

# Subduktionsbenchmark – Status Bericht

## Motivation

Schmeling, Enns, Grigull, Gerya, Babeyko, Funiciello,  
Faccenna, van Hunen, Regenauer-Lieb

Dynamik der Subduktion?

Herausforderung:

Rheologie (viskos – elastisch – spröd)

Singularität am Trench (e.g. corner flow Modelle)

Freie Oberfläche

Slab Entkopplung

Geodynamik Workshop Sept 2002 an der ETH Zürich:  
Definition des Benchmarks

- Isothermaler kompositioneller viskoser Slab
- Rheologisch komplexer, thermo-mechanischer Slab

# Definition der Fälle

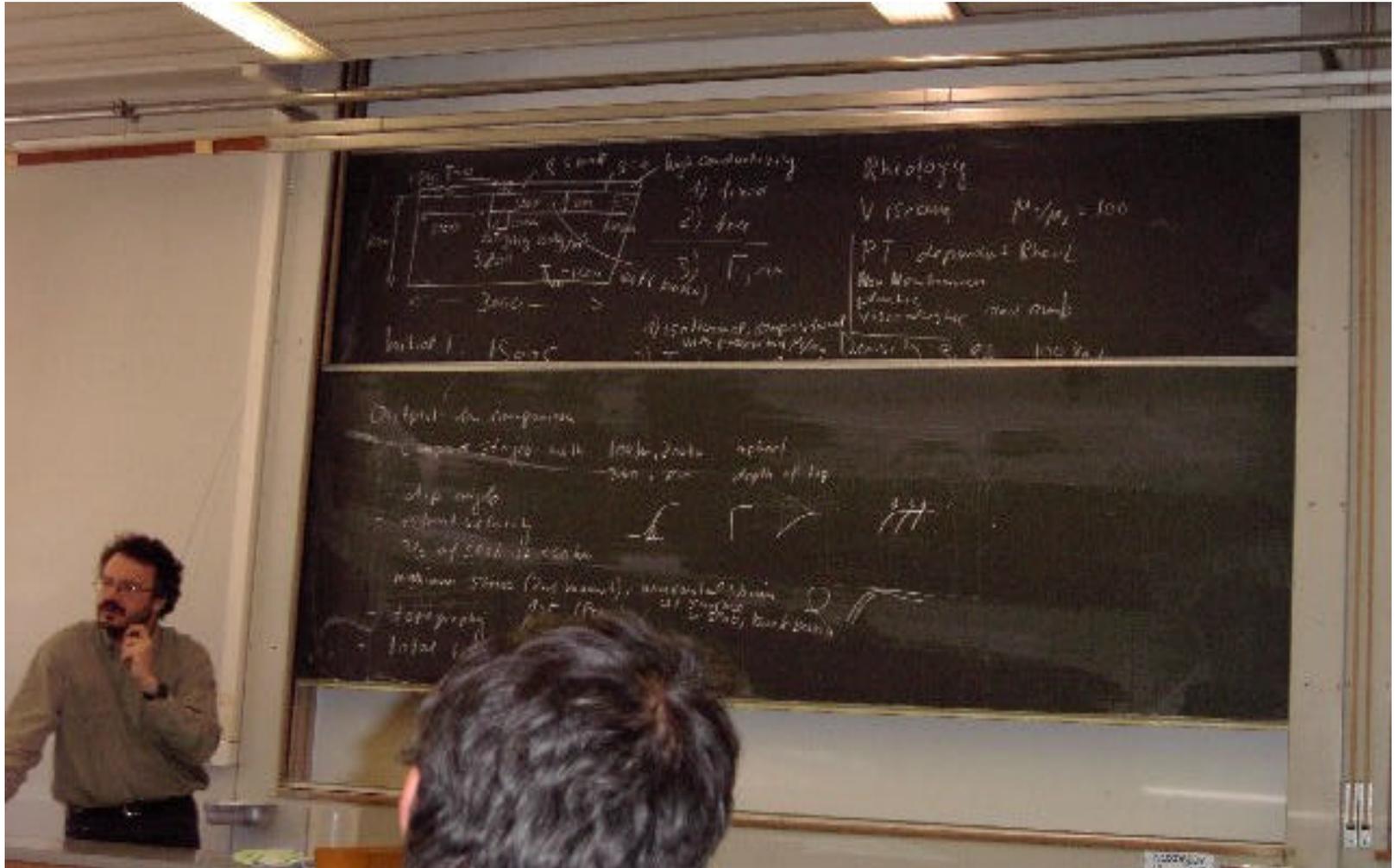


Photo by Ismail-Zadeh

# Definition Fall 1

„Weiche Schicht“:  $\rho = 0 \text{ kg/m}^3$

$\eta = \text{klein} (<10^{19} \text{ Pa s})$

„Freie Oberfläche“

$\rho = 3300 \text{ kg/m}^3$ ,  $\eta = 10^{23} \text{ Pa s}$

100 km

100 km

$\rho = 3200 \text{ kg/m}^3$

$\eta = 10^{21} \text{ Pa s}$

free slip

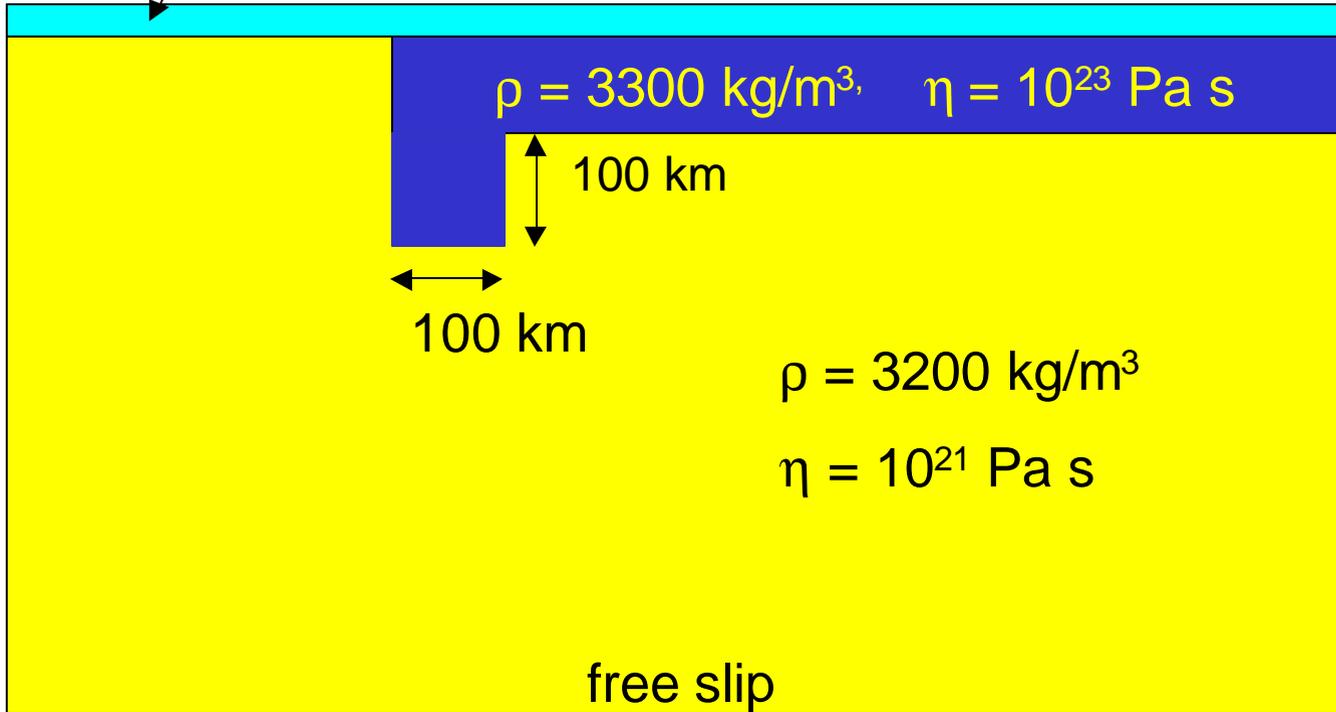
3000 km

100 km

reflektiv

reflektiv

700km



# Nach der Diskussion in Nizza Mai 04

„Weiche Schicht“:  $\rho = 0 \text{ kg/m}^3$

$\eta = 10^{19}, 10^{20}, 10^{21} \text{ Pa s}$

„Freie Oberfläche“

50 km

$\rho = 3300 \text{ kg/m}^3, \eta = 10^{23} \text{ Pa s}$

100 km

100 km

100 km

$\rho = 3200 \text{ kg/m}^3$

$\eta = 10^{21} \text{ Pa s}$

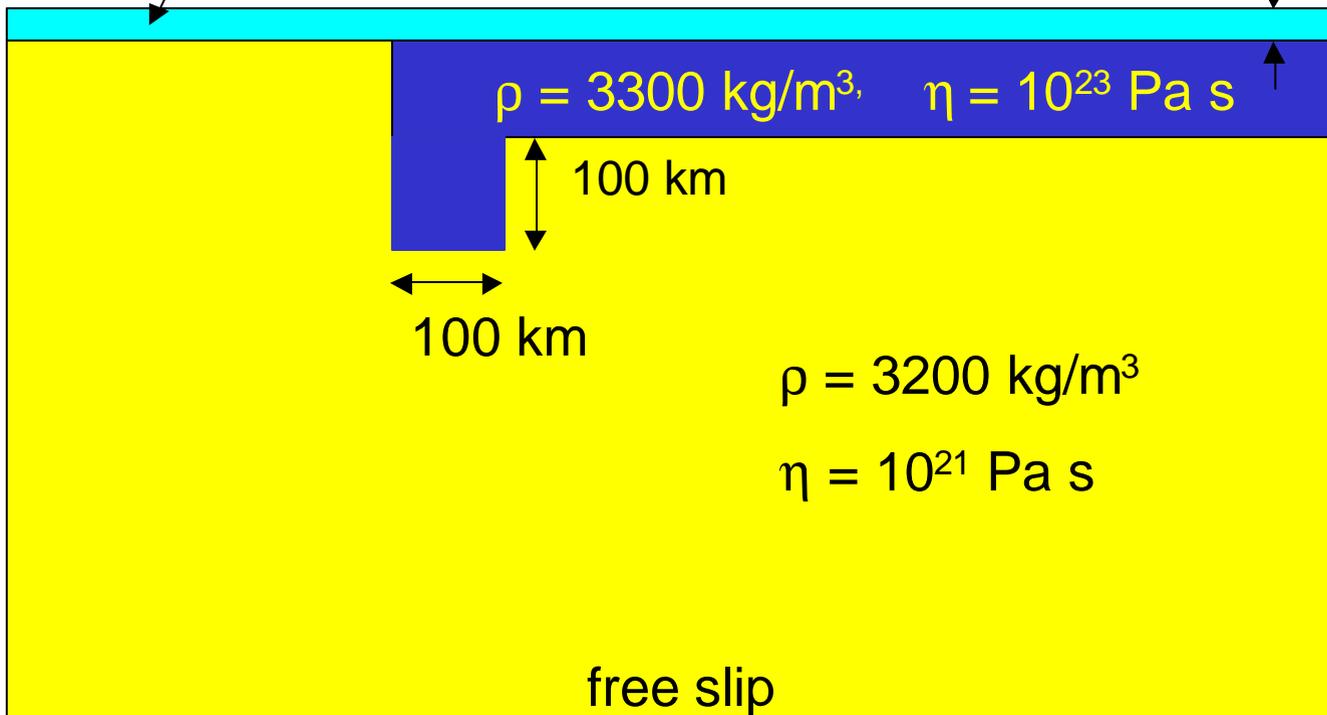
reflektiv

reflektiv

free slip

3000 km

700 km



# Die Gleichungen

## Rein viskose, kompositionelle Strömung

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$$

Conservation of mass

$$-\vec{\nabla}P + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mathbf{h} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] - \mathbf{r}g\vec{e}_3 = 0$$

Conservation of momentum

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}C = 0$$

Conservation of composition

# Codes & Experimente

**FDCON** (Schmeling, Enns, Grigull):

FD, Stromfunktionsansatz, Marker Technik

**I2VIS** (Gerya):

FD, primitive Variablen, Marker Technik

**FLAC-basierter code** (Babeyko):

FE, Marker basiert explizit Lagrangian, freie Oberfläche, remeshing, visko-elastisch

