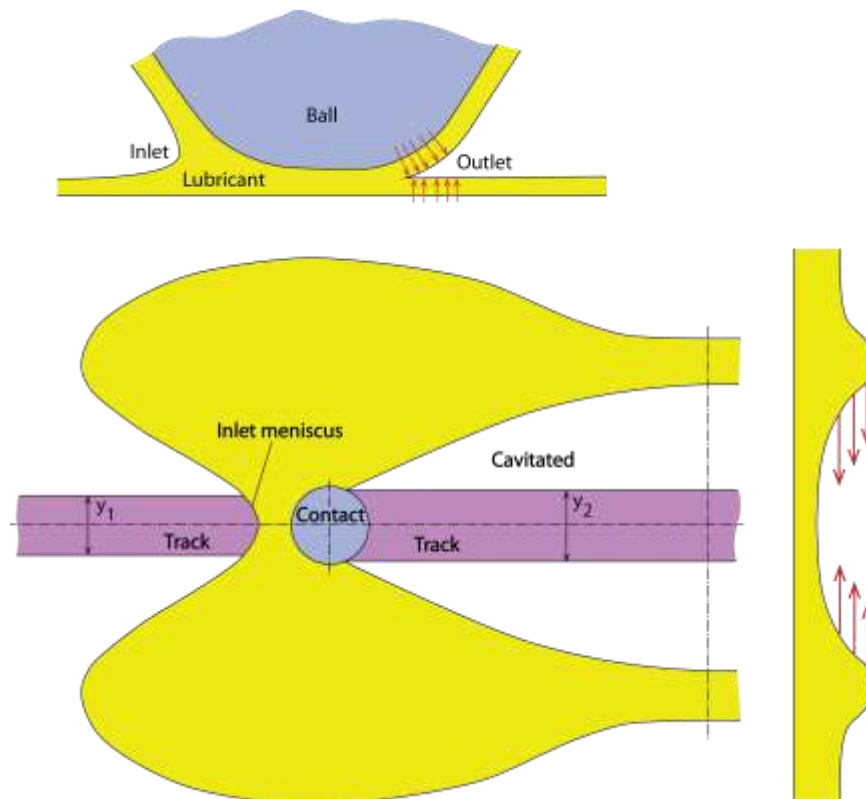


## V kontaktu:

- Blízké okolí kontaktu
- Kapilární síly
- Nezávislé na vzdálenosti kontaktů

## Mimo kontakt:

- Mezi kontakty
- Doplnění stopy ve volné vrstvě maziva
- Povrchové napětí
- Závislé na vzdálenosti

