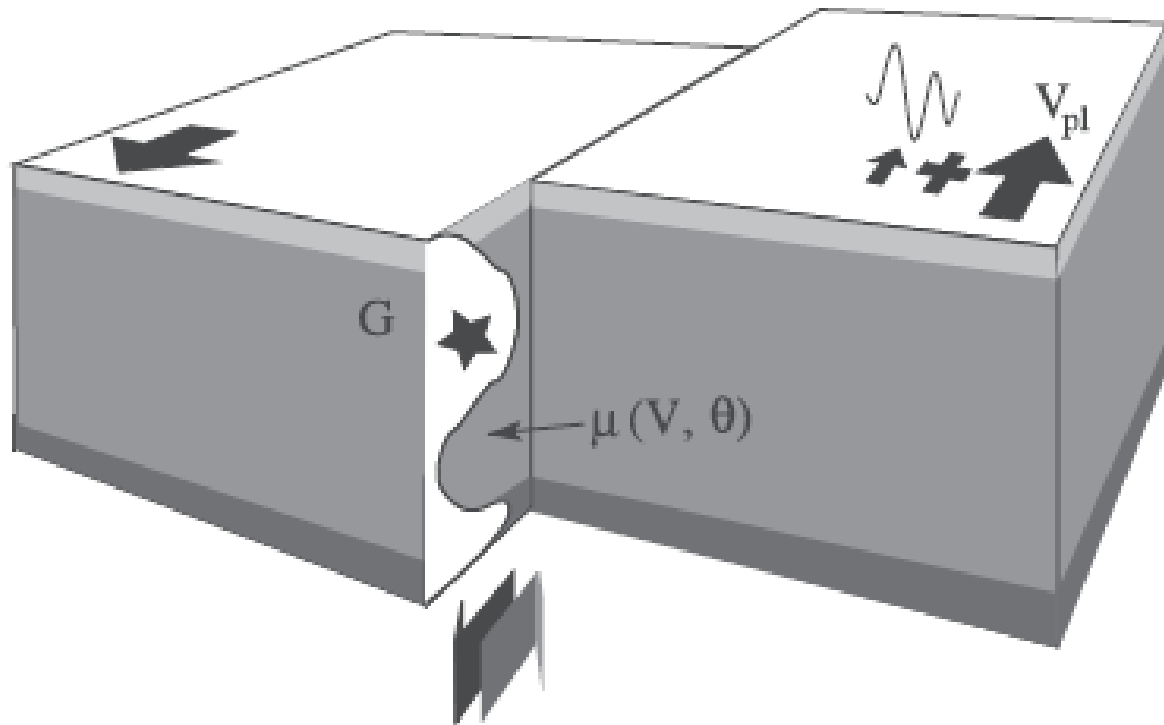


# **Tření jako (ne)aktivovaný proces:**

## **I. Úvod – empirie**

Ondřej Souček, František Gallovič

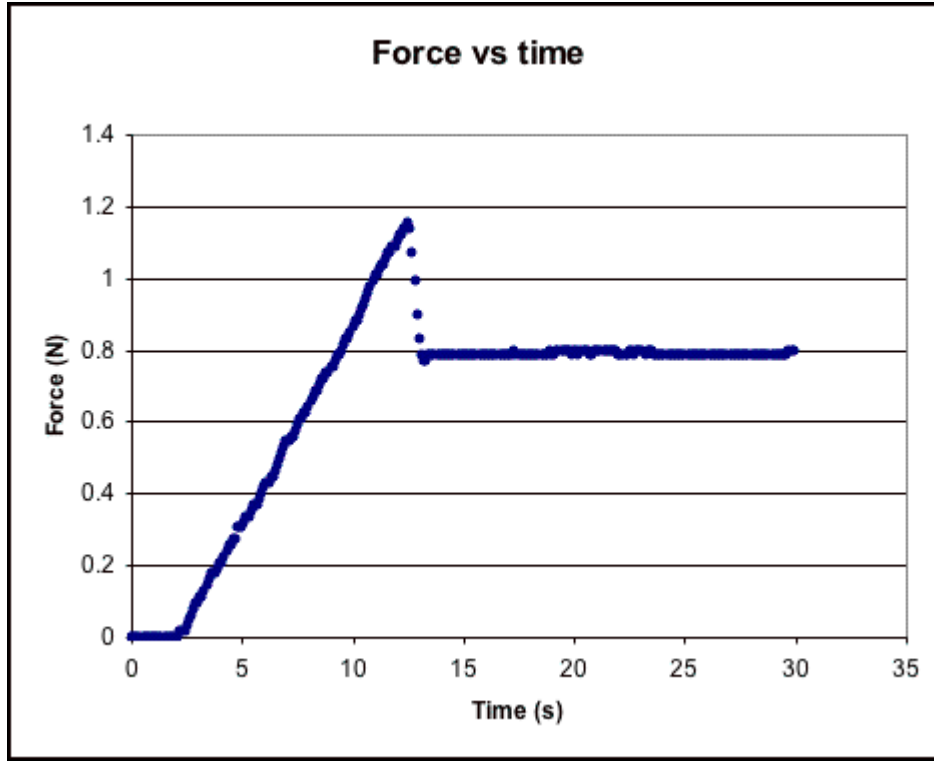
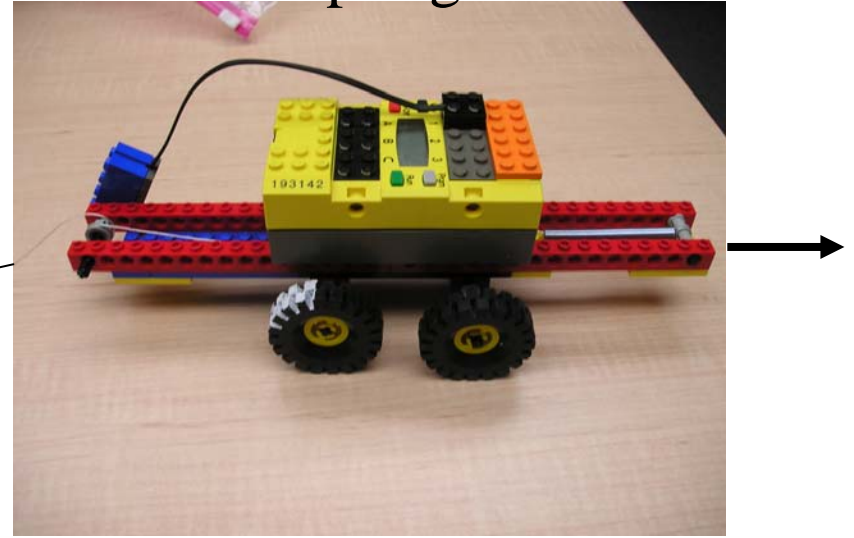


Ch. Marone (1998): Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 26: 643–96.