**CITCOM** (van Hunen, Moresi):

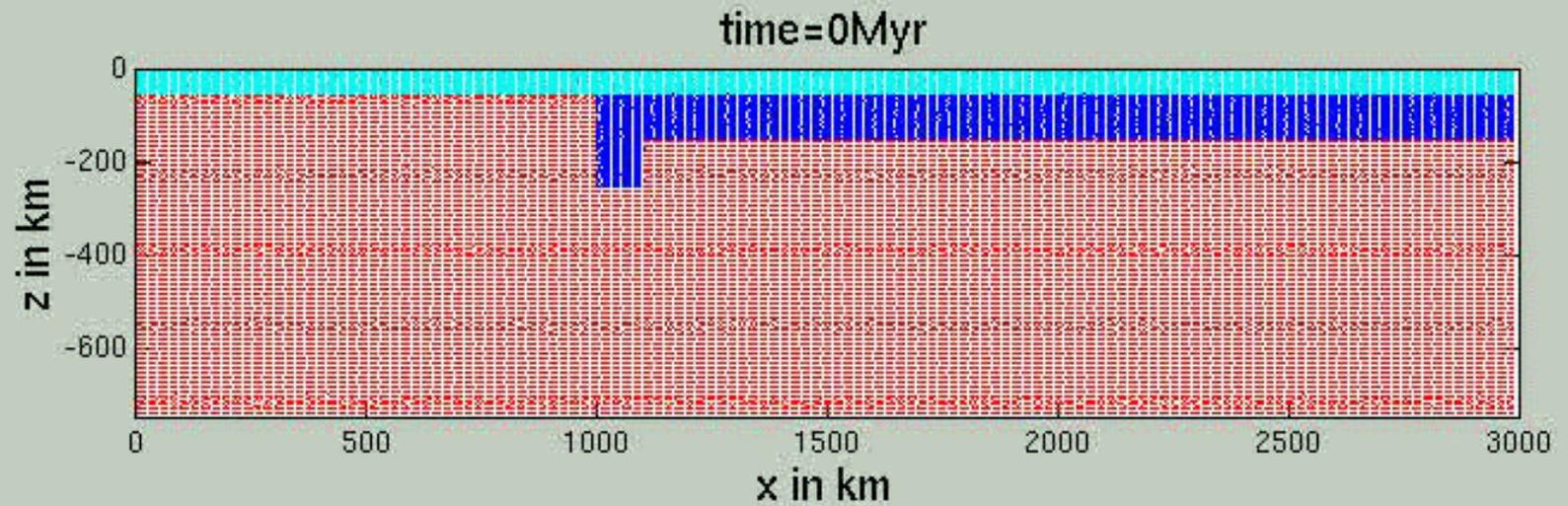
FE, Multigrid, Marker Technik

**Lab Experimente** (Funicciello, Faccenna):

Silicone putty & Honig

**Weitere Codes/Modelle in Vorbereitung (Gabriele Morra)**

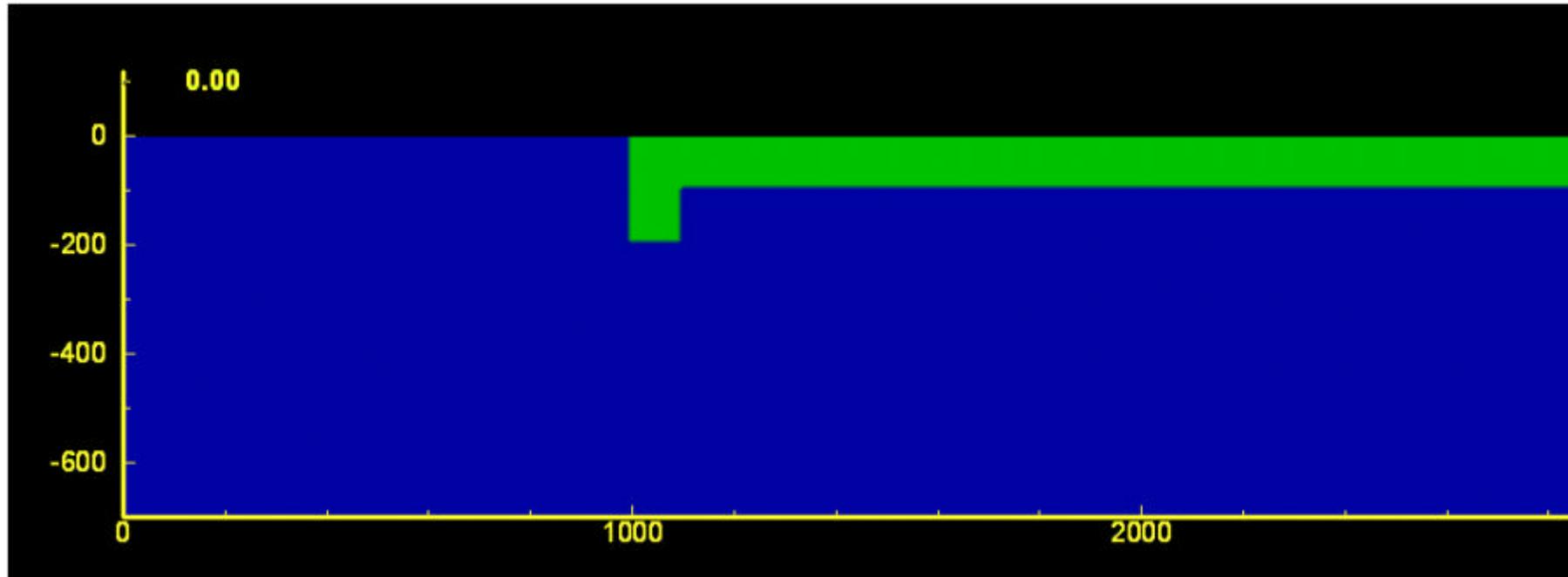
# FDCON (Schmeling, Enns, Grigull)



# I2VIS (Gerya)

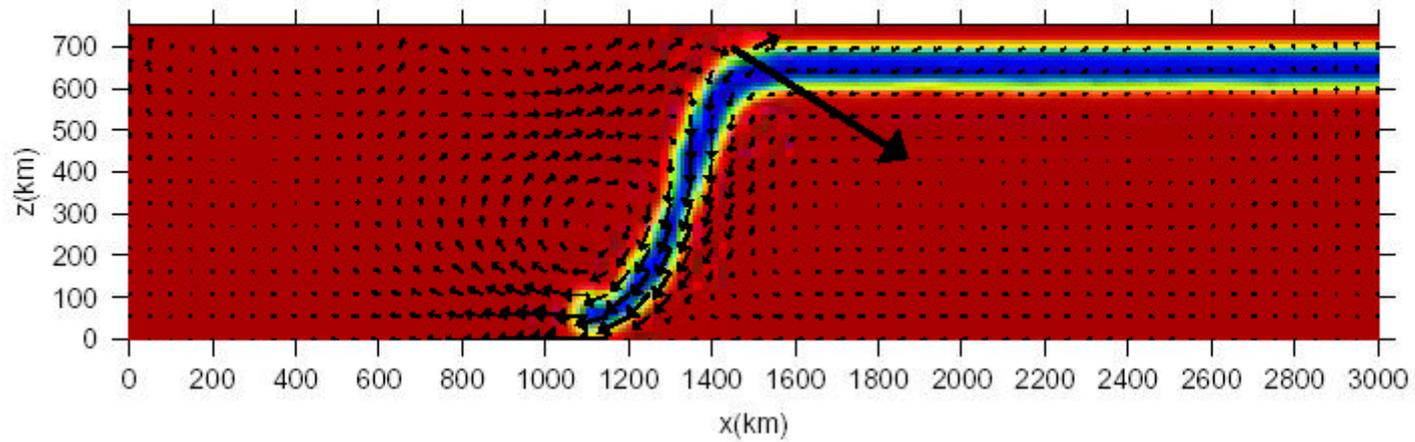


# FLAC-based (Babeyko)



# CITCOM (van Hunen)

4V/C53

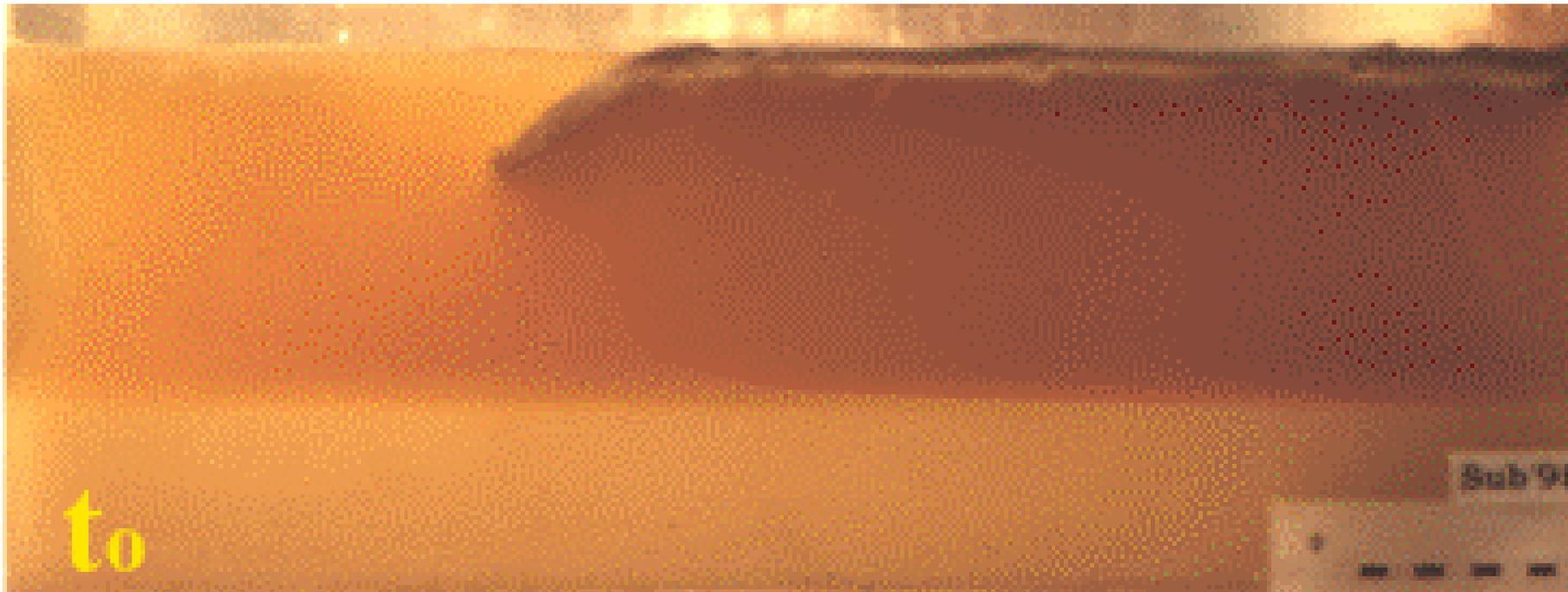


# Lab experimente (Funiciello, Faccenna)

$$h_{\text{Lit}} = 70 \text{ km}$$

$$\eta_{\text{Lit}} / \eta_{\text{mantle}} = 300$$

(flexural rigidity ähnlich der  
Benchmark Definition)