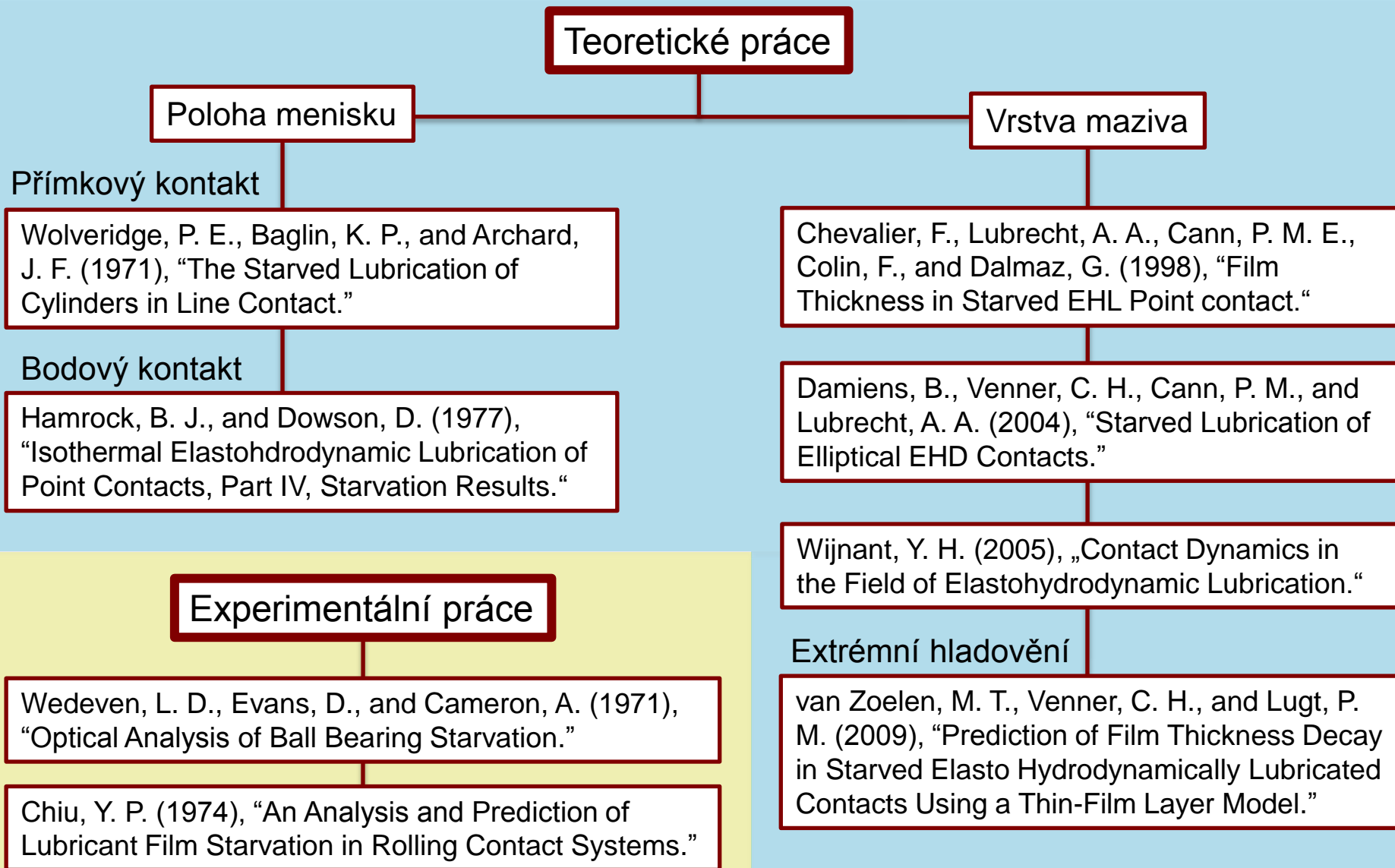


## Předběžné zadání:

Studium elastohydrodynamického mazání za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem

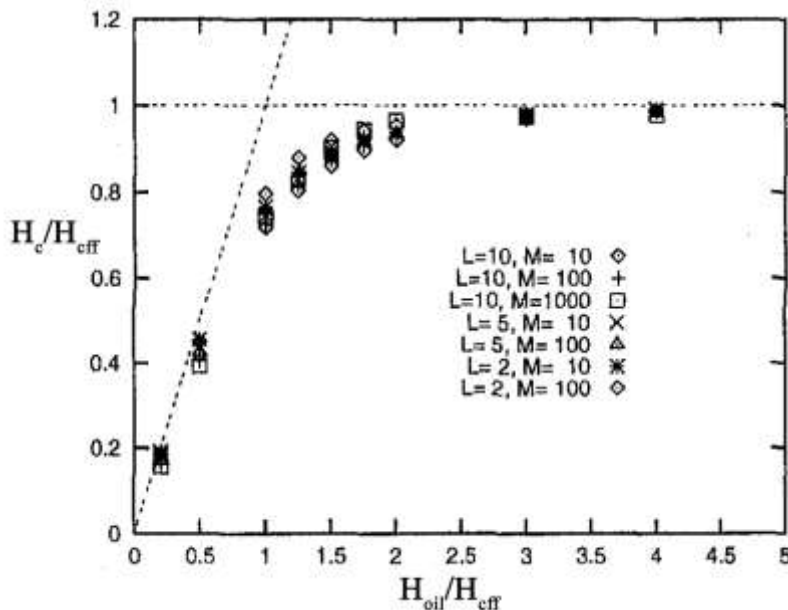


# Současný stav poznání - hladovění



Chevalier, F., Lubrecht, A.A., Cann, P.M.E., Colin, F. & Dalmaz, G. 1998, "Film thickness in starved EHL point contacts", Journal of Tribology.

73x citováno (60x ve WoK).



$$\mathcal{R} = \frac{r}{\gamma \sqrt{1+r\gamma}}$$

$\mathcal{R}$  - redukce tloušťky filmu ( $H_c/H_{\text{cff}}$ )

$\gamma$  - odpor pro bočnímu tečení

$r$  - relativní tloušťka filmu ( $H_{\text{oil}}/H_{\text{cff}}$ )

$H_{\text{oil}}$  - tloušťka filmu na vstupu

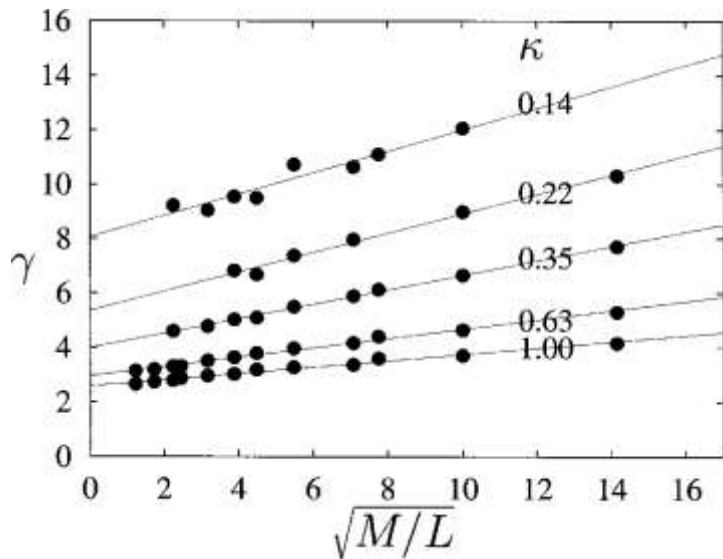
$H_{\text{cff}}$  - centrální tloušťka (plně zaplaveno)