# Slider



# Spring

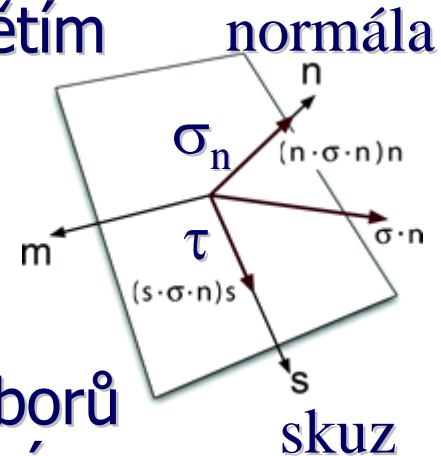




# Zákony tření na zlomu

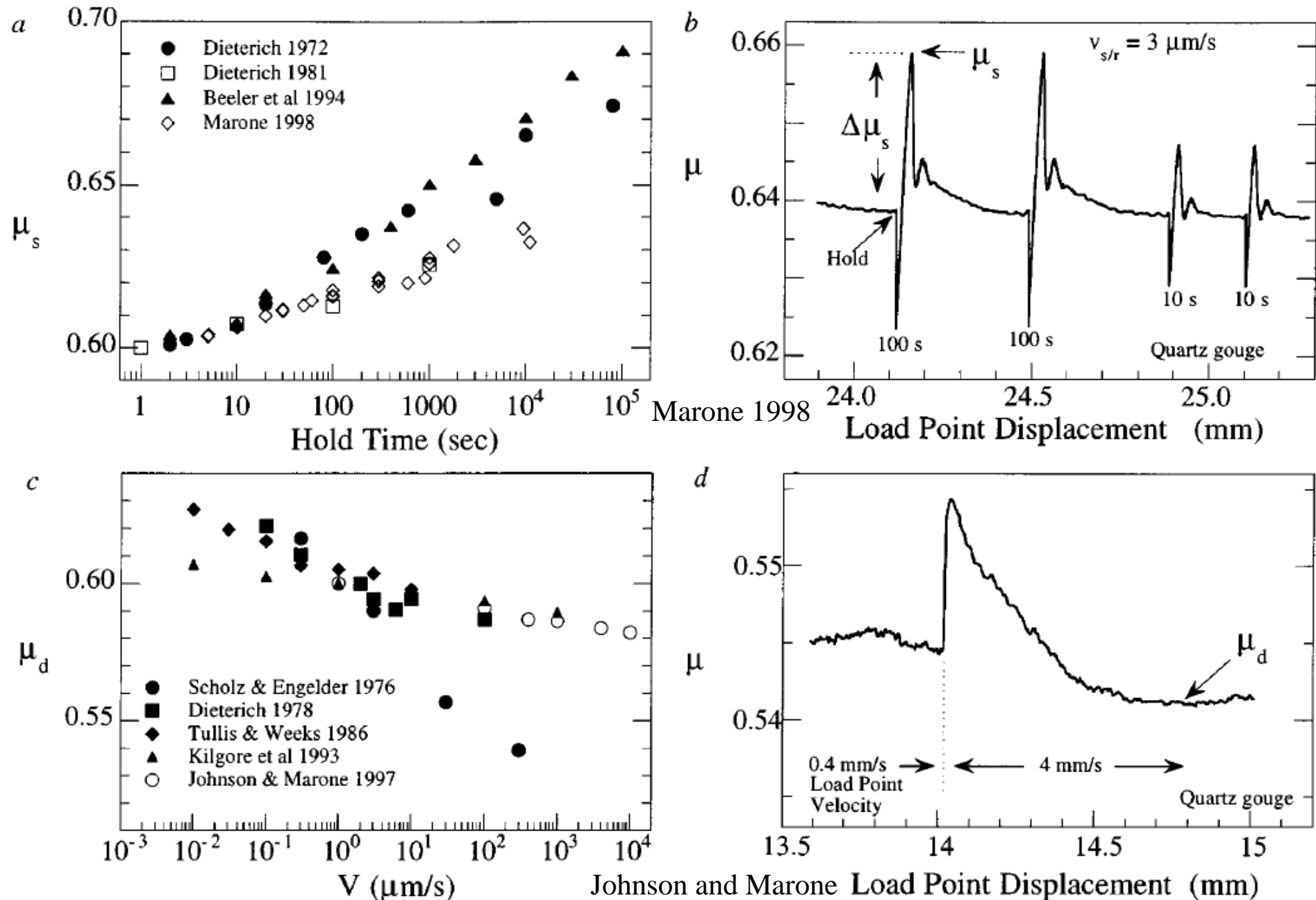
- Zákon tření obecně spojuje střížné napětí (trakci ve směru skluzu) na zlomu s normálovým napětím  $\sigma_n$  přes koeficient tření  $\mu$

$$\tau[t] \leq \sigma_n[t] \mu[\delta(t), v(t), \theta(t), T(t), p(t), d\sigma_n/dt, \dots]$$



- Na základě experimentů nebo teoretických rozborů jsou v literatuře formulovány různé zákony tření
  - Nejjednodušší je popis pomocí pouze statického a dynamického koef. tření
  - O něco složitější je koeficient tření klesající s narůstajícím skluzem (slip-weakening friction law) – často používaný pro modelování šíření trhliny
  - Ještě složitější: koeficient tření závislý na rychlosti skluzu a „stavu“ – vysvětluje časové změny pozorované v laboratoři

# Základní pozorování (spring-slider tests)



# Rate-and-state model

- Dieterich (1979), Ruina (1983)

$$\mu = \mu_0 + A \ln \left( \frac{V}{V_0} \right) + B \ln \left( \frac{V_0 \theta}{D_c} \right)$$