# Lab experimente (Funiciello, Faccenna)

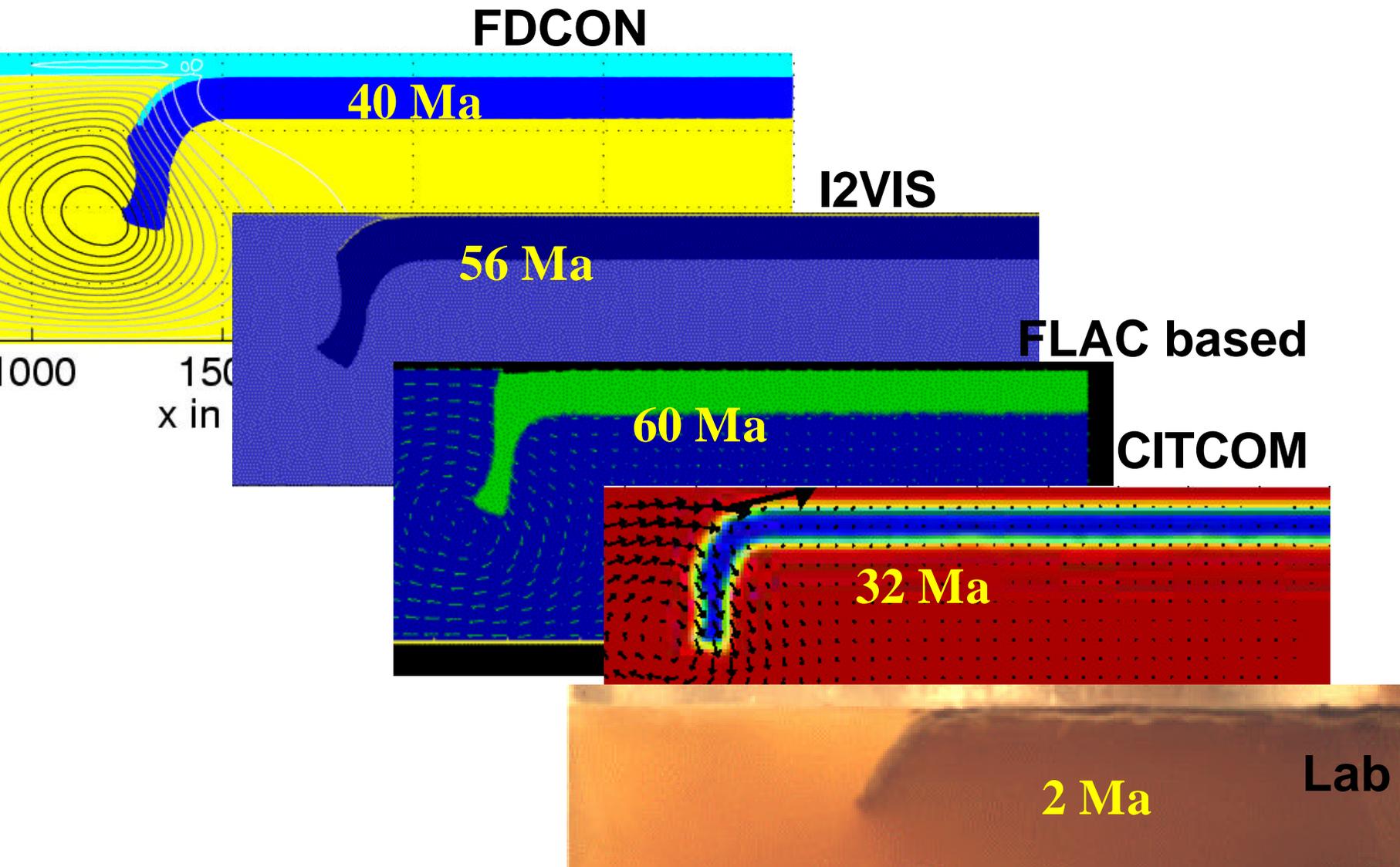
$$h_{\text{Lit}} = 70 \text{ km}$$

$$\eta_{\text{Lit}} / \eta_{\text{mantle}} = 300$$

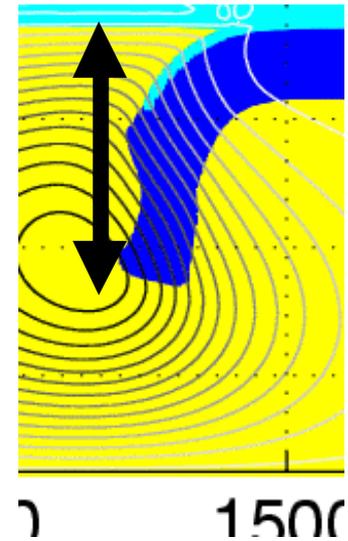
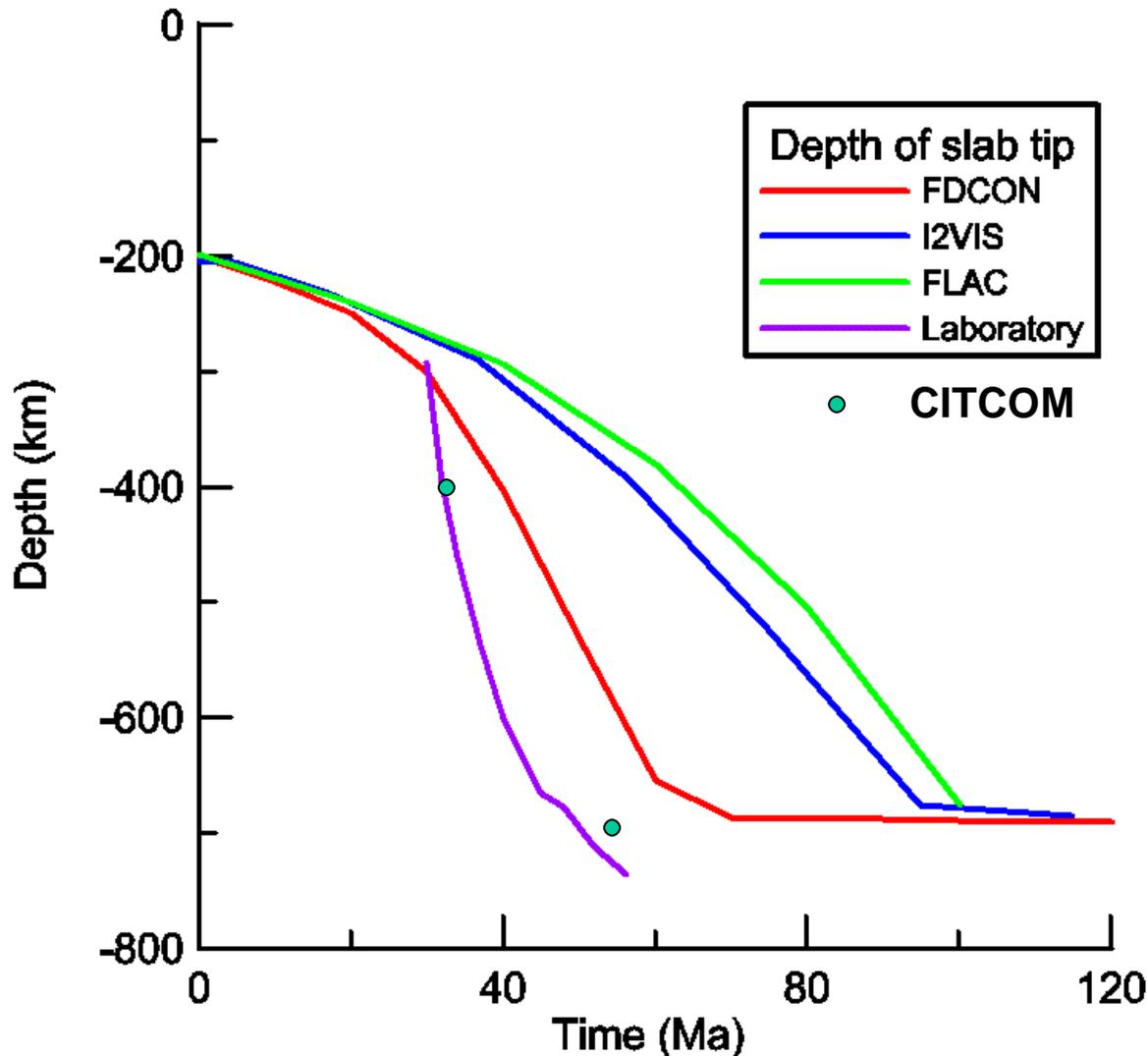
(flexural rigidity ähnlich der  
Benchmark Definition)



# Vergleich der slab Geometrien



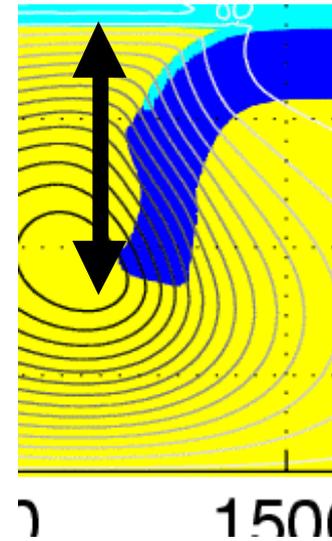
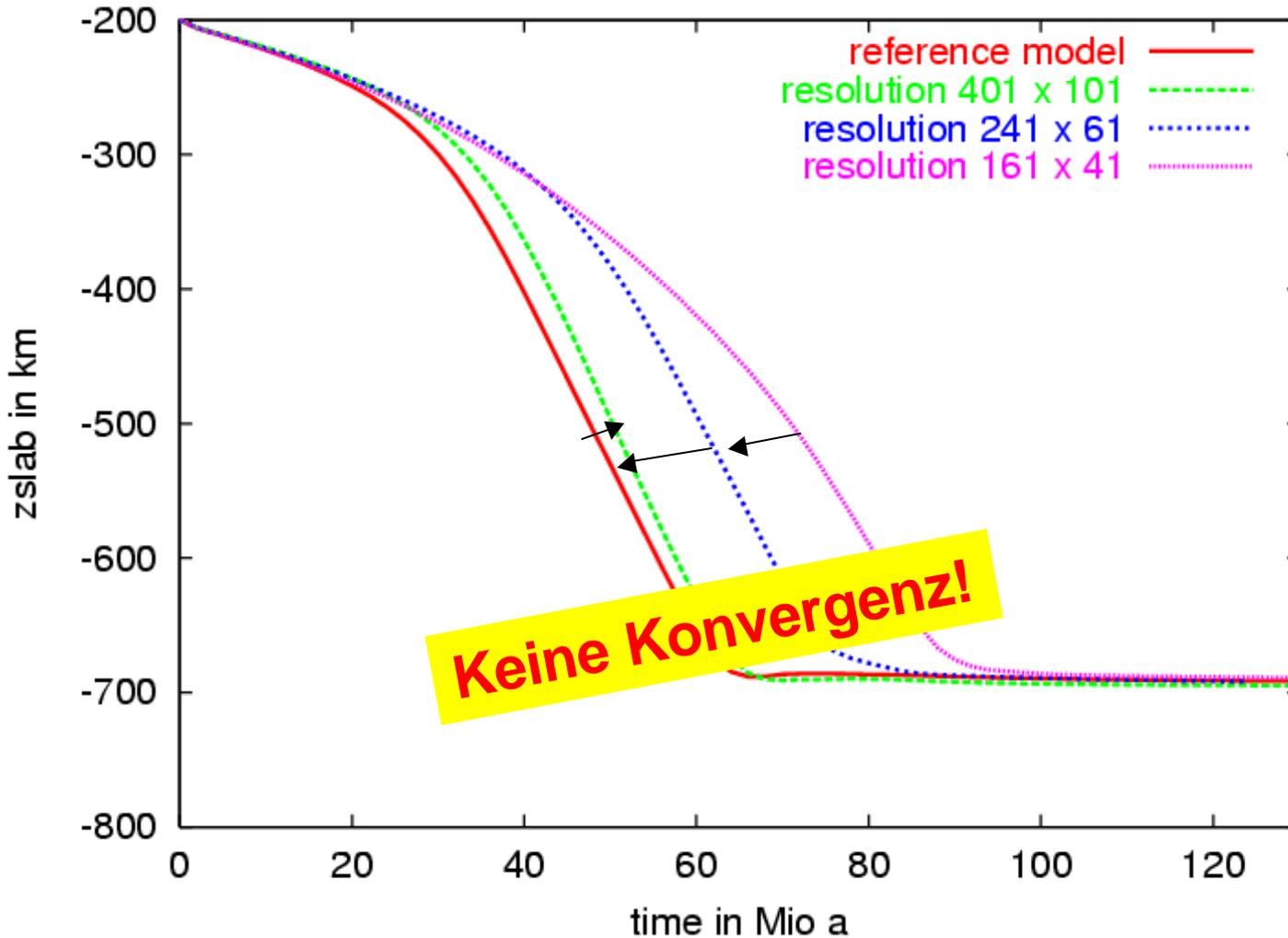
# Vergleich des Zeitverhaltens

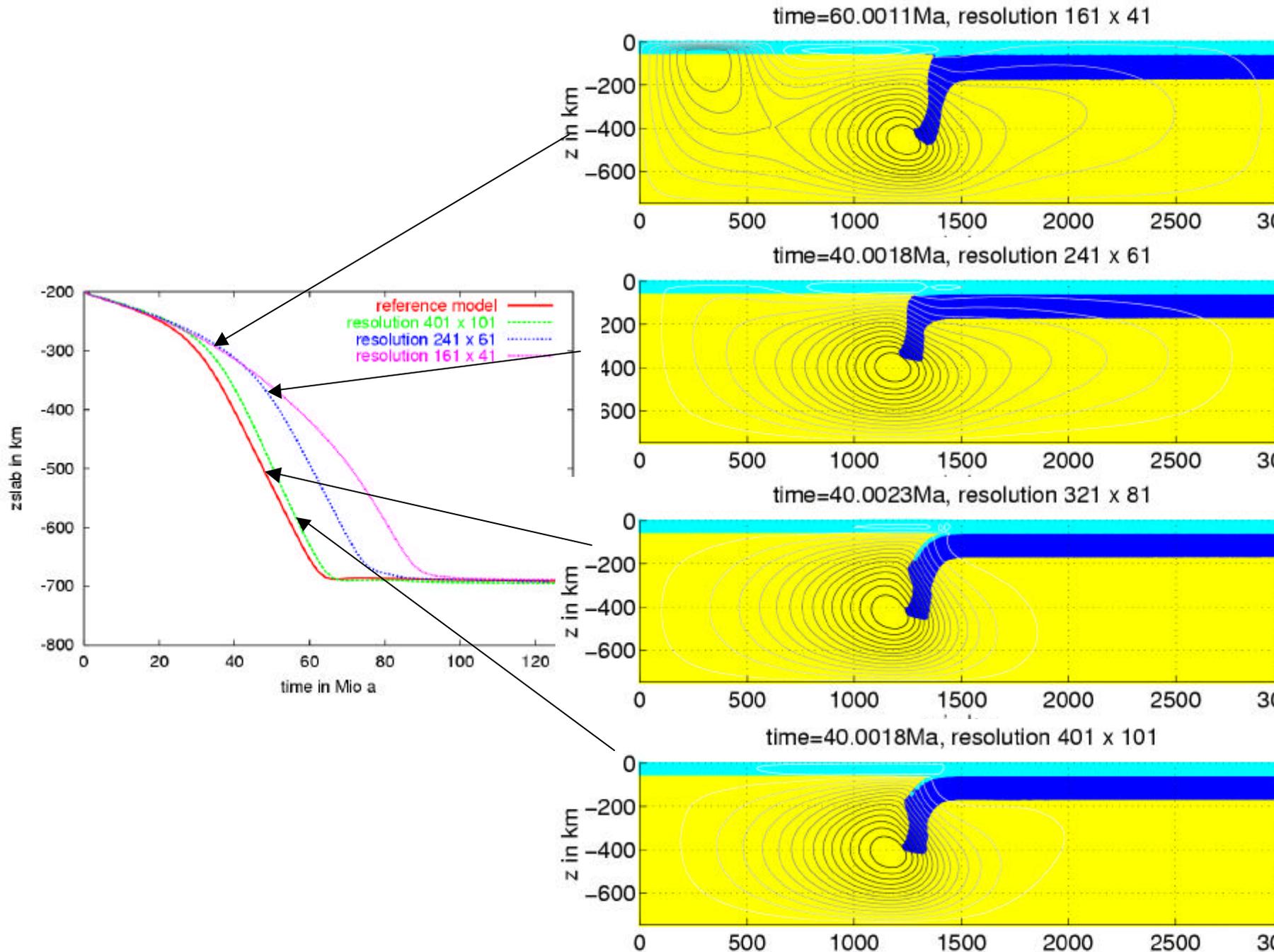


# Woher die Unterschiede?

- Annahmen  
(FLAC: visko-elastisch, freie Oberfläche, Lab, ...)
- Auflösung (z.B. CITCOM nur 2 Elemente in der „weichen Schicht“)
- Entrainment des weichen Oberflächenmaterials
- Viskositäts-Mittelung an rheologischen Grenzflächen