$H_c$  - centrální tloušťka (hladovějící)

Shrnutí: Teoretická studie vlivu podmínek na vstupu na hladovění.

Damiens, B., Venner, C.H., Cann, P.M.E. & Lubrecht, A.A. 2004, "**Starved lubrication of elliptical EHD contacts**", Journal of Tribology.

33x citováno ve Scopusu.



$$\frac{\mathcal{R}}{r} = \frac{1}{\sqrt[n]{1 + r^\gamma}}$$

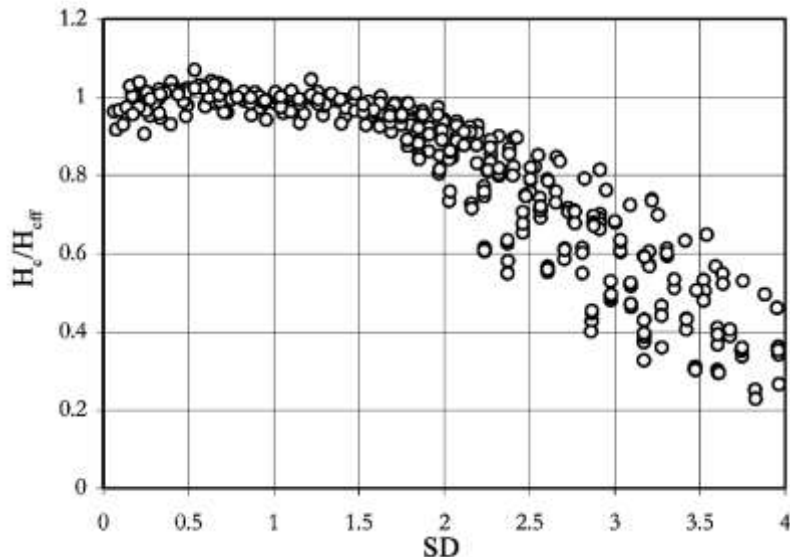
Redukce filmu mezi  
výstupem a vstupem

- $\mathcal{R}$  - redukce tloušťky filmu ( $H_c/H_{c\text{ff}}$ )
- $\gamma$  - odpor pro bočnímu tečení
- $r$  - relativní tloušťka filmu ( $H_{\text{oil}}/H_{\text{c\text{ff}}}$ )
- $\kappa$  - elipticita
- $n$  - počet průchodů

Shrnutí: Rozšíření předchozí práce o vliv  $\gamma$  na hladovění pro eliptické kontakty a studium snížení tloušťky filmu v závislosti na čase.

Cann, P.M.E., Damiens, B. & Lubrecht, A.A. 2004, "The transition between fully flooded and starved regimes in EHL", Tribology International.

30x citováno (25x ve WoK).



$$SD = \frac{\eta_0 u a'}{h_{oil\infty} \sigma_s}$$

$SD$  - Stupeň hladovění

$u$  - rychlost

$a'$  - šířka stopy

$\sigma_s$  - povrchové napětí

$h_{oil\infty}$  - množství mativa v blízkosti kontaktu

Shrnutí: Rozsáhlý výzkum vlivu několika parametrů na hladovění. Vliv  $h_{oil}$  je řešen pouze teoreticky bez ověření.

## Doplňování maziva

### Teoretické

#### Povrchové napětí

Chiu, Y. P. (1974), "An Analysis and Prediction of Lubricant Film Starvation in Rolling Contact Systems."

#### Van der Waalsovy síly

Jacod, B., Publier, F., Cann, P. M. E., and Lubrecht, A. A. (1998), "An Analysis of Track Replenishment Mechanisms in the Starved Regime."

Gershuni, L., Larson, M. G., and Lugt, P. M. (2008), "Replenishment in Rolling Bearings."

van Zoelen, M. T., Venner, C. H., and Lugt, P. M. (2008), "Free Surface Thin Layer Flow on Bearing Raceways."