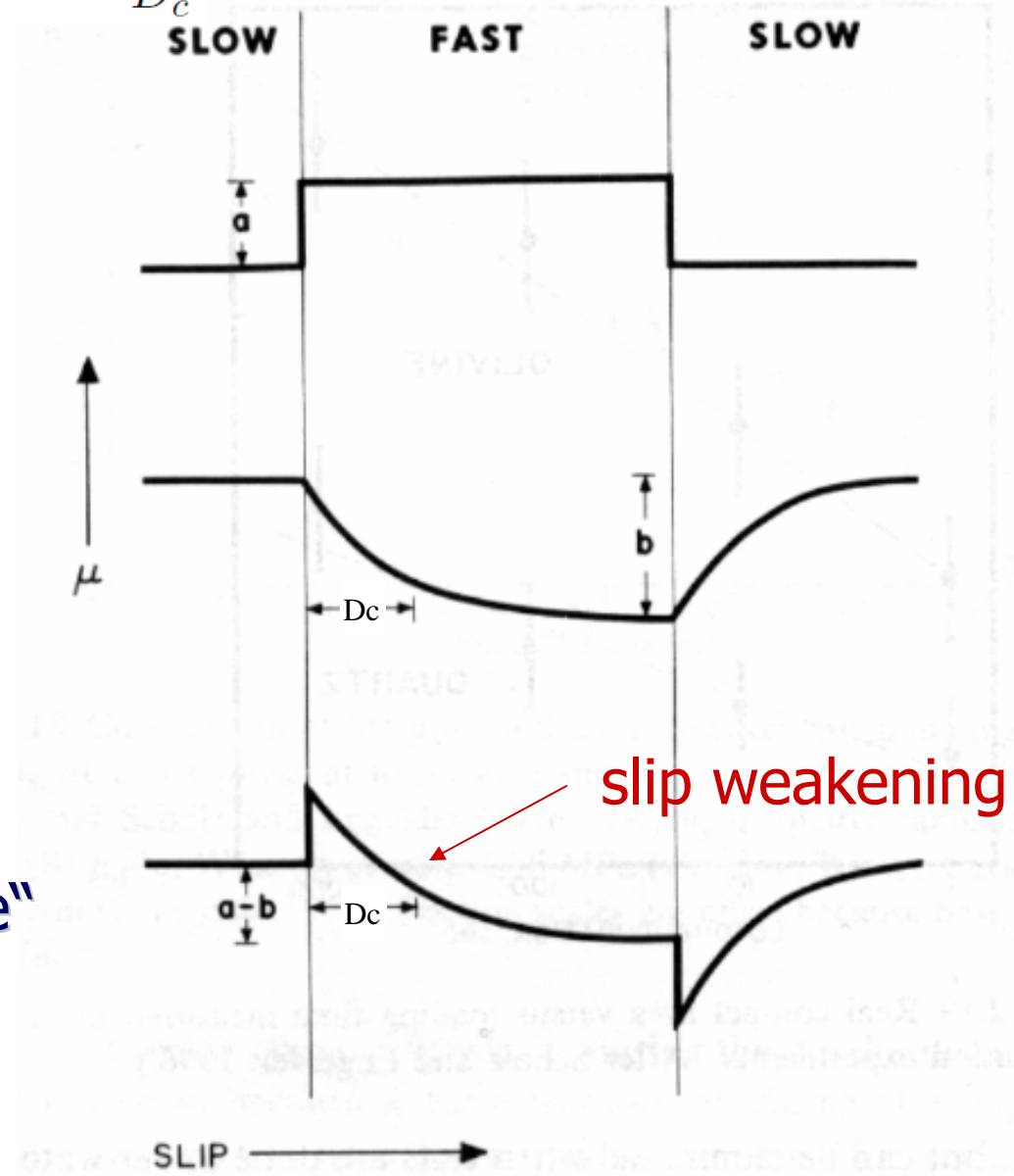
$$\dot{\theta} = 1 - \frac{V \theta}{D_c}$$

- Rozšíření o vliv změny normálového napětí (Linker & Dieterich, 1992)
- Regularizace pro rychlosti a stavovou veličinu viz. dále

# Analýza vlastností rate-and-state tření

$$\mu = \mu_0 + A \ln \left( \frac{V}{V_0} \right) + B \ln \left( \frac{V_0 \theta}{D_c} \right) \quad \dot{\theta} = 1 - \frac{V \theta}{D_c}$$

- Odezva části „rate“
- Odezva části „state“
- Odezva obou „rate“ i „state“ částí





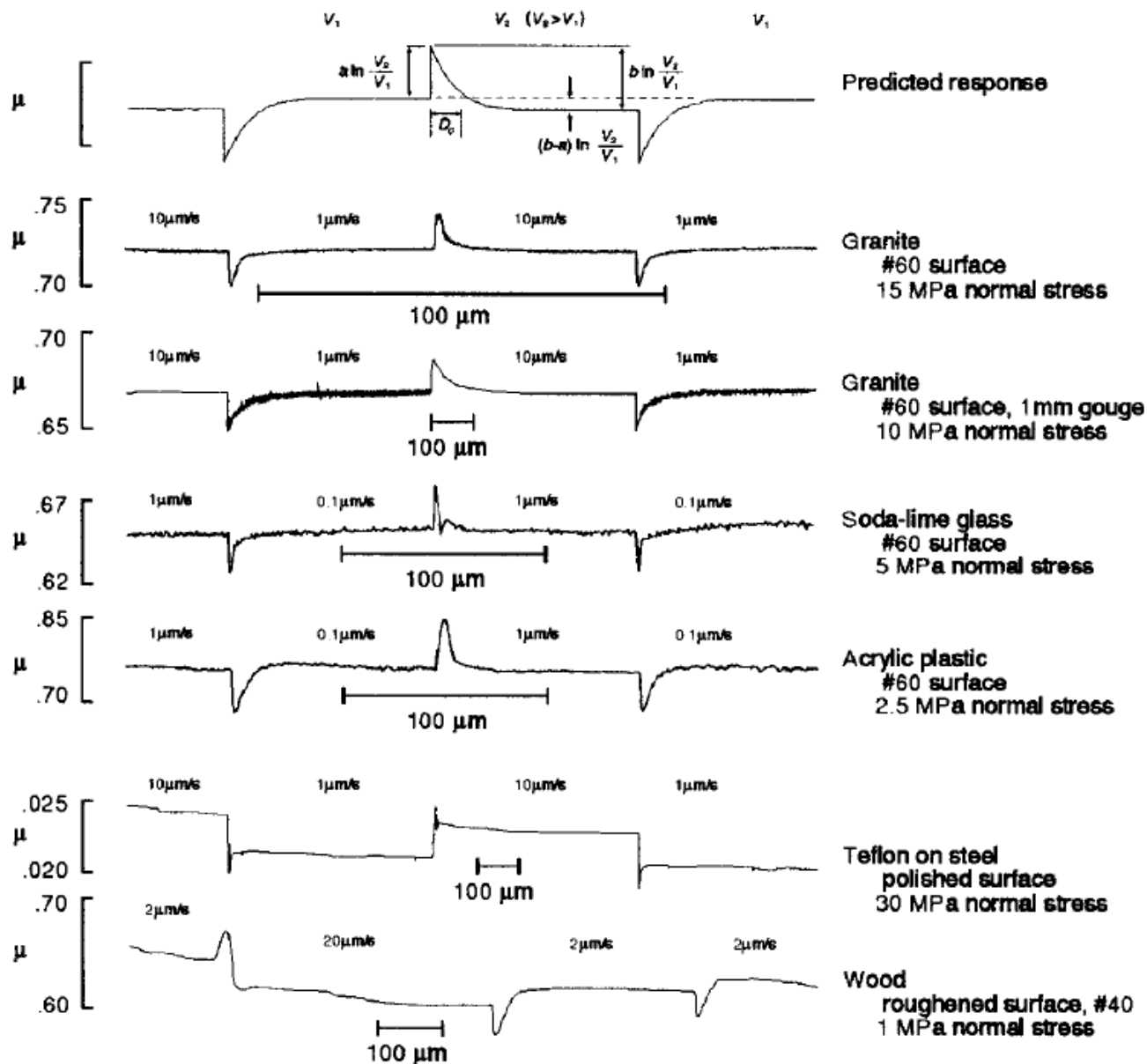


Figure 6 Friction behavior for a wide range of materials is shown for step changes in load point velocity (Dieterich & Kilgore 1994). The predicted response is that given by the rate and state friction laws. The data show remarkable similarity, indicating wide applicability of the rate and state friction formalism.