# Effekt der Auflösung





→ **Entrainment der „weichen Schicht“  
ist wichtig**

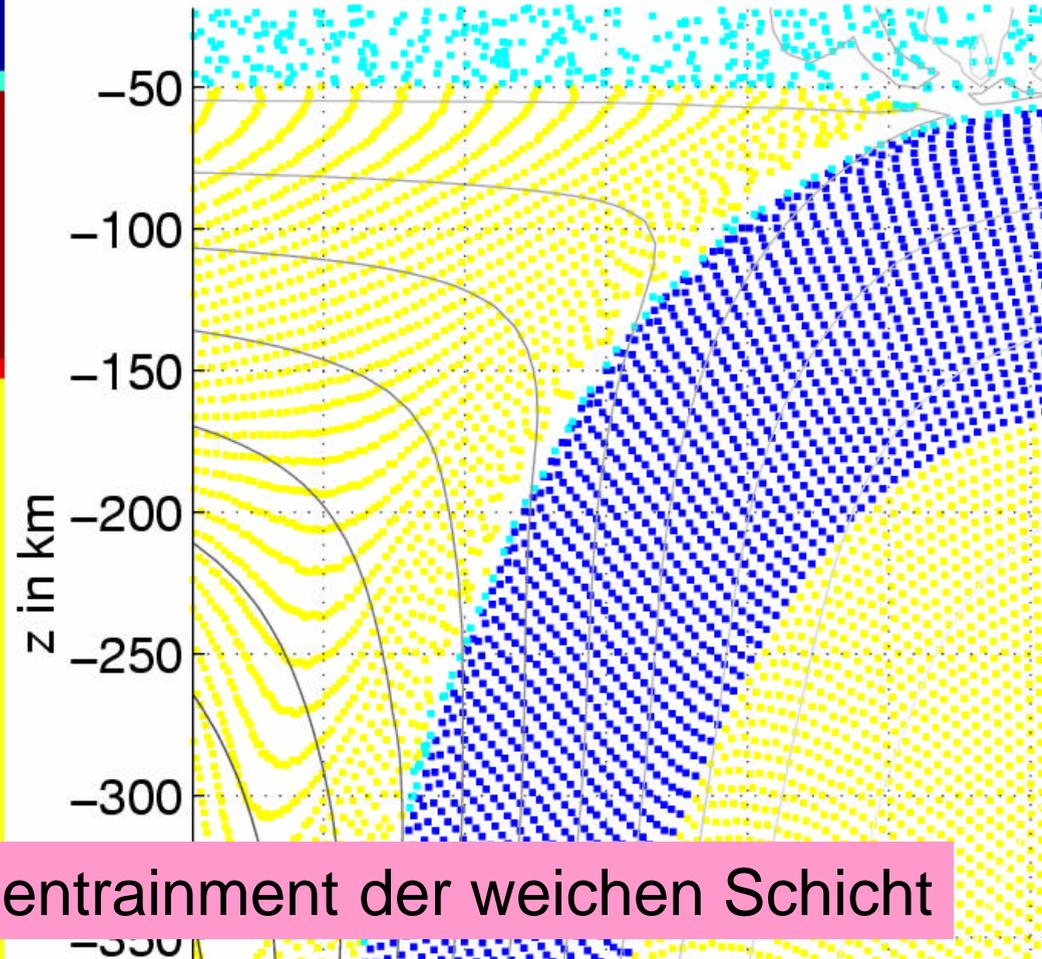
# Entrainment

Viskosität

low

high

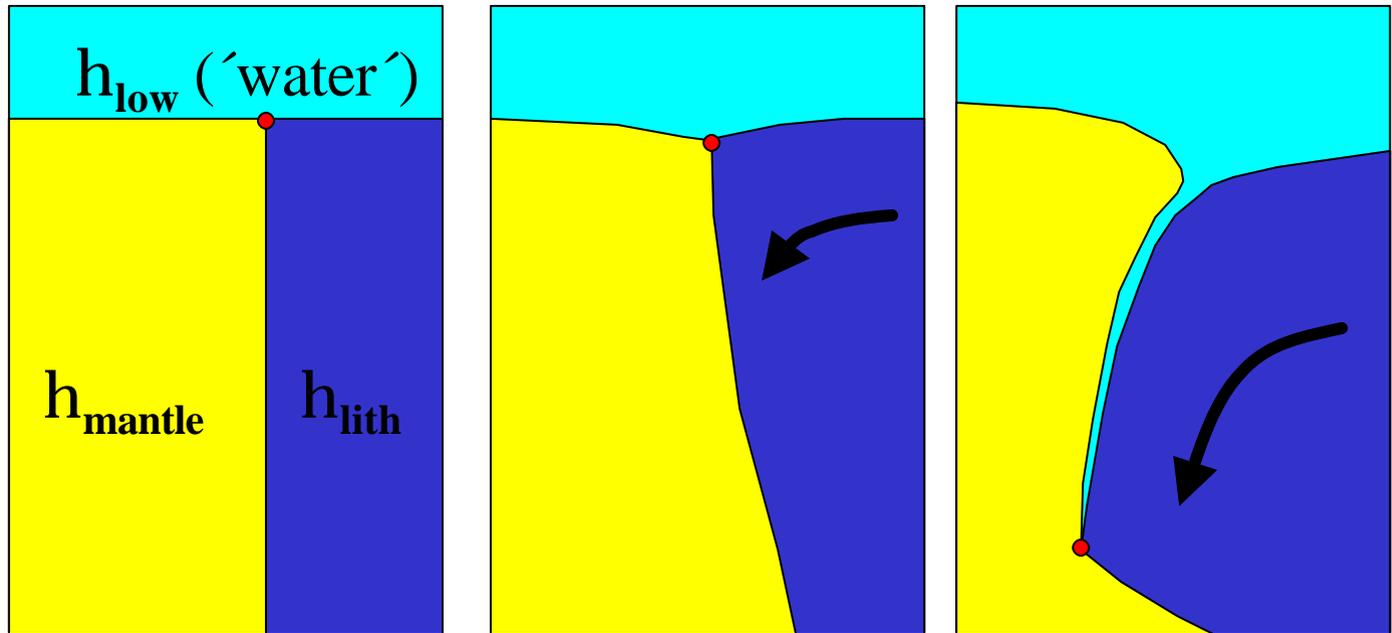
Komposition



Entkopplung durch entrainment der weichen Schicht

# Entrainment: numerischer Effekt oder reale Physik?

Rein viskose Strömung mit kompositionellen Kontrasten:



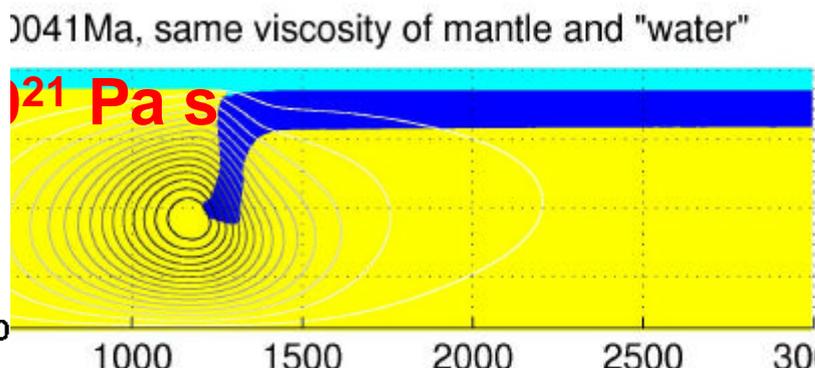
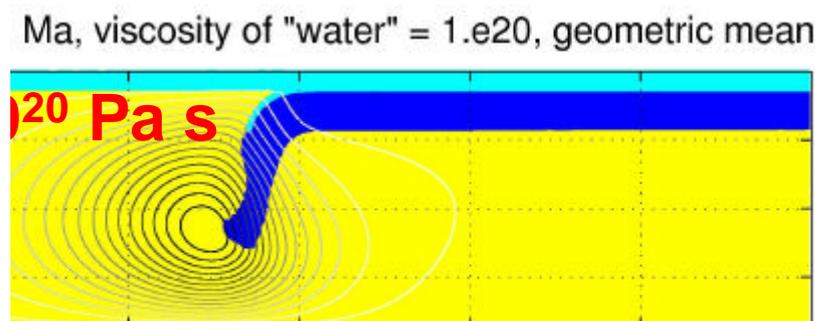
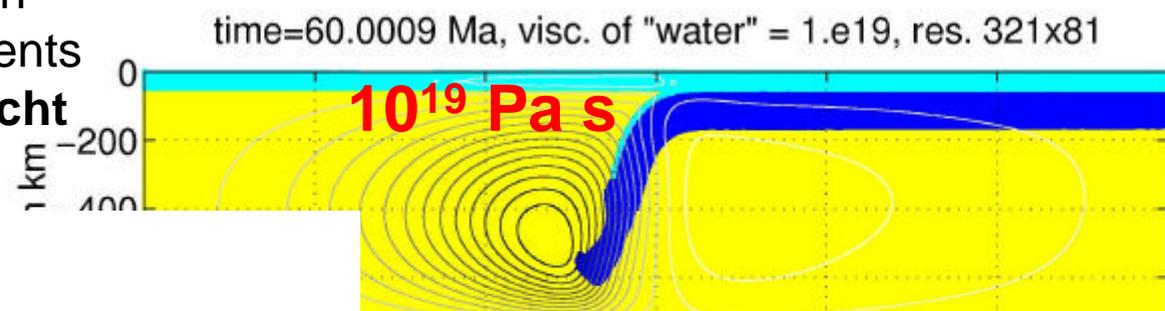
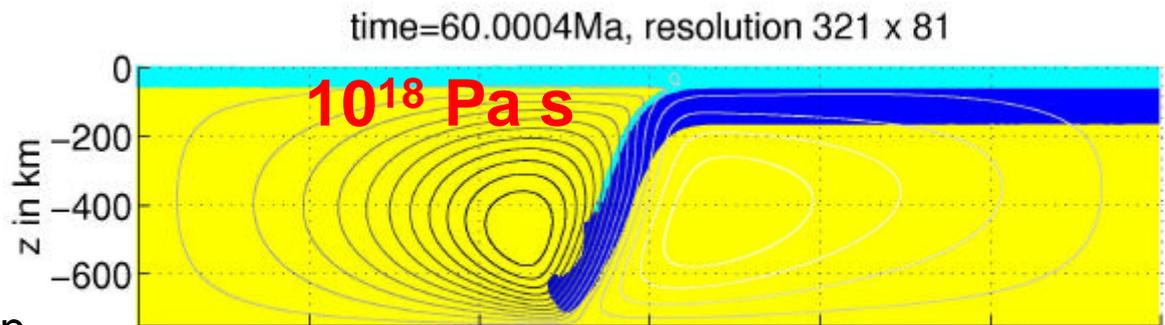
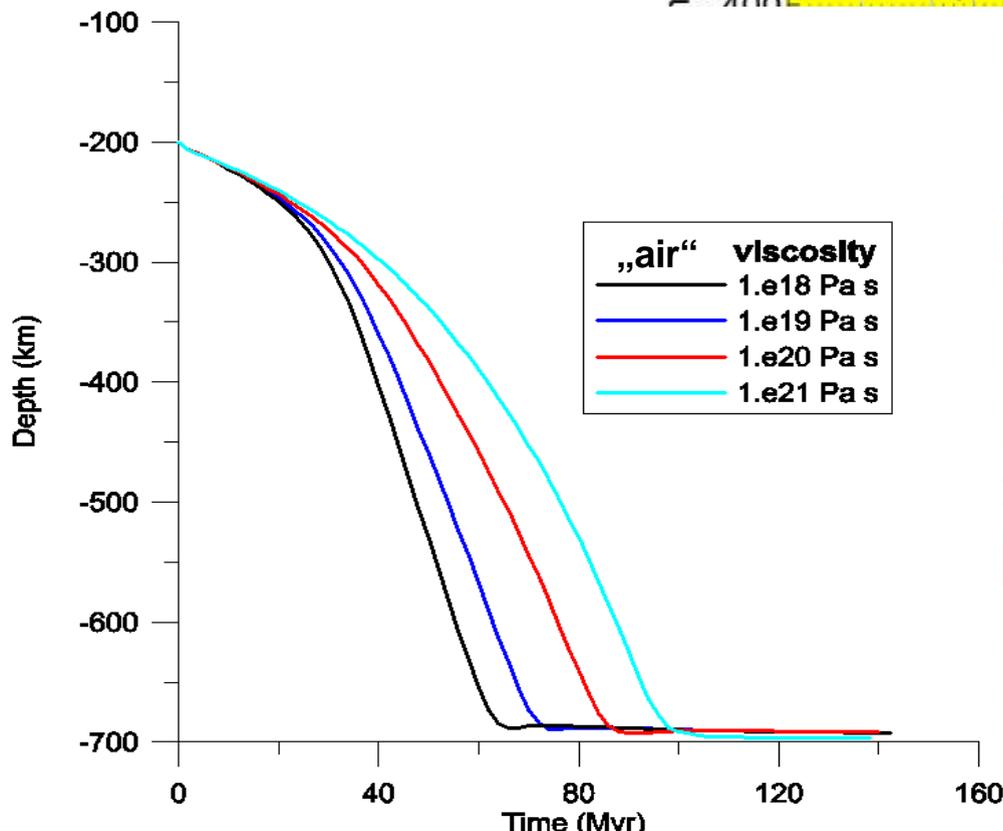
- ➔ - Fluid Dynamik des Entrainments und der Entkopplung scheint korrekt reproduziert zu werden
- sie ist eine Konsequenz der Benchmark Definition, gibt es einen Bezug zu realen Subduktionszonen? (z.B. wasserhaltige Sedimentschicht)