### Experimentální

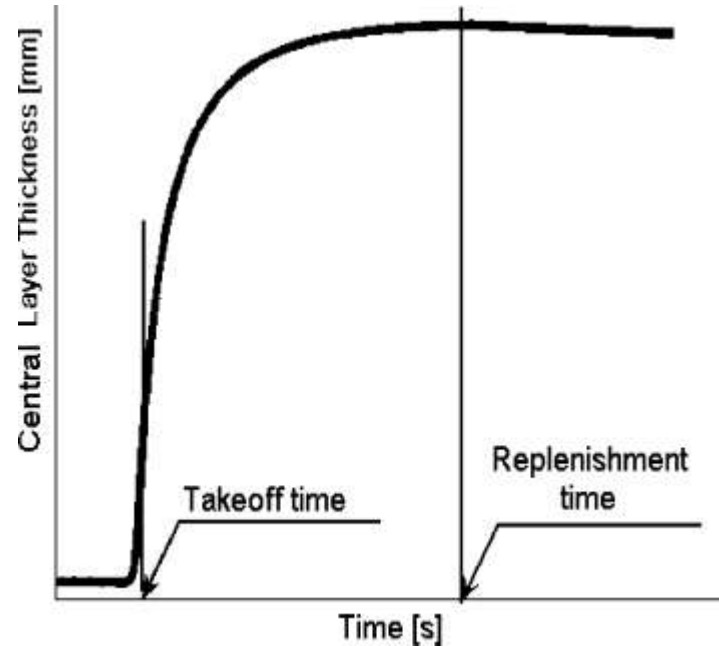
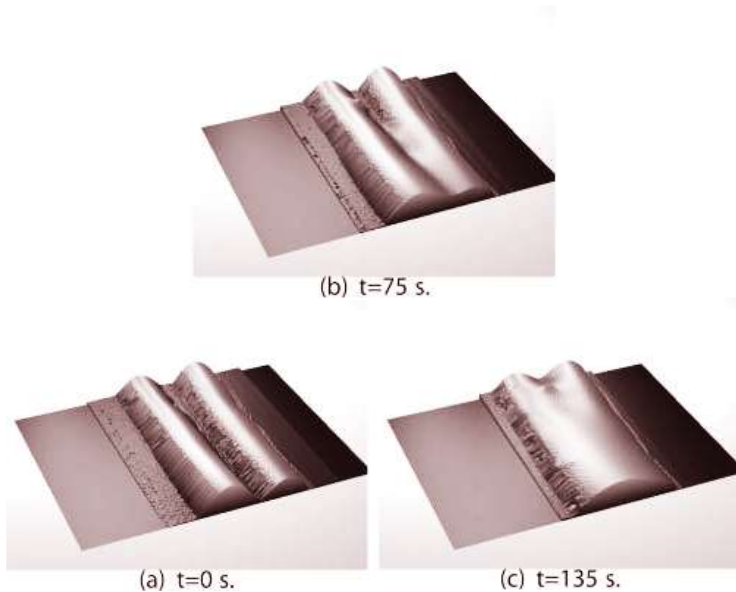
Pemberton, J., and Cameron, A. (1976), "A mechanism of Fluid Replenishment in Elastohydrodynamic Contacts."

#### Formování stopy v mazivu

Guangteng, G. and Spikes, H. A. (1996), "The Role of Surface Tension and Disjoining Pressure in Starved and Parched Lubrication."

Ali, F., Křupka, I. & Hartl, M. (2013), "Enhancing the parameters of starved EHL point conjunctions by artificially induced replenishment."