# Základní vlastnosti rate-and-state tření

$$\mu = \mu_0 + A \ln \left( \frac{V}{V_0} \right) + B \ln \left( \frac{V_0 \theta}{D_c} \right) \quad \dot{\theta} = 1 - \frac{V \theta}{D_c}$$

- Pokud držíme  $V \ll D_c/\theta$ , pak  $\theta \sim t$  ( $\Rightarrow$  „aging law“)
- Pokud  $A-B > 0$ , koeficient tření roste s rostoucí rychlostí – „velocity strengthening“, materiál pak vykazuje stabilní skluz, creep
- Pokud  $A-B < 0$ , koeficient tření klesá s rostoucí rychlostí – „velocity weakening“, materiál pak vykazuje nestabilitu, zemětřesení

# Co umožňuje rate-and-state model tření vysvětlit

- Vznik zemětřesení (Lapusta a Rice [2003], Rubin a Ampuero [2005]), šíření trhliny (chování podobné slip-weakening zákonu tření)
- Post-seismický a aseismický pohyb
- Trigrování zemětřesení:
  - Omoriho zákon (Dieterich [1994], Ziv and Rubin [2003])
  - Rozšiřování oblasti výskytu dotřesů (Kato [2007])
  - Vzájemné interakce zlomů
  - Vliv Coulombovského napětí na vývoj zlomu (Perfettini a kol. [2003], Gallovič [2008])

# Jezdec na pružince (spring-slider)

- Pohybová rovnice

$$\mu(t)\sigma = k(V_{pl}t - \pi(t)) - \frac{G}{2\beta}V(t) \quad (1)$$

- Koeficient tření a stavová rovnice

$$\mu(t) = \mu_0 + A \ln \left( \frac{V(t)}{V_0} \right) + B \ln \left( \frac{V_0 \theta(t)}{D_c} \right)$$

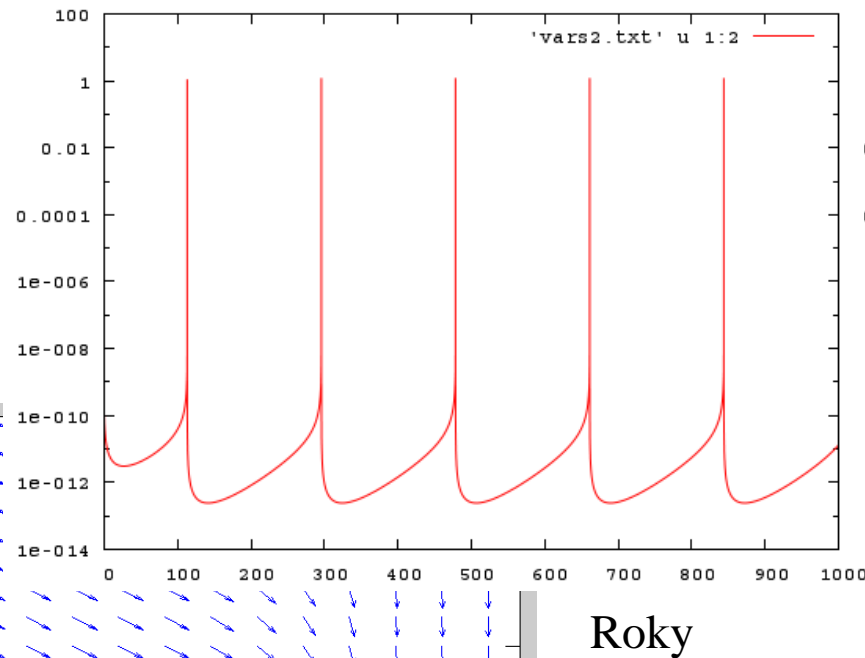
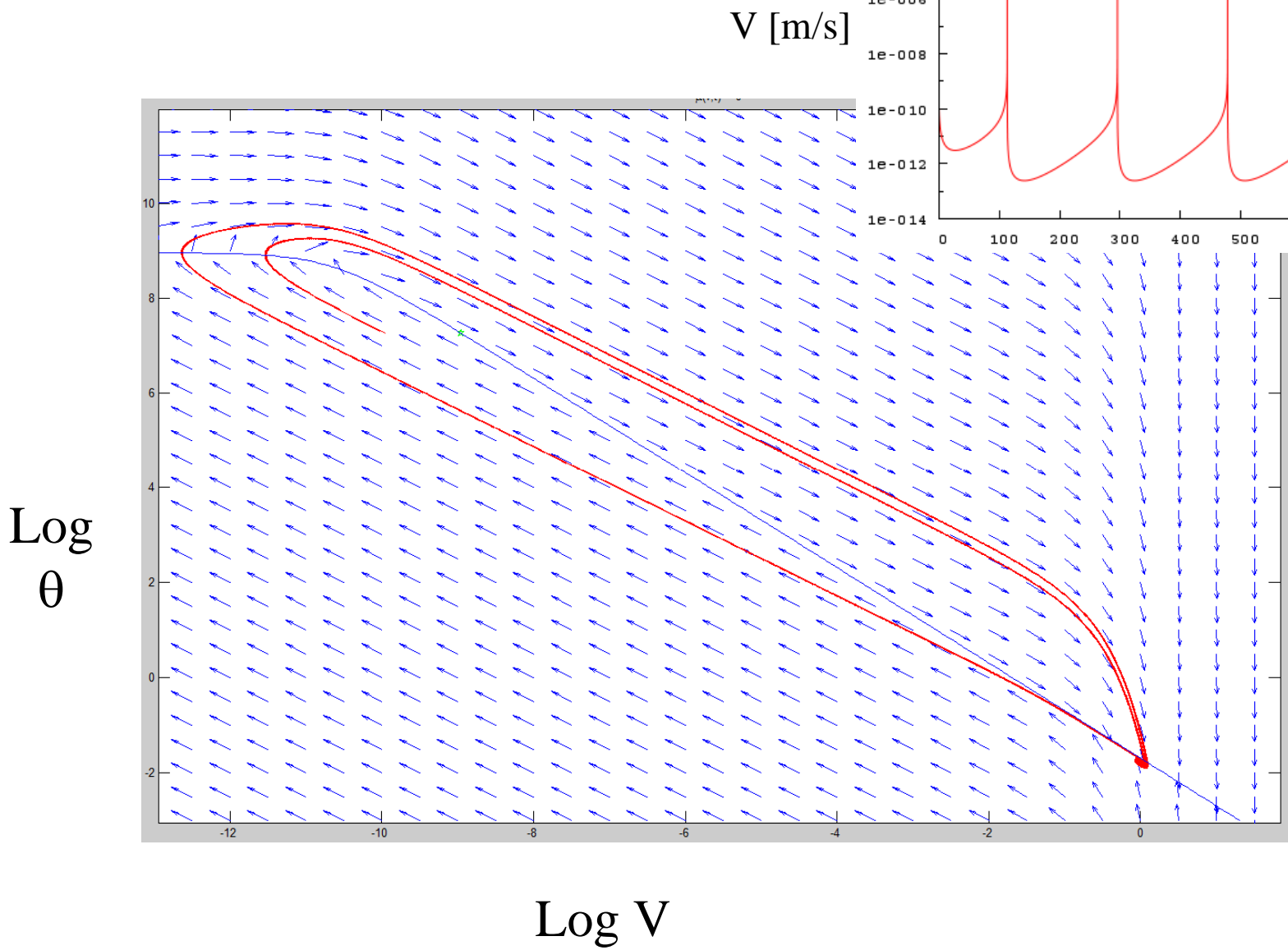
$$\dot{\theta}(t) = 1 - \frac{V(t)\theta(t)}{D_c}$$