**Um im benchmark Konvergenz zu erreichen, sollte das Entrainment prinzipiell auflösbar gemacht werden**

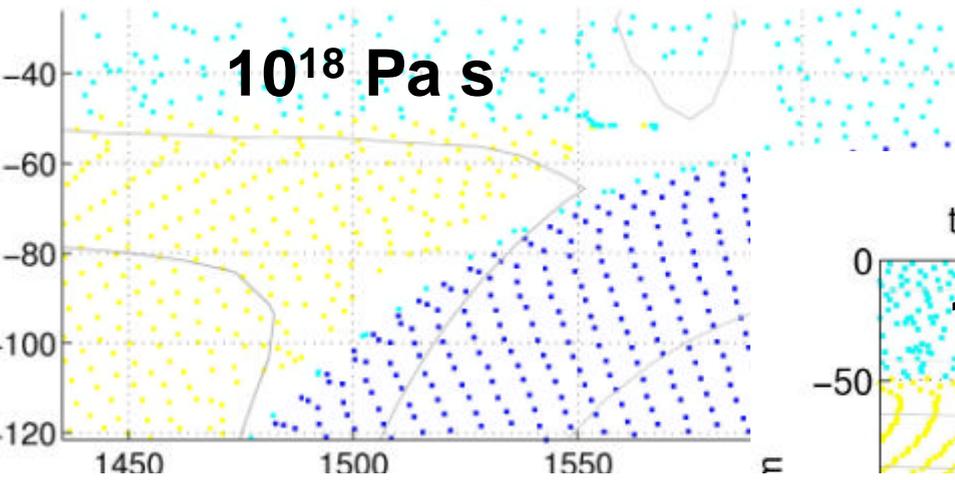
**→ Erhöhung der Viskosität der weichen Schicht**

# Zunehmende „weiche Schicht“-Viskosität

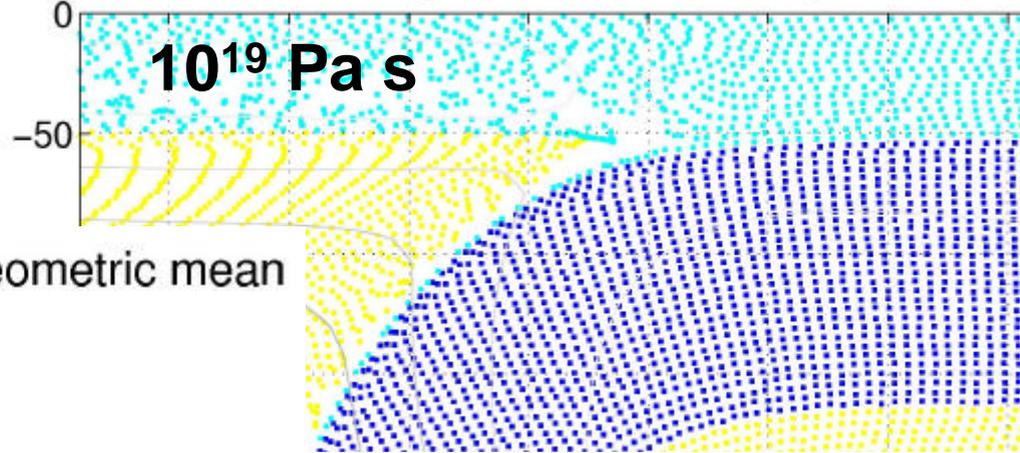
- Behinderung der Subduktion
- Verringerung des Entrainments
- Entrainment schicht wird **nicht** mächtiger



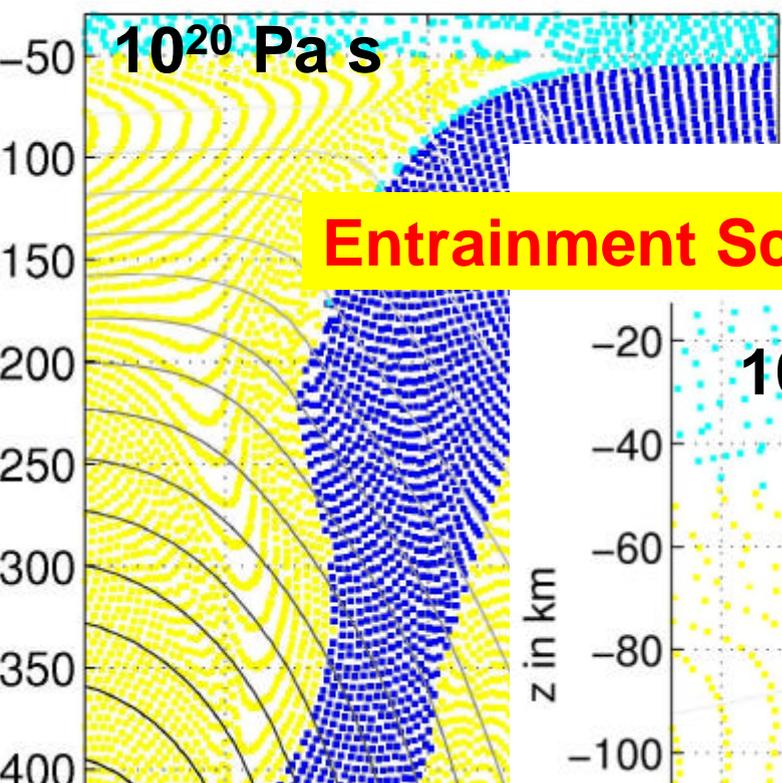
time=60.0004Ma, resolution 321 x 81



time=60.0009 Ma, visc. of "water" = 1.e19, res. 321x81



001 Ma, viscosity of "water" = 1.e20, geometric mean

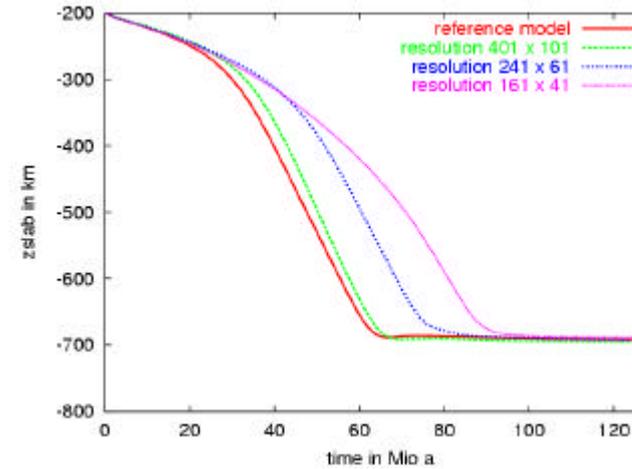
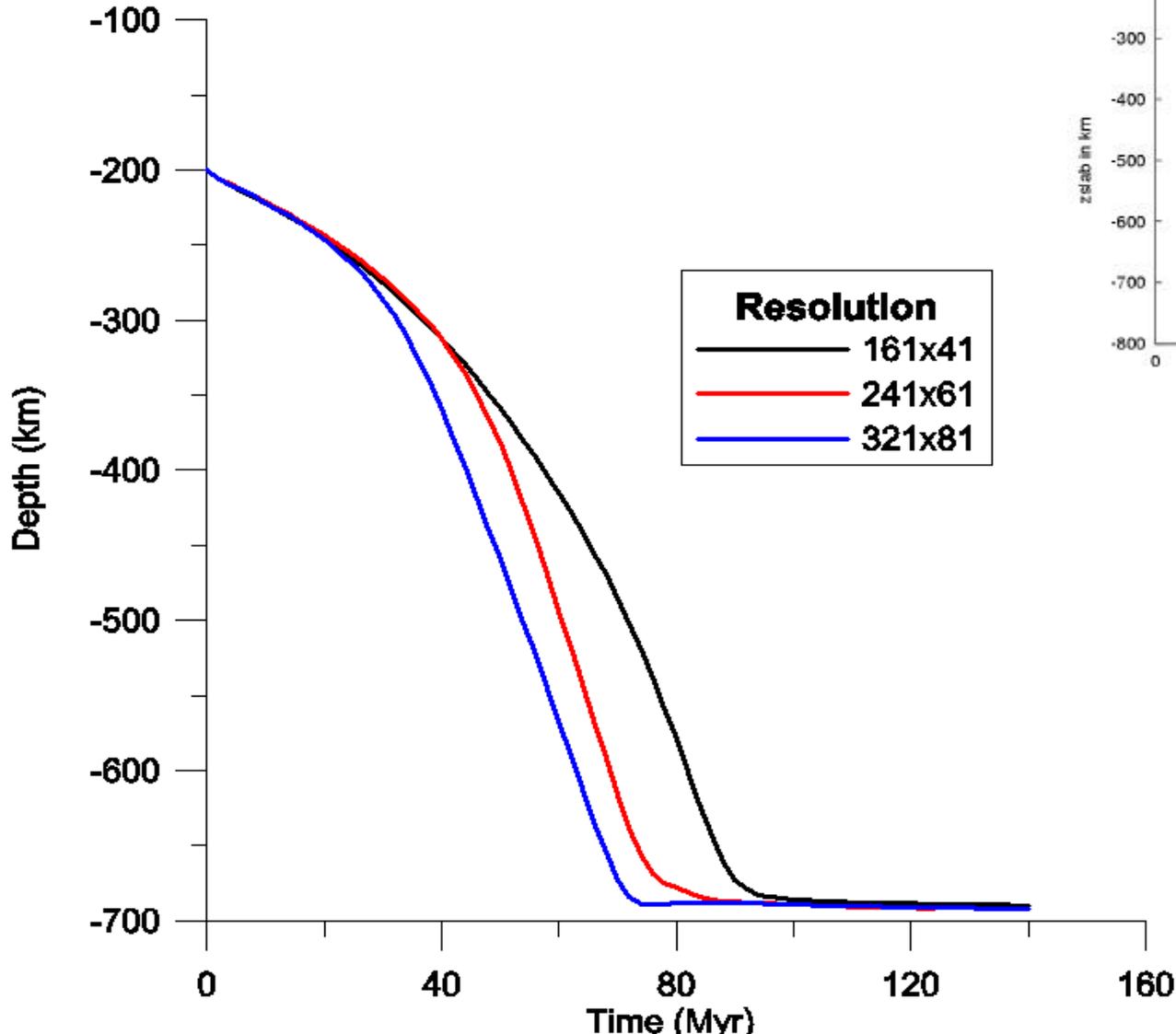


**Entrainment Schicht < Gitterauflösung!**

e and "water"