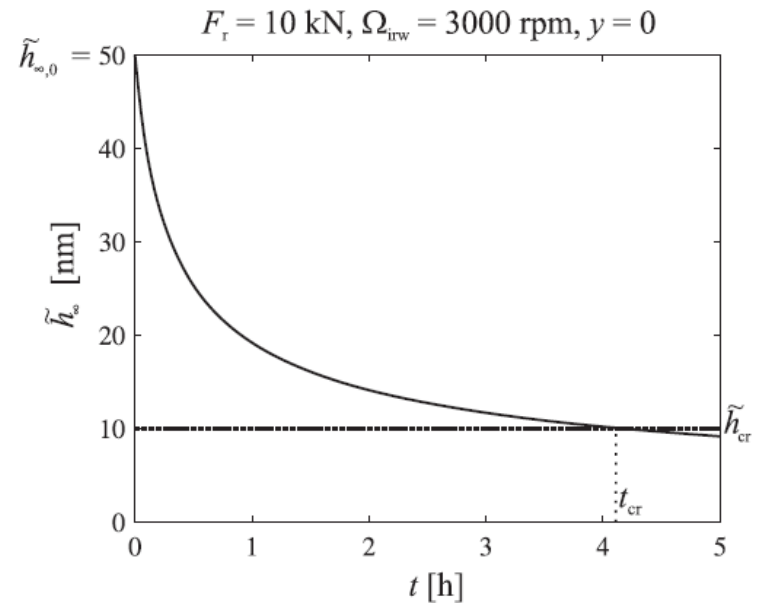
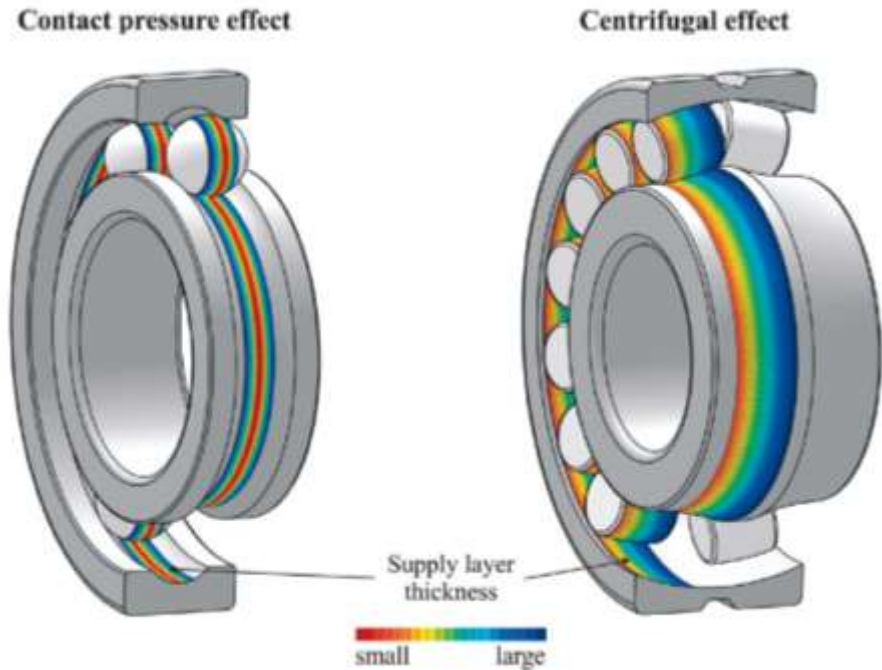
Gershuni L., Larson M.G., Lugt P., 2008. „Lubricant Replenishment in Rolling Bearing Contacts“, Tribology transaction.



Shrnutí: Teoretická studie procesu znovu-doplňování vytlačeného maziva do valivé dráhy  
Postrádá ověření kratších časů

# Současný stav poznání – doplňování maziva

M. T. van Zoelen, 2009. „Thin layer flow in rolling element bearings“. Ph. D. thesis, University of Twente, Netherlands.



*Predikovaná centrální tloušťka maziva jako funkce času pro soudečkové ložisko.*

Numerický model pro vícenásobný „reálný“ kontakt – zahrnuje vliv kontaktního tlaku a odstředivých sil. Postrádá experimentální ověření.

## Studium hladovějícího EHL kontaktu:

Vliv ... na $h_c$	Teoreticky	Experimentálně
Valivá rychlost	✓	✓
Viskozita/teplota	✓	✓
Zatížení	✓	✓
Množství maziva	✓	✓
Drsnost povrchů	✓	✓
Tloušťka filmu na vstupu	✓	✗

# Shrnutí poznatků obdržených na základě kritické rešerše

Lugt, P.M. & Morales-Espejel, G.E. 2011, "A review of elasto-hydrodynamic lubrication theory", *Tribology Transactions*, vol. 54, no. 3, pp. 470-496.

Chapter – Future developments

*on line contacts. Work on, for example, elliptical contacts is still missing.*

*The main problem in starved EHL is the input on the inlet oil layer thickness. This is generally not known and research on this must therefore be connected to a specific application. An exam-*

M. T. van Zoelen, 2009. „Thin layer flow in rolling element bearings“. Ph. D. thesis, University of Twente, Netherlands.

## 7.2 Recommendations for future research

*Several recommendations for future research can be made. For further validation of the present model:*