- Diferencováním (1) dostáváme

$$\dot{V}(t) = \frac{k(V(t) - V_{pl}) - \sigma \frac{\partial \mu(t)}{\partial \theta} \left( 1 - \frac{V(t)\theta(t)}{D_c} \right)}{\sigma \frac{\partial \mu(t)}{\partial V} + \frac{G}{2\beta}}$$

- spolu se stavovou rovnicí můžeme integrovat metodou Runge-Kutta

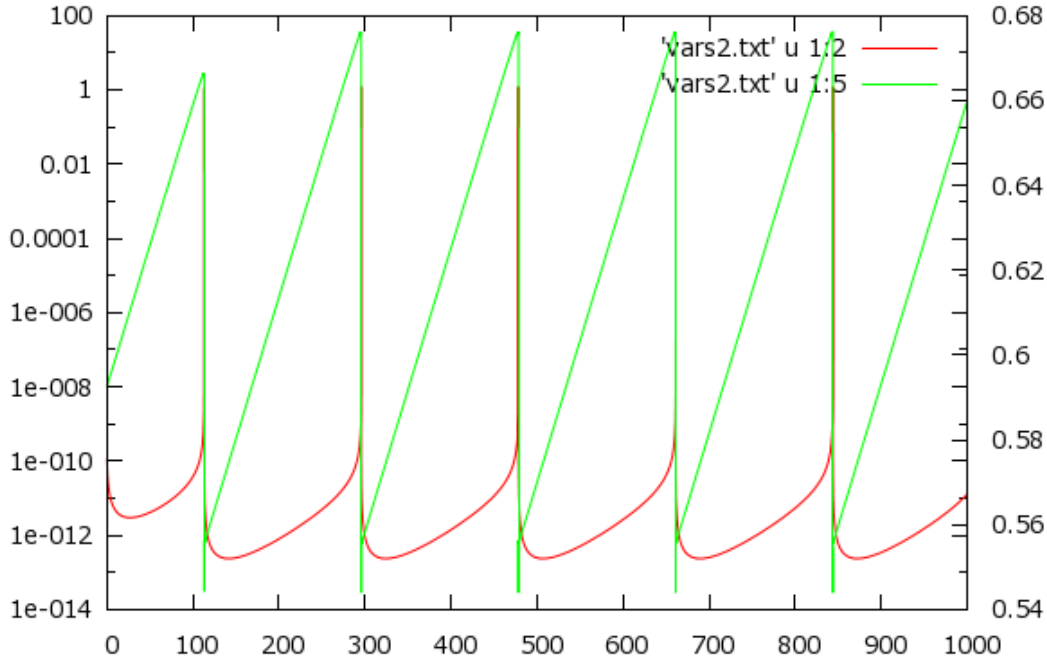
# Neregularizovaný model



$$k = \frac{1}{2\pi} \frac{G}{L}$$

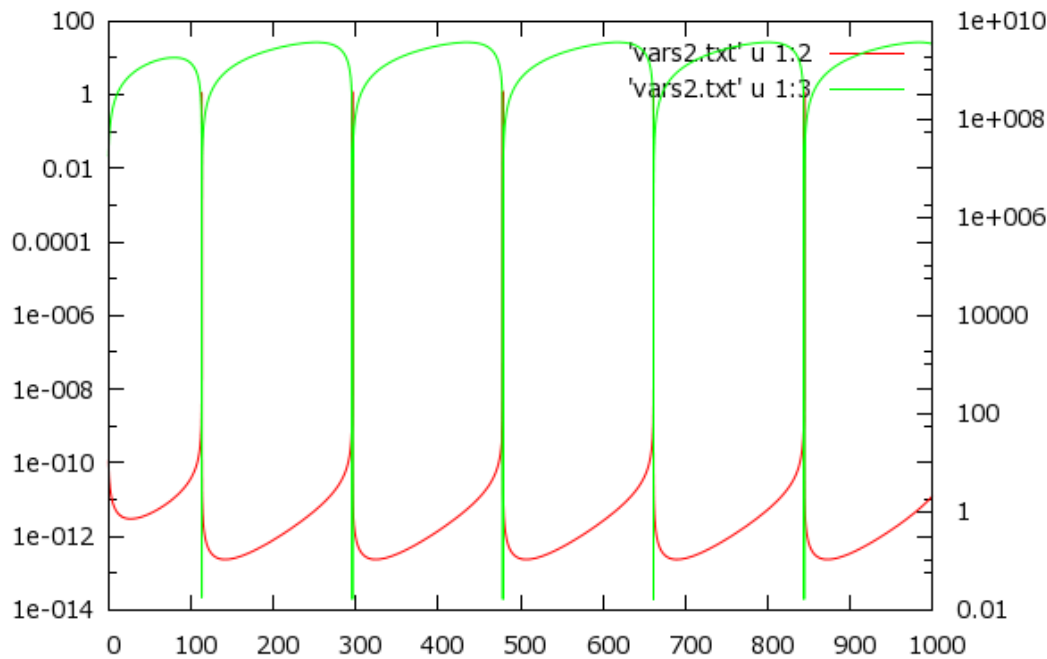
# Neregularizovaný model

V [m/s]