# Konvergenzverhalten bei höherer „Weiche Schicht“-Viskosität ( $10^{19}$ Pa s)

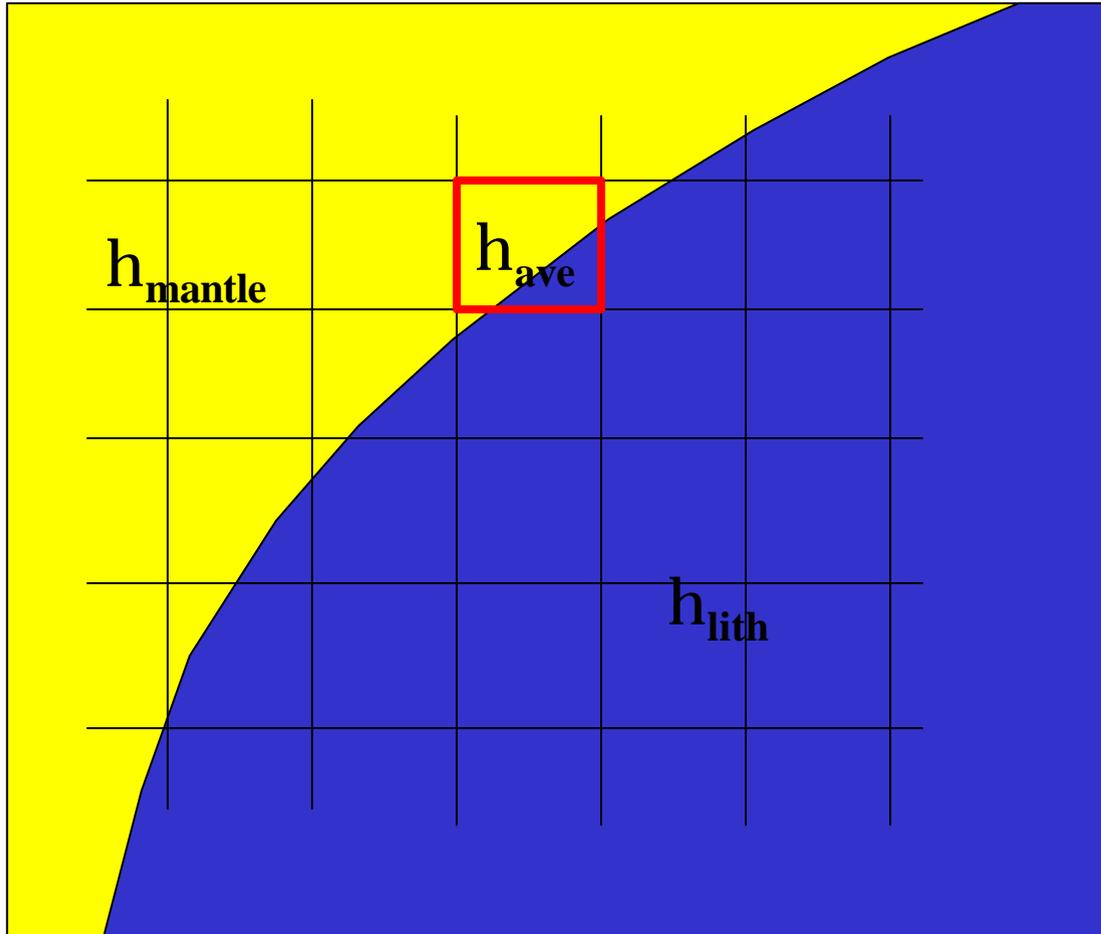


besser ?

**Ein anderes wichtiges Problem**

**Viskositäts Mittelung an  
rheologischen Grenzschichten**

# Problem der Viskositätsmittelung in multi-Komponenten-Strömungen im Euler Referenzsystem

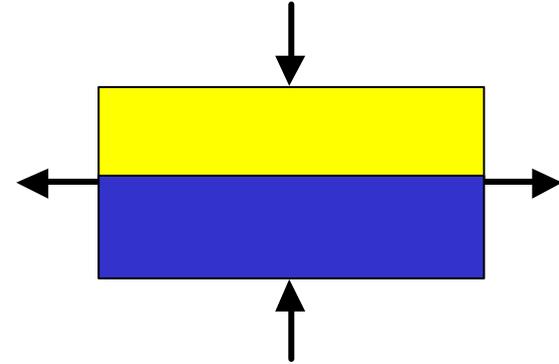
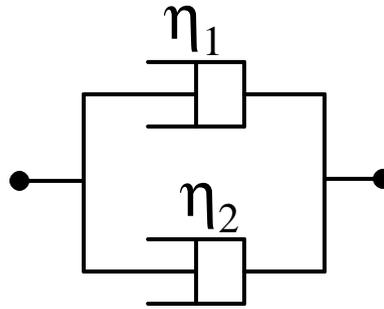


$h_{\text{ave}} ?$

# Viskositätsmittelung

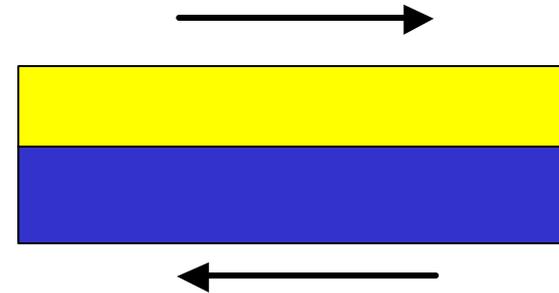
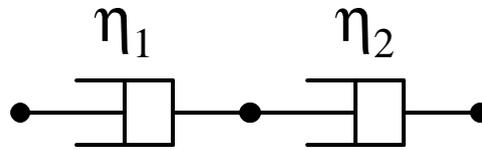
Arithmetisches Mittel

$$h_{ave} = c_1 h_1 + c_2 h_2$$

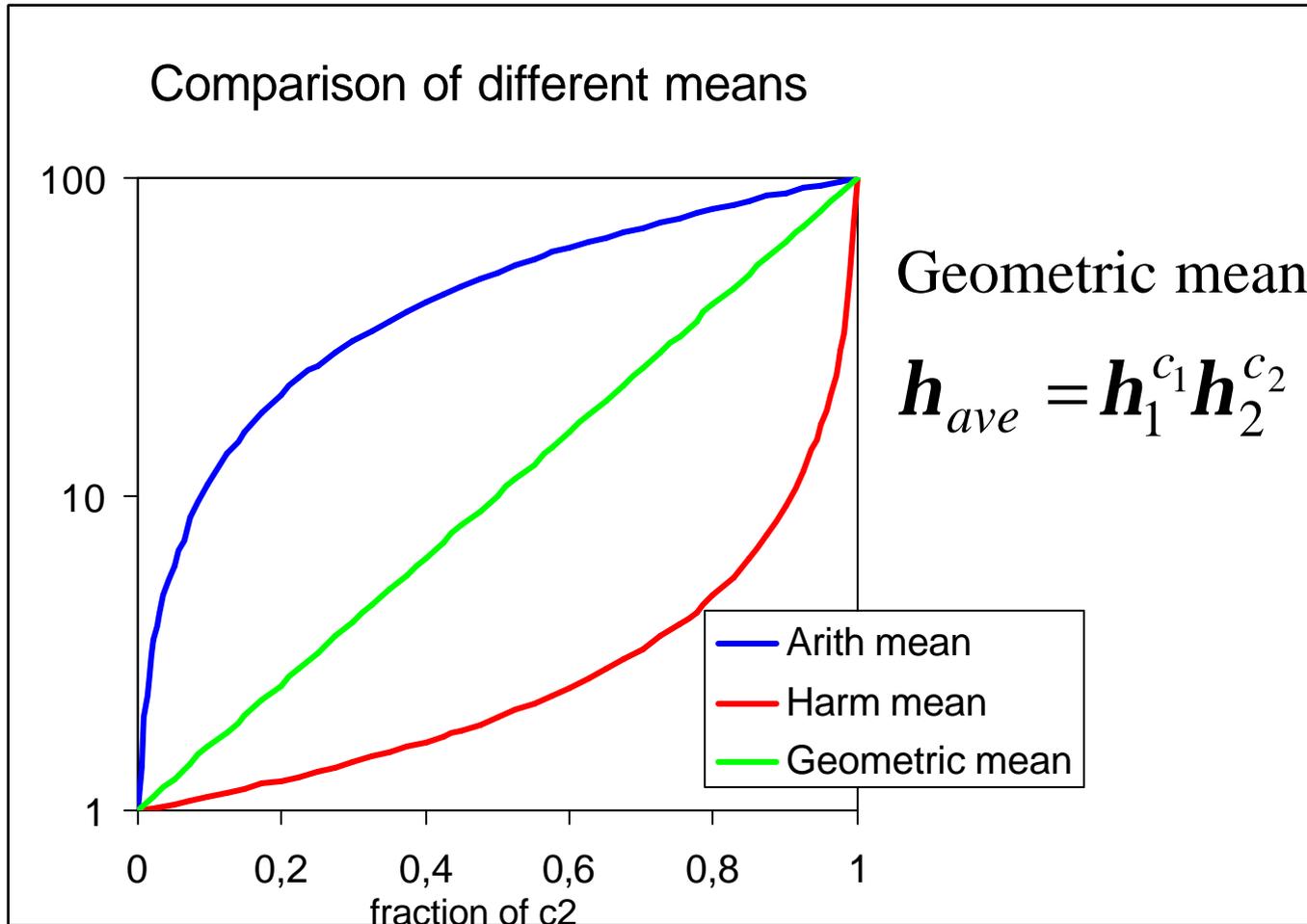


Harmonisches Mittel

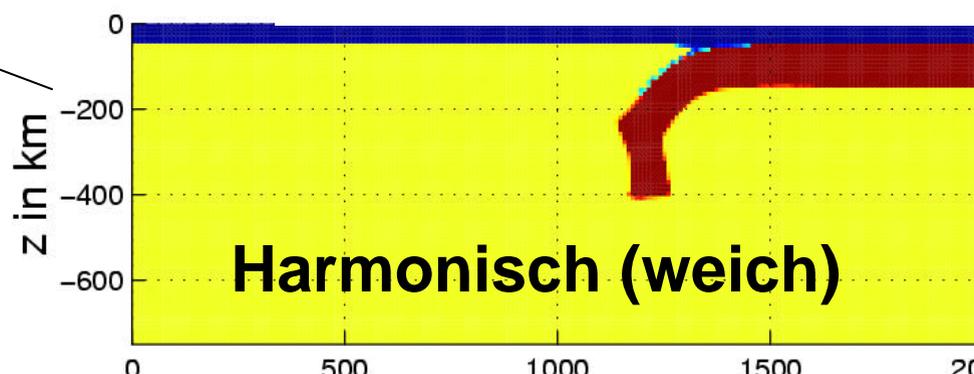
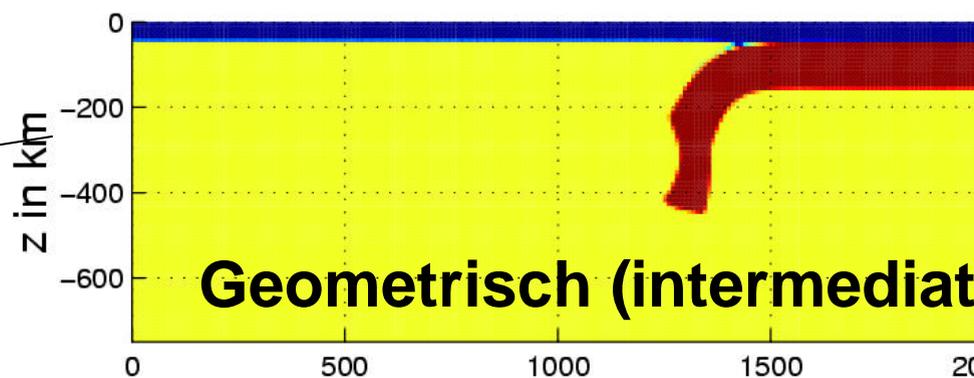
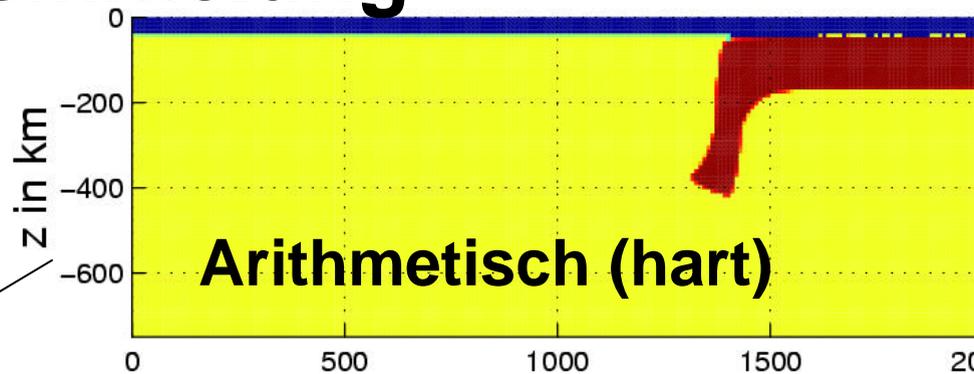
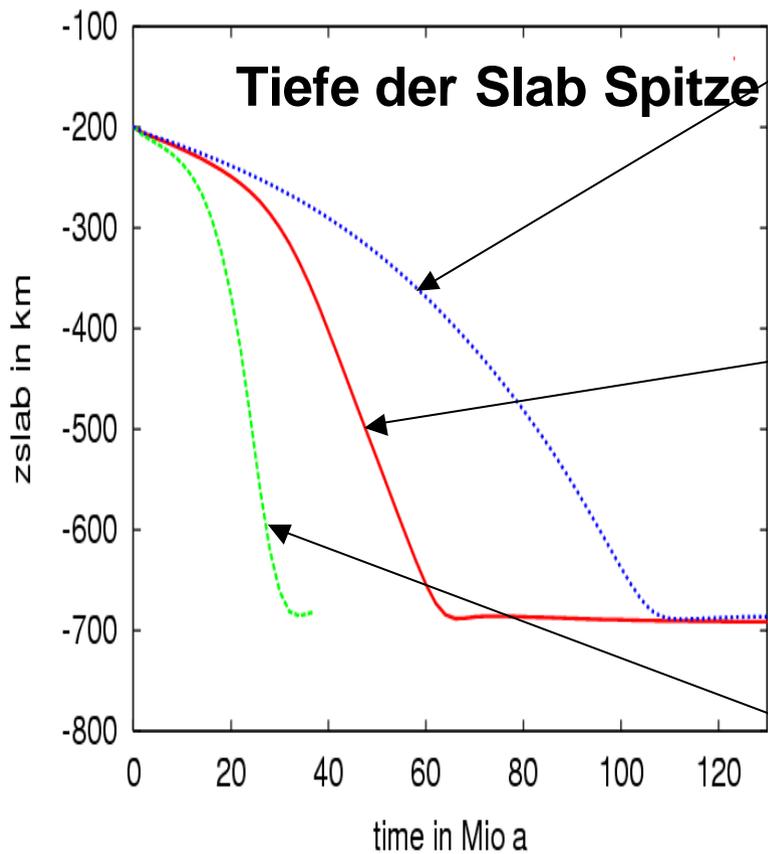
$$\frac{1}{h_{ave}} = \frac{c_1}{h_1} + \frac{c_2}{h_2}$$