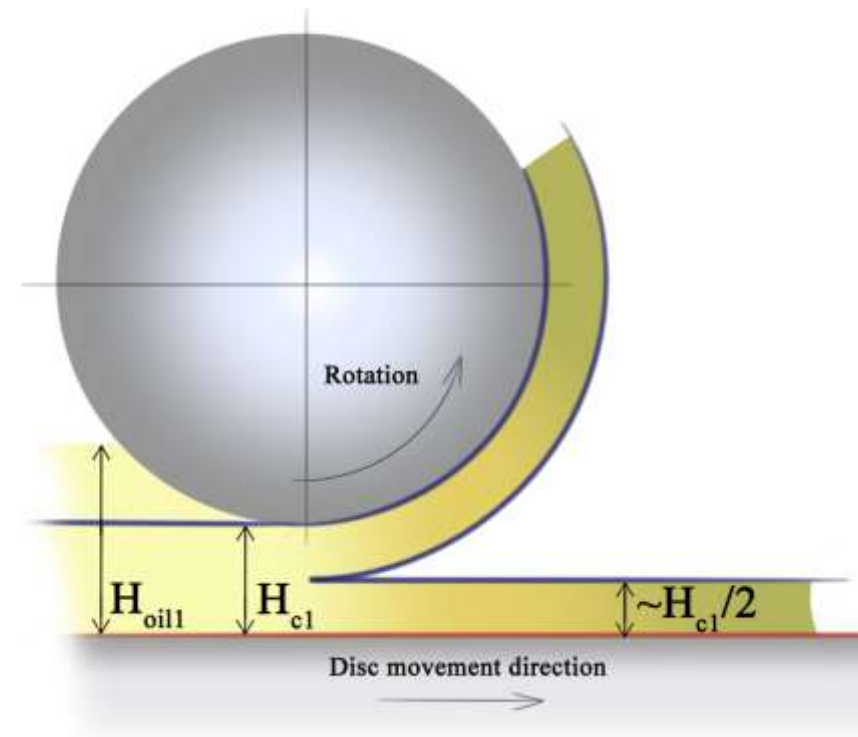
- Carry out film thickness measurements for a configuration with multiple EHL contacts. For these experiments a similar setup can be used as for the single contact case. A multiple contact setting can be obtained by pressing several rolling elements mounted in a circle against the glass disk. This is similar to the thrust bearing setup used in one of the classical studies on starved EHL contacts, i.e. the study by Wedeven et al. [70].*

## Hlavní cíl:

- Vliv tloušťky filmu na vstupu kontaktu ( $H_{oil}$ ) na centrální tloušťku ( $H_c$ ) a distribuci maziva.

## Dílčí cíle:

- Minimální množství maziva pro hladovění
- Studium procesů doplňování maziva
- Poměr tlouštěk vrstev na výstupu kontaktu



Q: Jaký je vliv  $H_{oil}$  na  $H_c$ ?

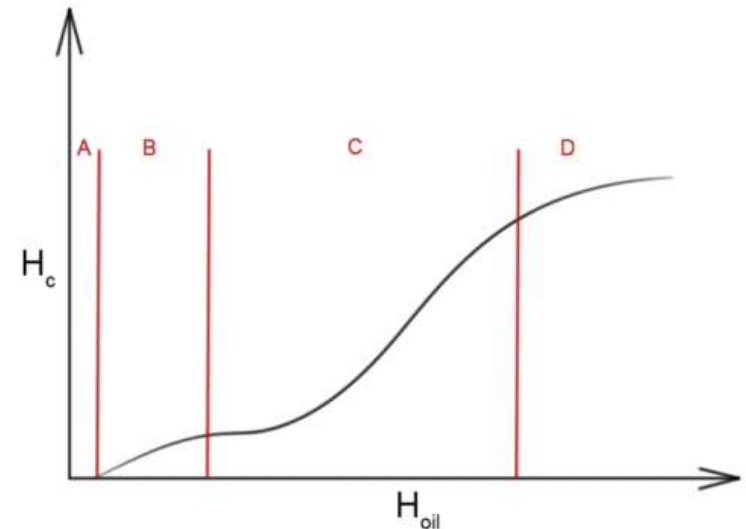
A: Kombinace několika poznatků:

**A)**  $H_{oil}$  blízké nule ( $<10$  nm) – suchý kontakt přecházející do mezného mazání. Oblast bez měřitelné tloušťky maziva – mazivo je zachyceno mezi povrchové nerovnosti a netvoří souvislý film.