$\mu$

V [m/s]



$\theta$  [s]

Roky

# Co je sporné

- Teoretický vzorec dává pro nulovou rychlost skluzu nekonečna => regularizace
  - Perrin et al. [1995]

$$\mu(t) = \mu_0 + A \ln \left( \frac{V_0 + V(t)}{V_\infty + V(t)} \right) + B \ln \left( 1 + \theta(t) \frac{V_\infty - V_0}{D_C} \right)$$

$$\dot{\theta}(t) = 1 - \theta(t) \frac{V_0 + V(t)}{D_C}, \quad \begin{array}{l} 0 < V_0 < V_\infty \\ \theta \in \left( 0, \frac{D_C}{V_0} \right) \end{array}$$

- Aktivační kritérium

$$\mu(t)\sigma \leq k(V_{pl}t - \pi(t))$$

# Co je sporné

- Další přístup k regularizaci: Kaneko et al. [2008]

$$\begin{aligned}\mathcal{T} &= \psi(\dot{\delta}, \theta) \\ &= a\bar{\sigma} \operatorname{arcsinh} \left[ \frac{\dot{\delta}}{2\dot{\delta}_0} \exp \left( \frac{f_0 + b \ln(\dot{\delta}_0 \theta / L)}{a} \right) \right].\end{aligned}$$

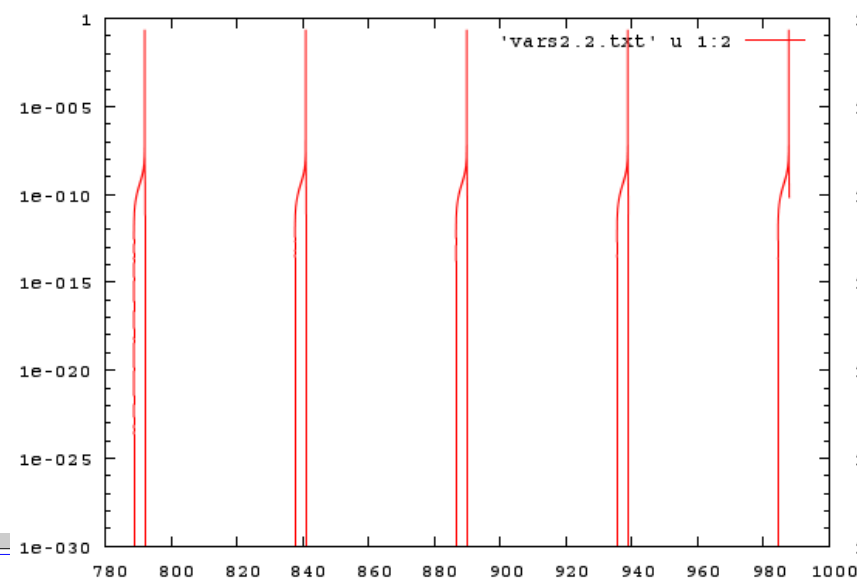
$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{\dot{\delta}\theta}{L}$$



# Regularizovaný model

$$\mu(t) = \mu_0 + A \ln \left( \frac{V_0 + V(t)}{V_\infty + V(t)} \right) + B \ln \left( 1 + \theta(t) \frac{V_\infty - V_0}{D_C} \right)$$

$$\dot{\theta}(t) = 1 - \theta(t) \frac{V_0 + V(t)}{D_C}$$

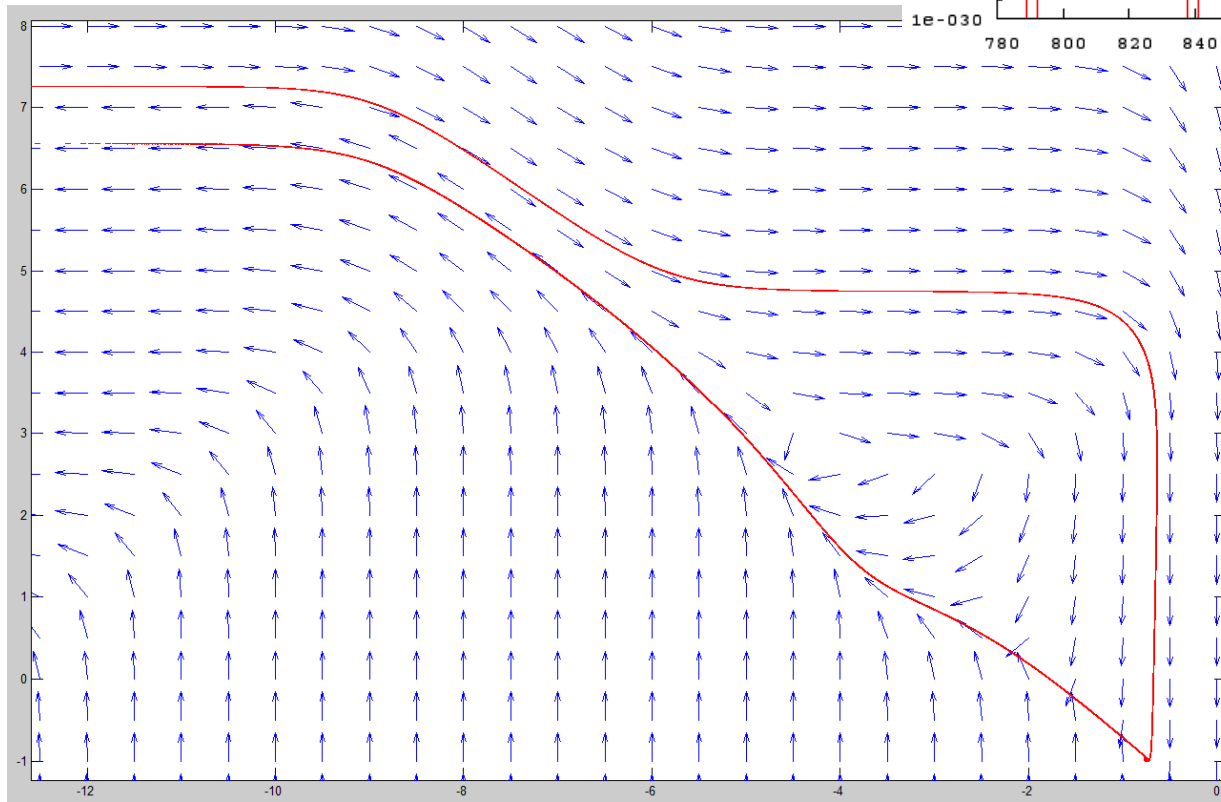


Roky

Modifikovaný R-K:

- pokud Runge-Kutta chce zápornou rychlost, zastav integraci  $dV/dt$
- Integruj pouze  $d\theta/dt$  dokud se nespění aktivační kritérium ( $\Rightarrow$  analytický vzorec dávající čas aktivace)
- Pokračuj Runge-Kuttu

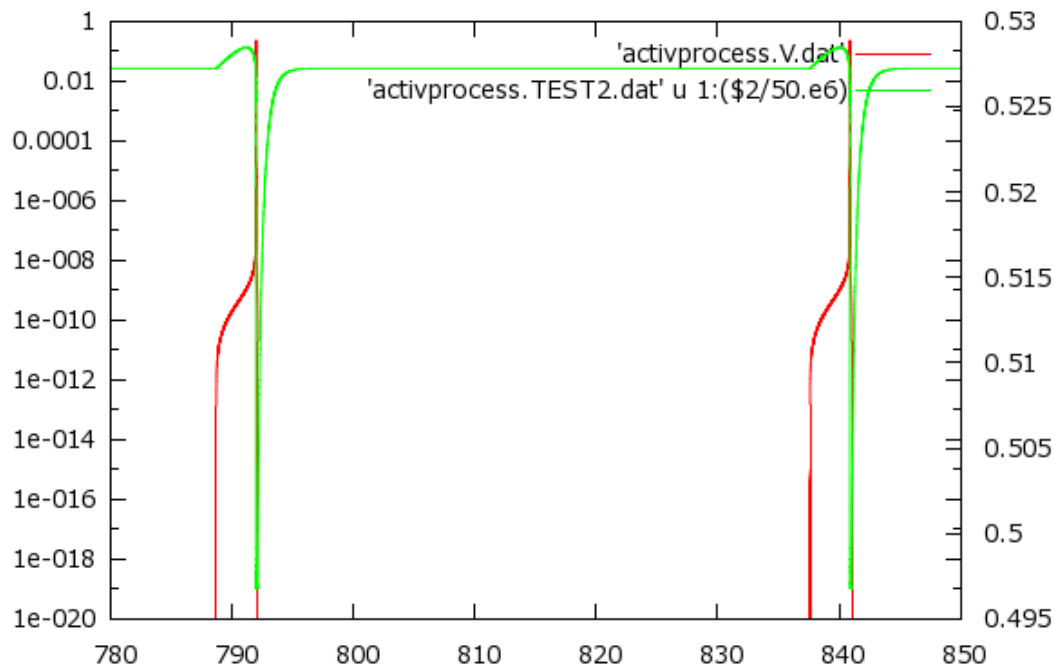
Log  
 $\theta$



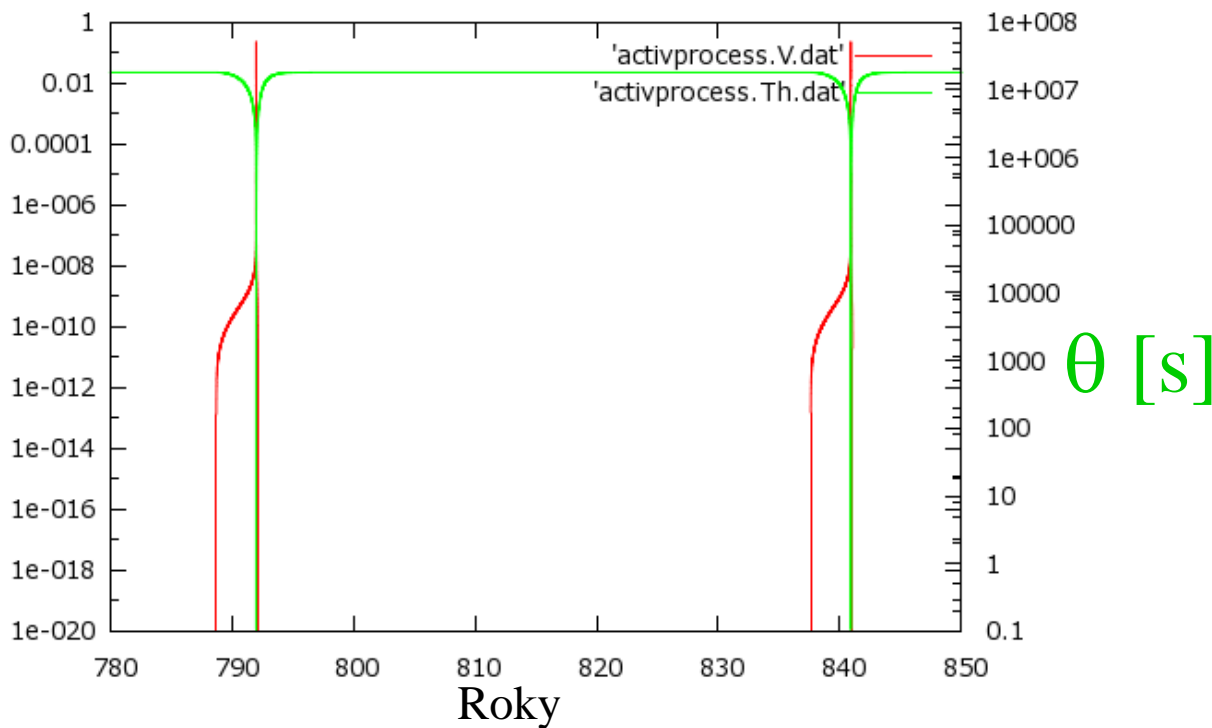
Log V

# Regularizovaný model

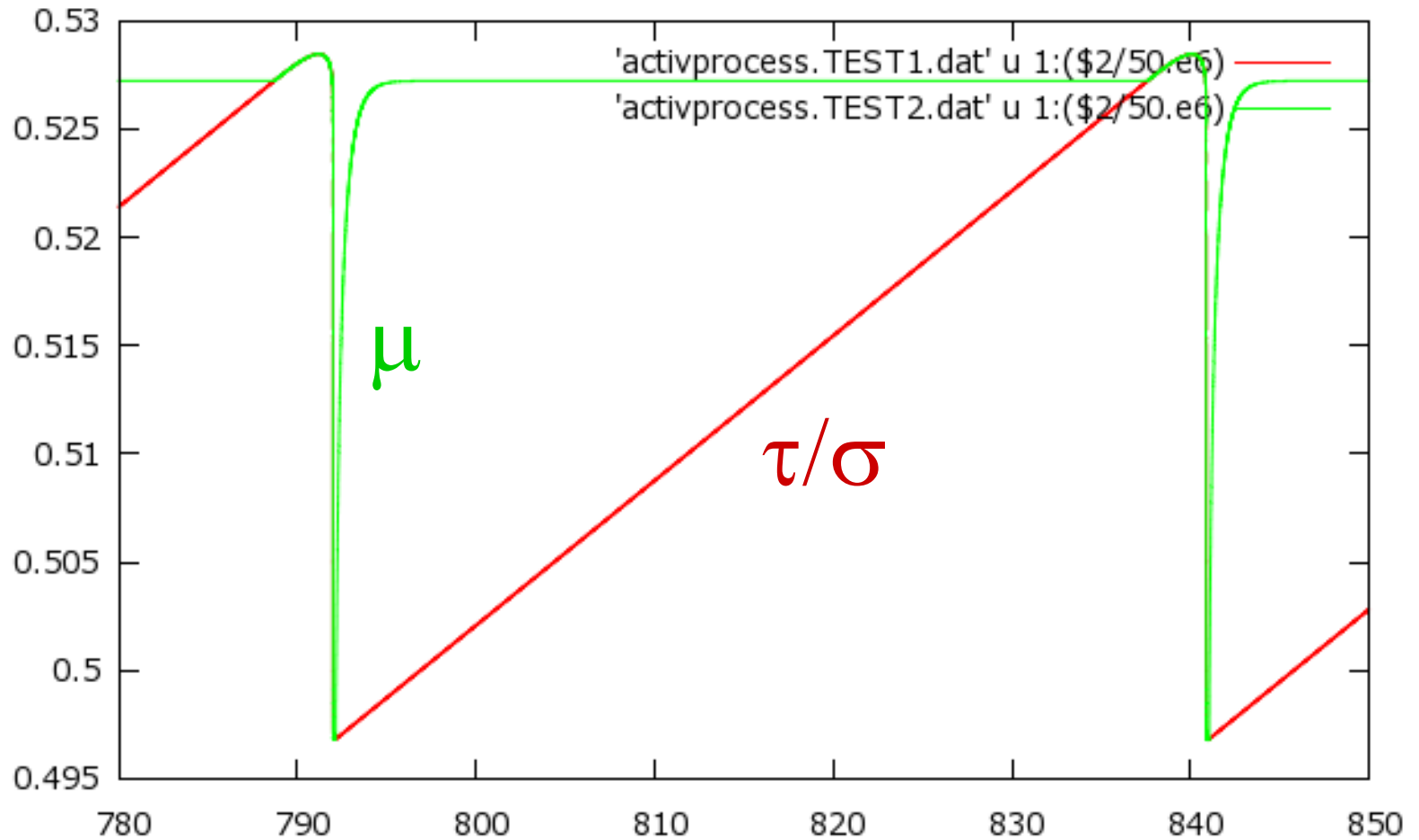