# Viskositätsmittelung $h_1 / h_2 = 1 / 100$

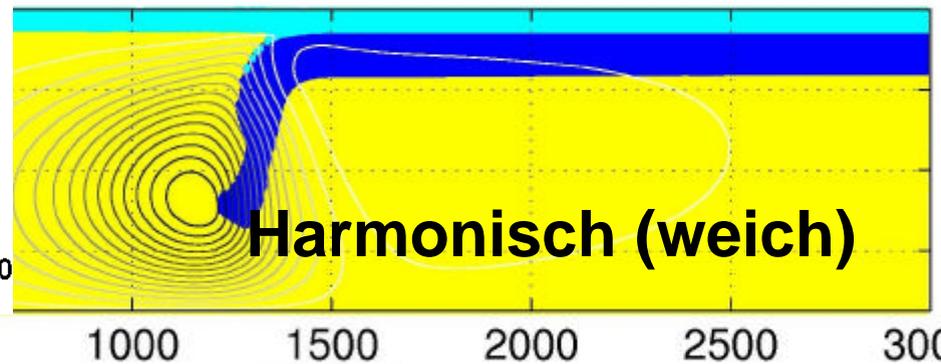
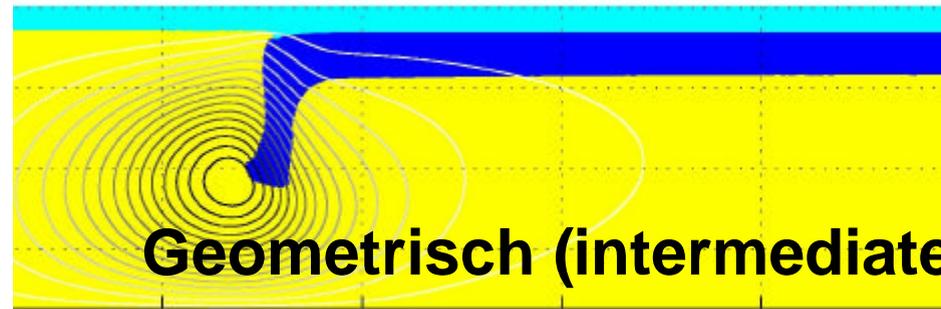
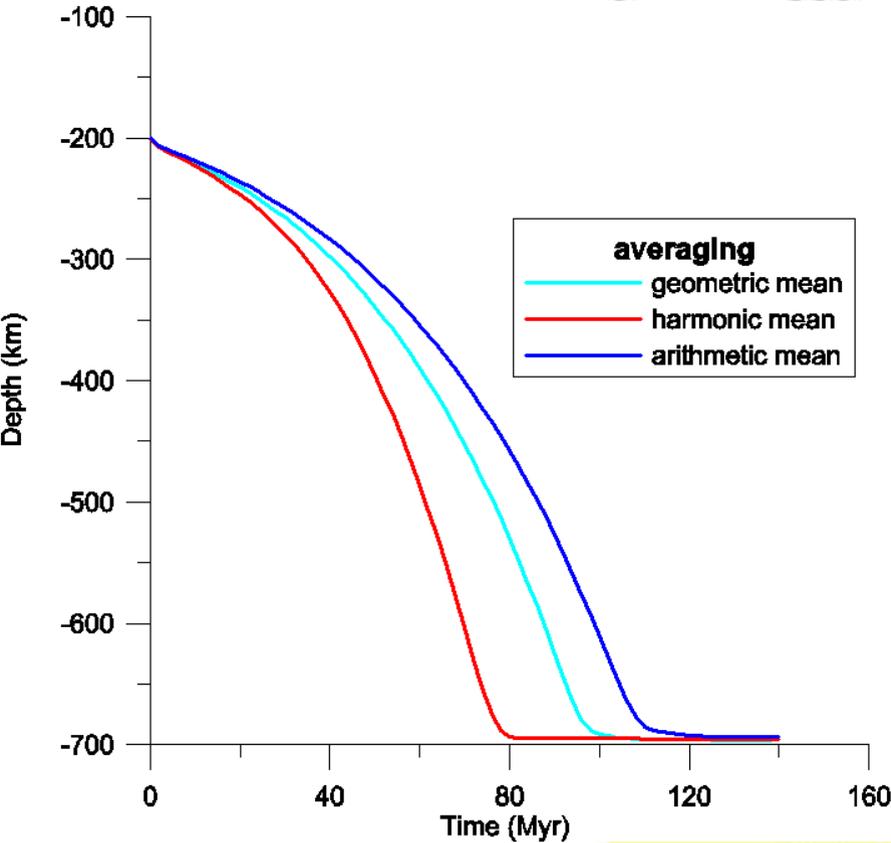
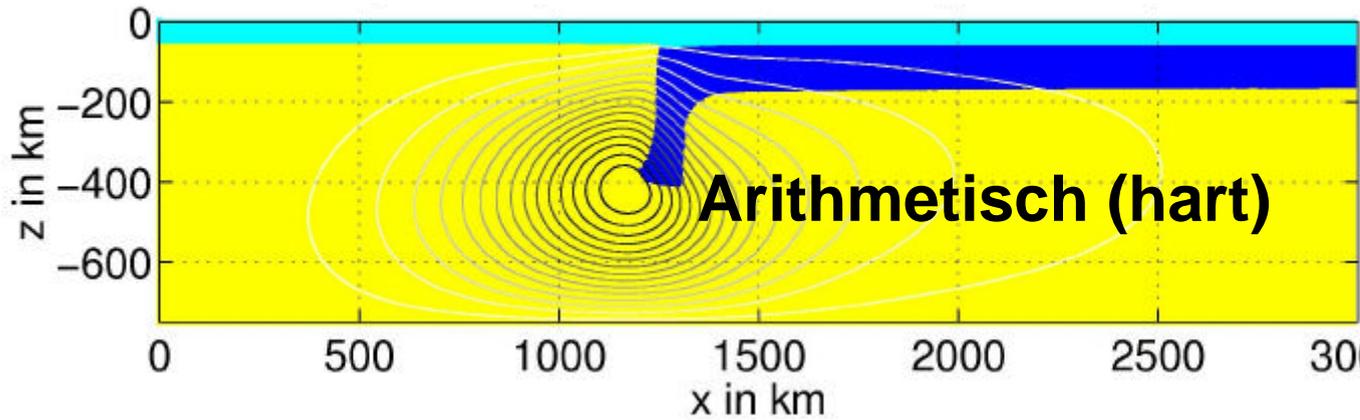


# Viskositätsmittelung



# $10^{21}$ Pa s „Weiche Schicht“

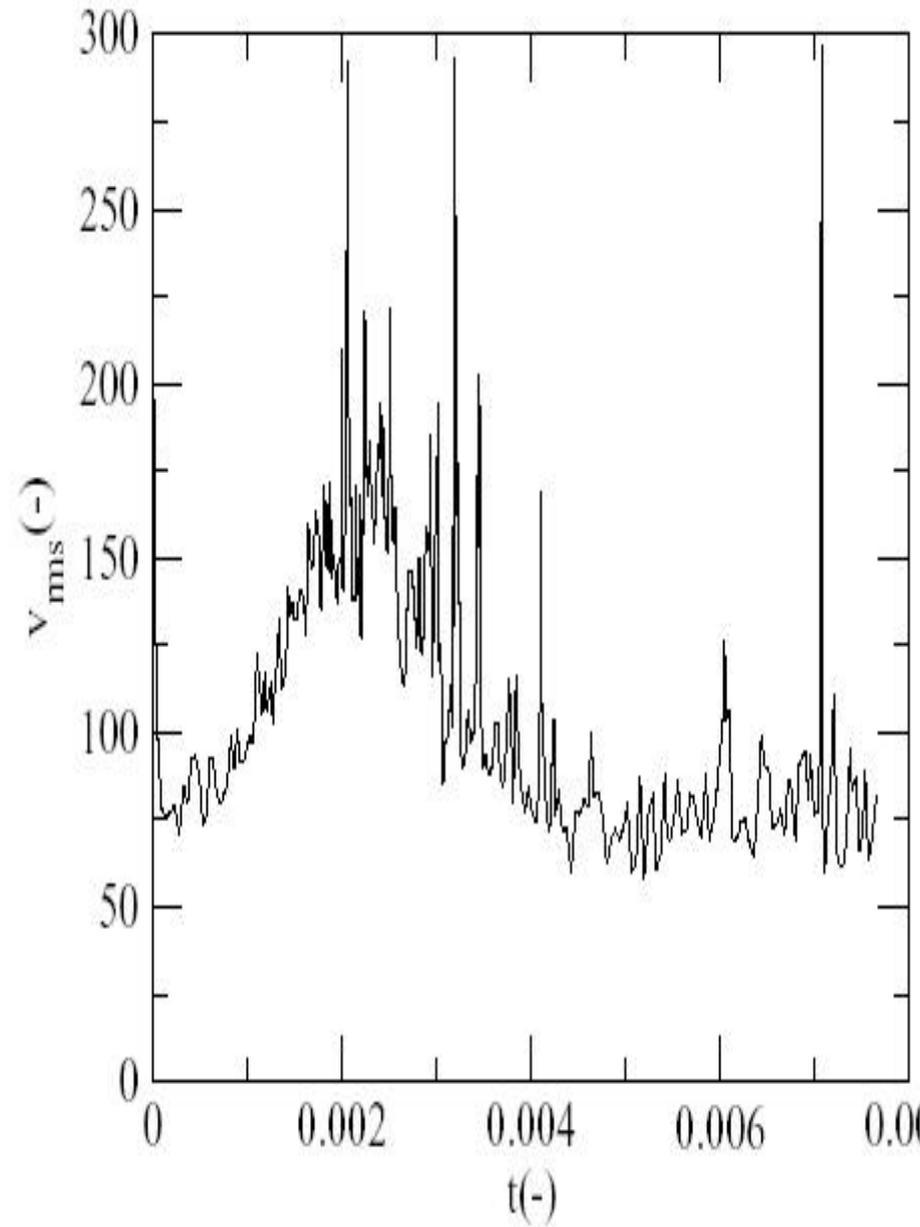
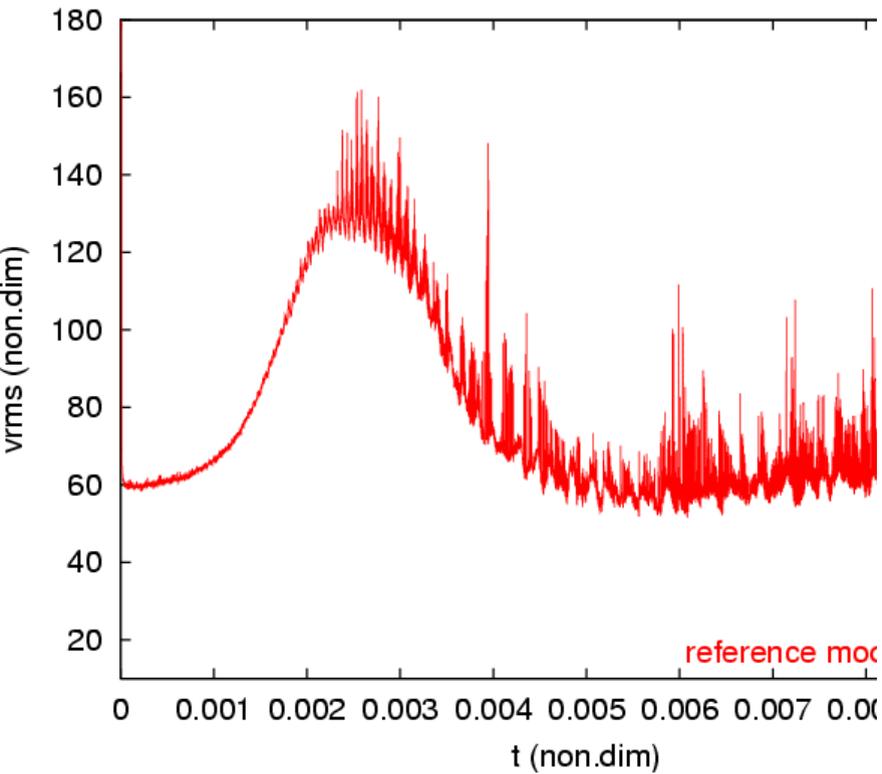
Unterschiede  
etwas kleiner