**B)** Oblast mezného mazání přecházejícího přes smíšené až k hladovějícímu při zvyšování  $H_{oil}$

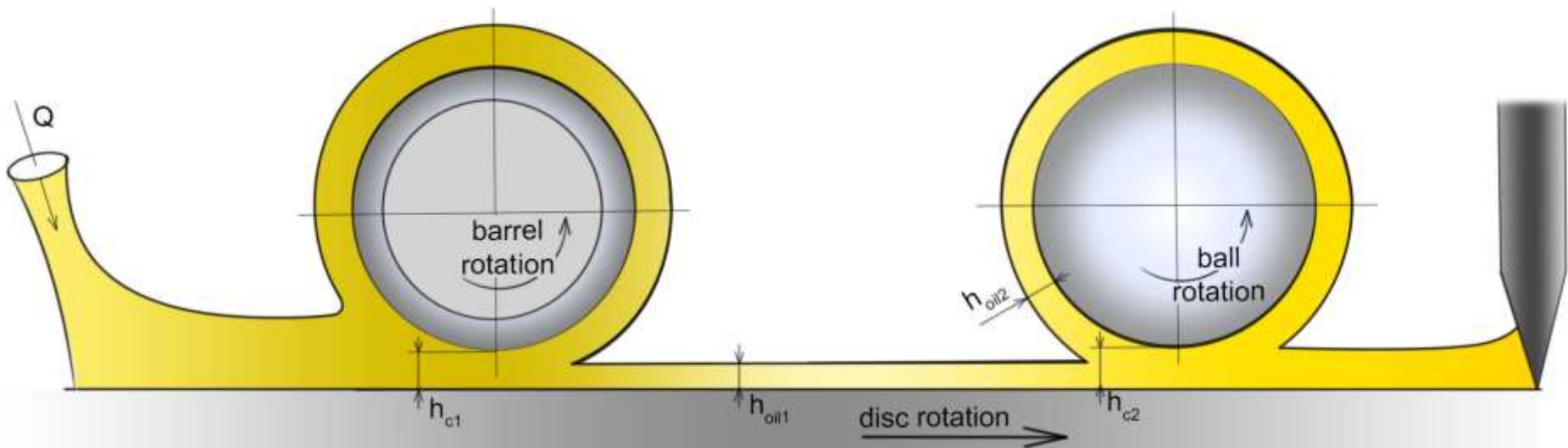
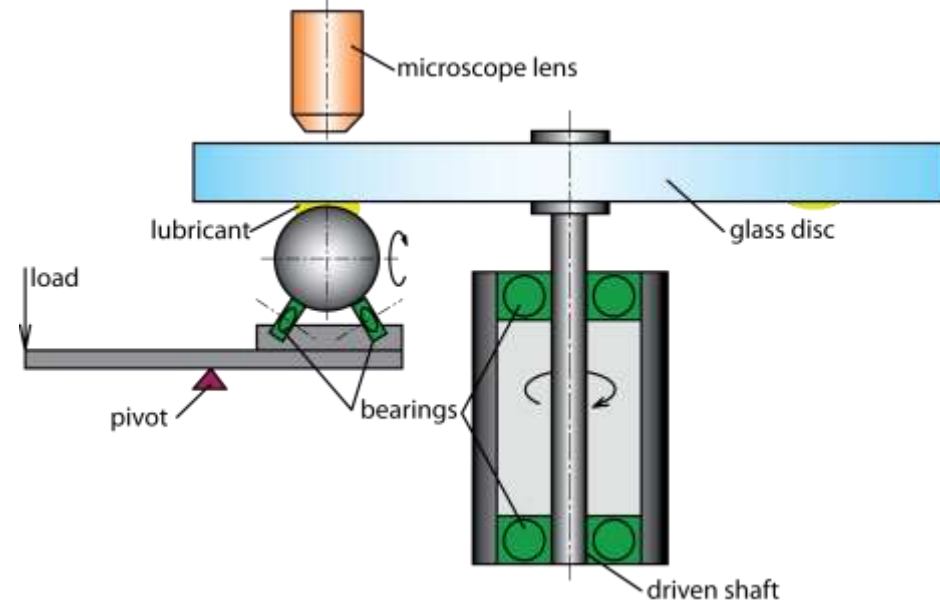
**C)** Oblast hladovějícího režimu. Vstupní meniskus se začíná vzdalovat od kontaktní oblasti a úroveň hladovění se snižuje.

**D)** Přesun do plně zaplaveného režimu mazání.



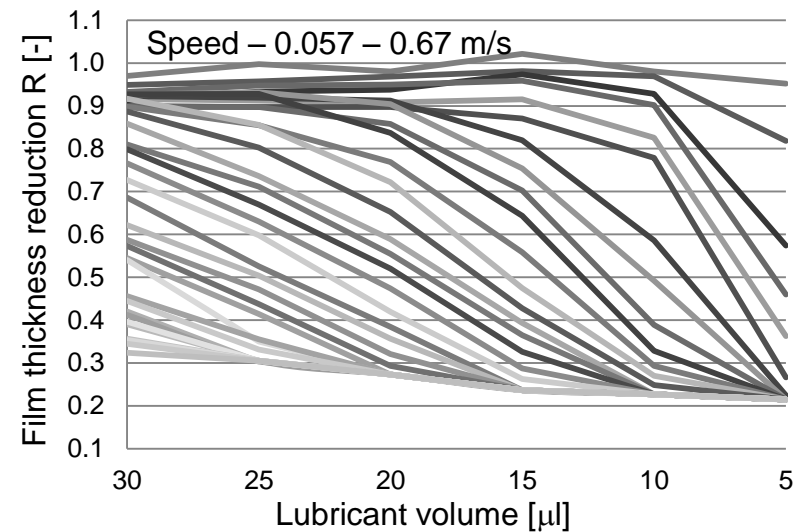
## Zařízení Ball<sup>2</sup> on Disc:

KOŠŤÁL, D. *Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 74 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.