V [m/s]



V [m/s]

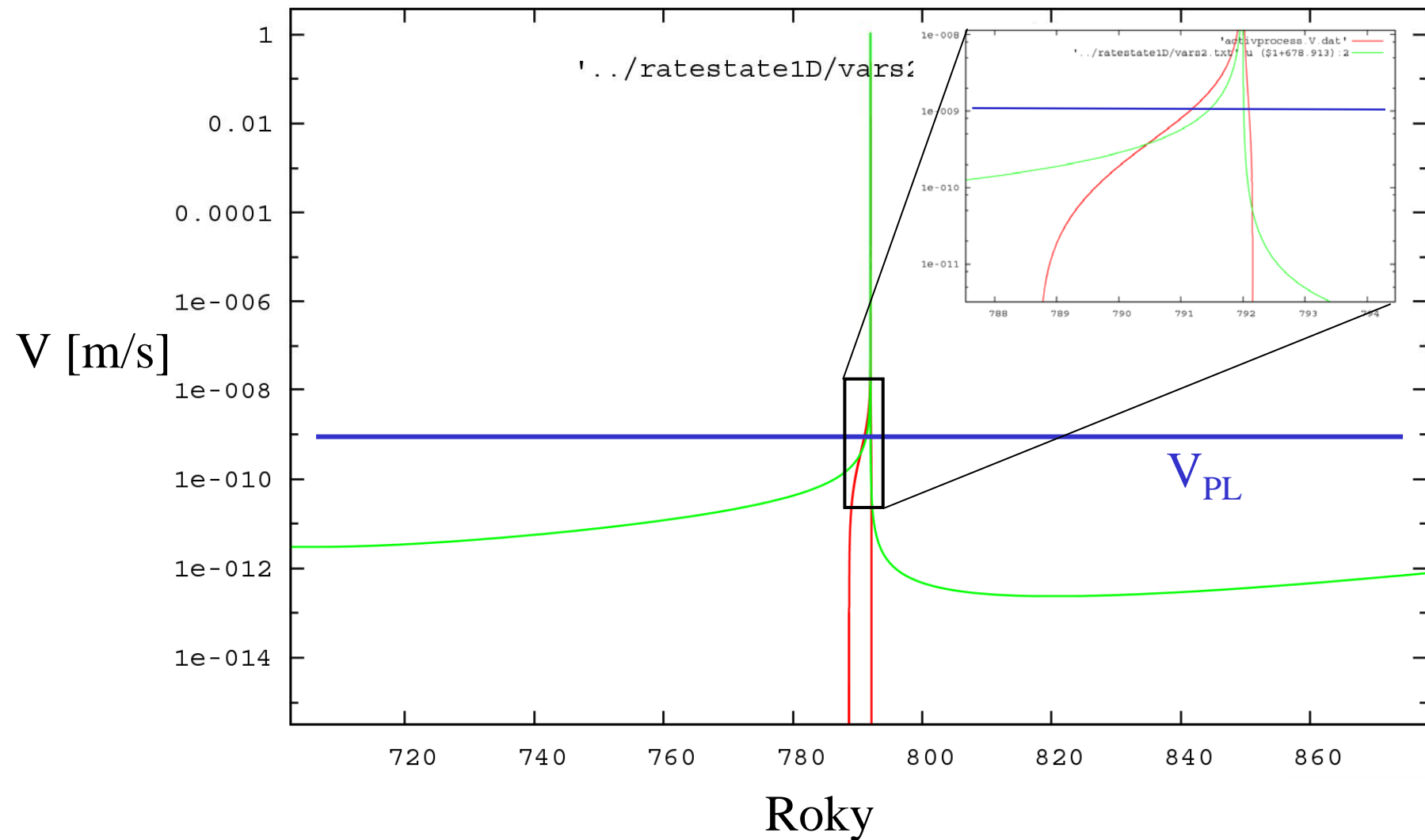


# Regularizovaný model



Roky

# Spring-slider **regularizovaný** nebo **neregularizovaný**



# Otazníky

- Aktivační mechanismus/kritérium (tj. nukleace zemětřesení)
- Spring-slider experimenty mají problém s kontrolou zastavení pohybujícího se bloku (napětí neklesá na nulu) – JE V EXPERIMENTECH VUBEC JEZDEC NEKDY ZASTAVENÝ?