# Současný stav disertační práce

- ✓ Summary of the current state of knowledge (Background)
- ✓ Method
- ✓ Experimental device
- ✓ Experiments with oil
- ✓ Minimum lubricant quantity
- ⚠ Division ratio
- ✗ Experiment designed for Zoelen's model and comparison
- ❓ Grease
- ❓ Roughness (Artificial / Real)



## Published results:

SVOBODA, P.; KOŠŤÁL, D.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. EXPERIMENTAL STUDY OF LUBRICATION FILM FORMATION IN MULTIPLE CONTACTS DEVICE UNDER STARVED CONDITIONS. In *Proceedings of the ASME/STLE 2012 International Joint Tribology Conference*. Denver, CO; United States, American Society of Mechanical Engineers, Tribology Division, TRIB. 2012. p. 233 - 235. ISBN 978-0-7918-4508-0.

SVOBODA, P.; KOŠŤÁL, D.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Experimental study of starved EHL contacts based on thickness of oil layer in the contact inlet. *Tribology International*. 2013. 67. p. 140 - 144. ISSN 0301-679X.

SVOBODA, P.; KOŠŤÁL, D.; POPELKA, M.; KŘUPKA, I. The experimental study of transition between fully flooded and starved regime in EHL contact. *Engineering Mechanics*. 2013. 20(1). p. 13 - 25. ISSN 1802-1484.

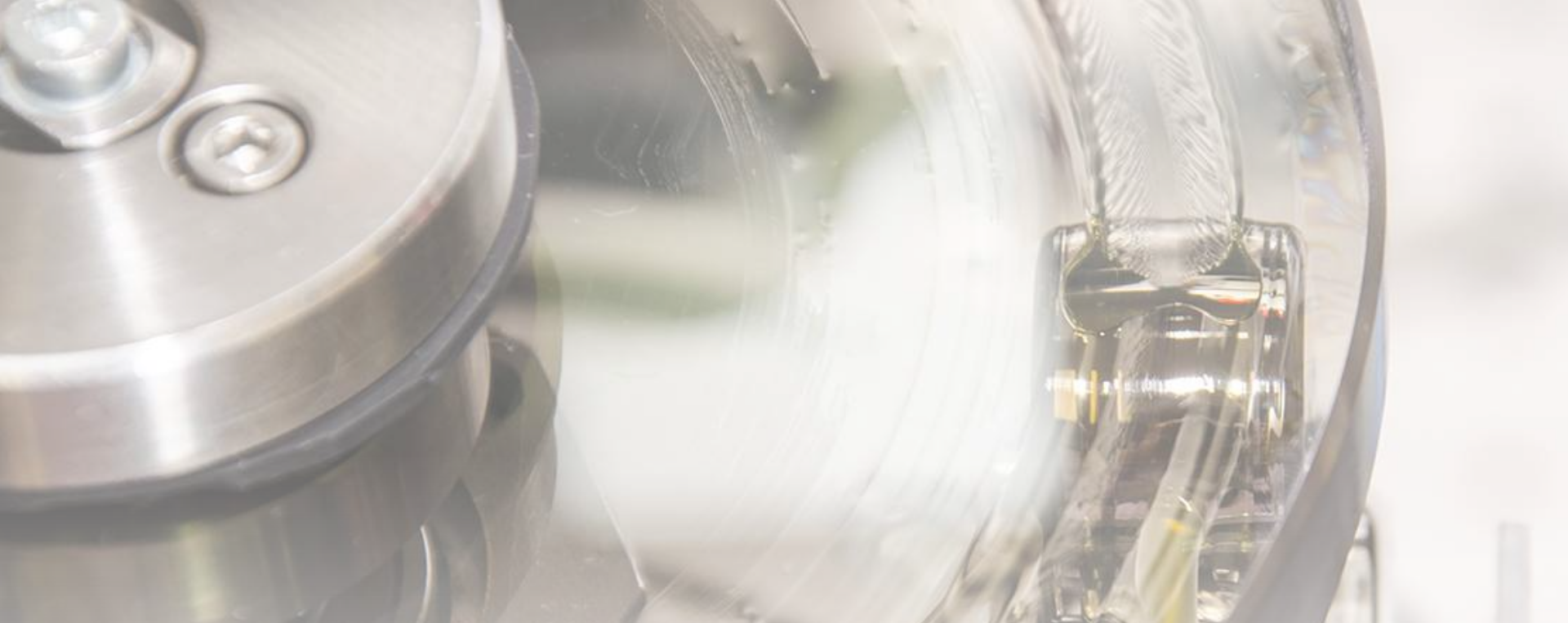
## Conferences:

STLE Annual meeting 2012 (St. Louis) - The Study of Lubrication Film Formation Under Starved Conditions

KČMS 2012 (Mikulov) - Lubrication film starvation on two element device

STLE Annual meeting 2013 (Detroit) - Influence of rolling elements distance on starvation

WTC 2013 (Torino) - Surface Roughness Effects in Starved EHL Contacts



**Ing. David Košťál**

**UK** ústav  
konstruování