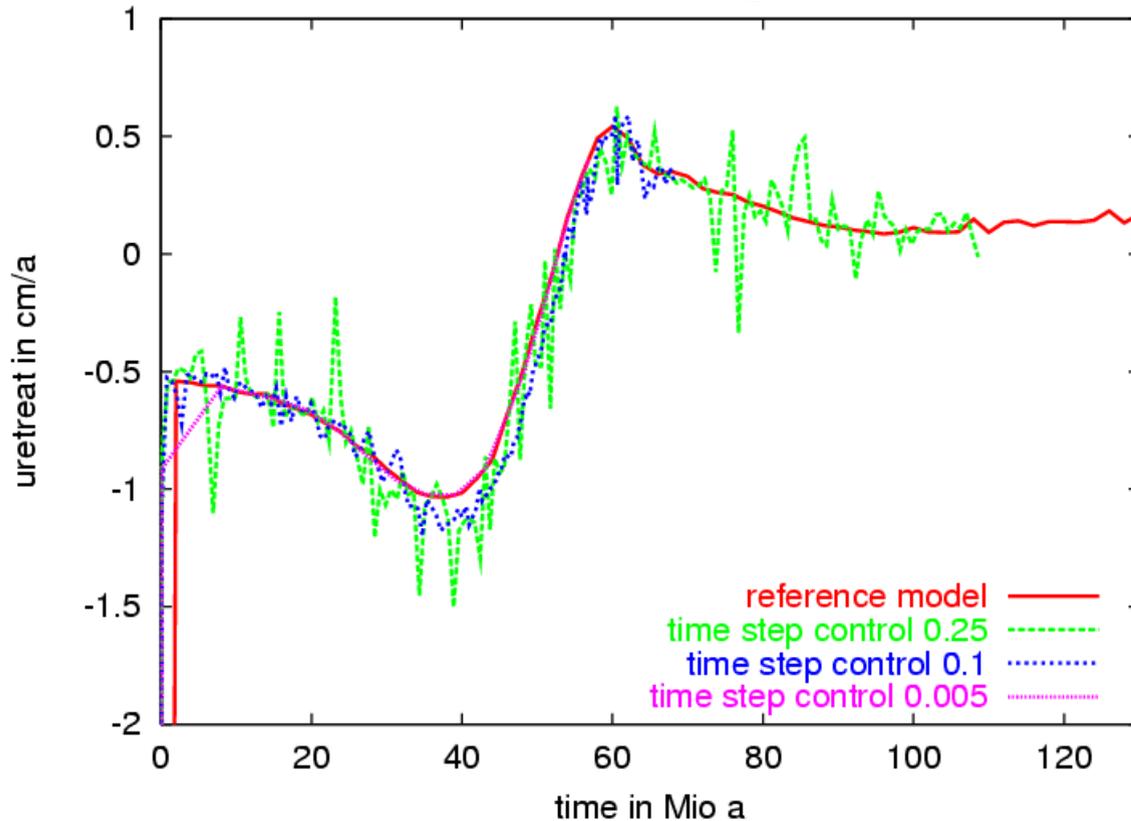
# Andere Probleme mit der weichen Schicht „zähen Luft“

- Oszillationen
- kleine Zeitschritte nötig  $O(100 \text{ Jahre})$   
„isostatisches overshooting“  
Ⓜ CPU Wochen auf Pentium 4
- numerische Diffusion

- **Oszillationen**

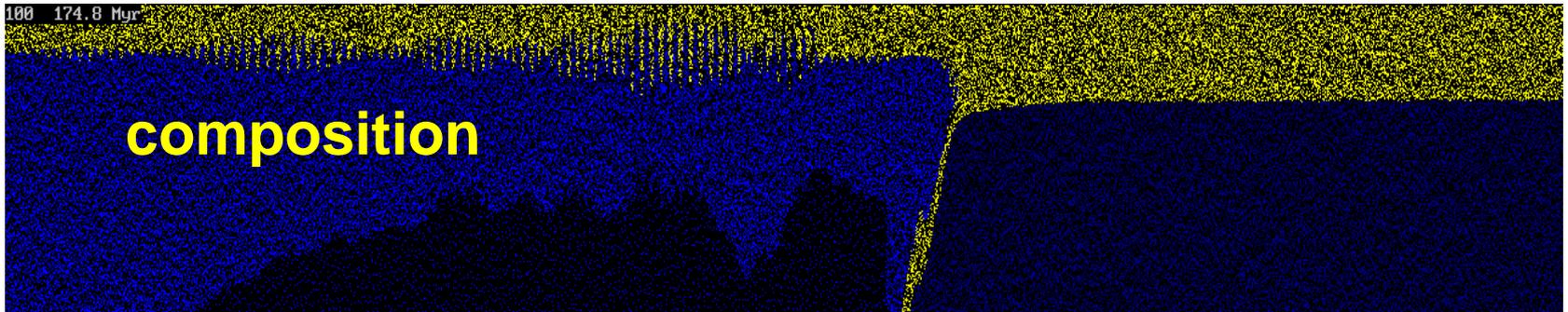


- Oszillationen
- Kleine Zeitschritte nötig  $O(100 \text{ Jahre})$ , „isostatic overshooting“

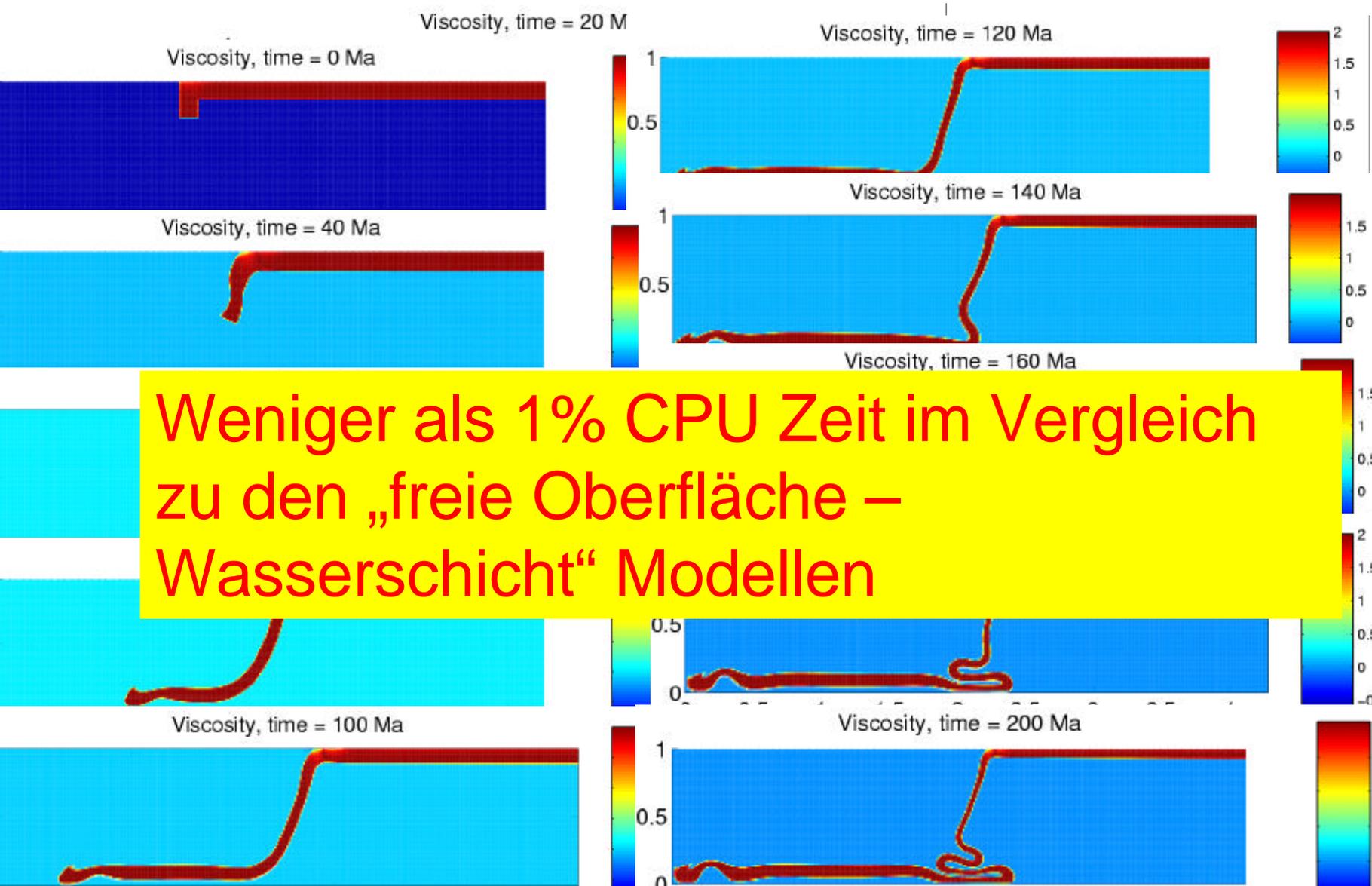


**CPU Wochen  
auf Pentium 4**

- Oszillationen
- Kleine Zeitschritte  $O(100 \text{ Jahre})$
- Numerische Diffusion



# Alternative: plastisches Erweichen nahe Oberfläche (Byerle)



# Schlussfolgerungen

- Einfaches fluid dynamisches System erzeugt überraschend schwierige numerische Probleme  
→ Herausforderung für Benchmark
- Weiche Schicht („Sticky air“) Entrainment und selbst konsistente Slab Entkopplung scheint (noch) nicht befriedigend modellierbar zu sein
- Höhere Viskosität ( $10^{20}$  Pa s) macht das Problem handhabbarer, aber Entrainment immer noch unter Gitterauflösung
- Advektierte Grenzen mit hohem Viskositätskontrast sind problematisch in Euler-Codes  
→ ist geometrisches Mittel ein guter Kompromiss?
- Preiswerte Alternative zum Slab Entoppeln: Plastisches Erweichen nahe Oberfläche (Byerlee)
- Weitere Benchmark Teilnehmer sind willkommen

## Weitere Pläne:

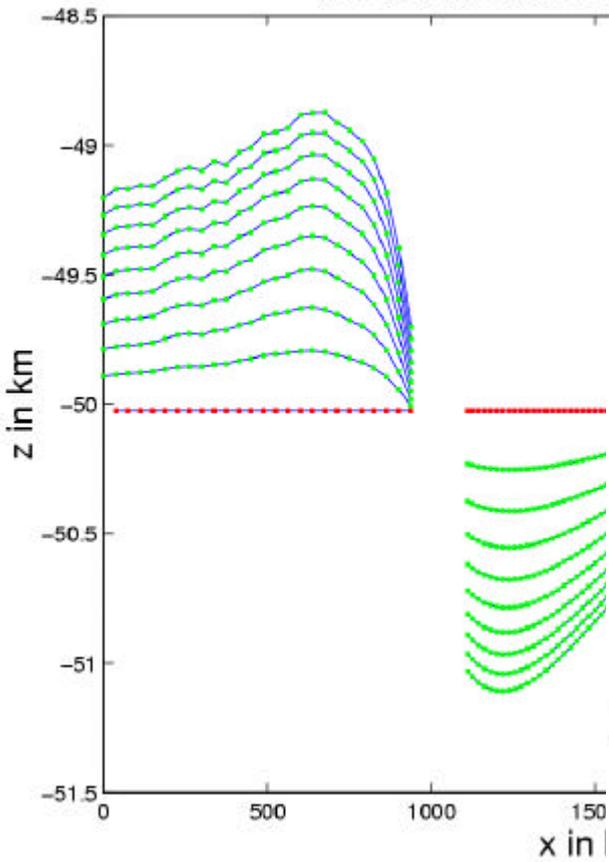
- Fortsetzung der Auflösungstests mit  $10^{20}$  Pa s weicher Schicht
- Herausarbeiten der Unterschiede zwischen freier Oberfläche und weicher Schicht mit Entrainment
- Zusammenschreiben einer Veröffentlichung

Visit subduction benchmark site at:

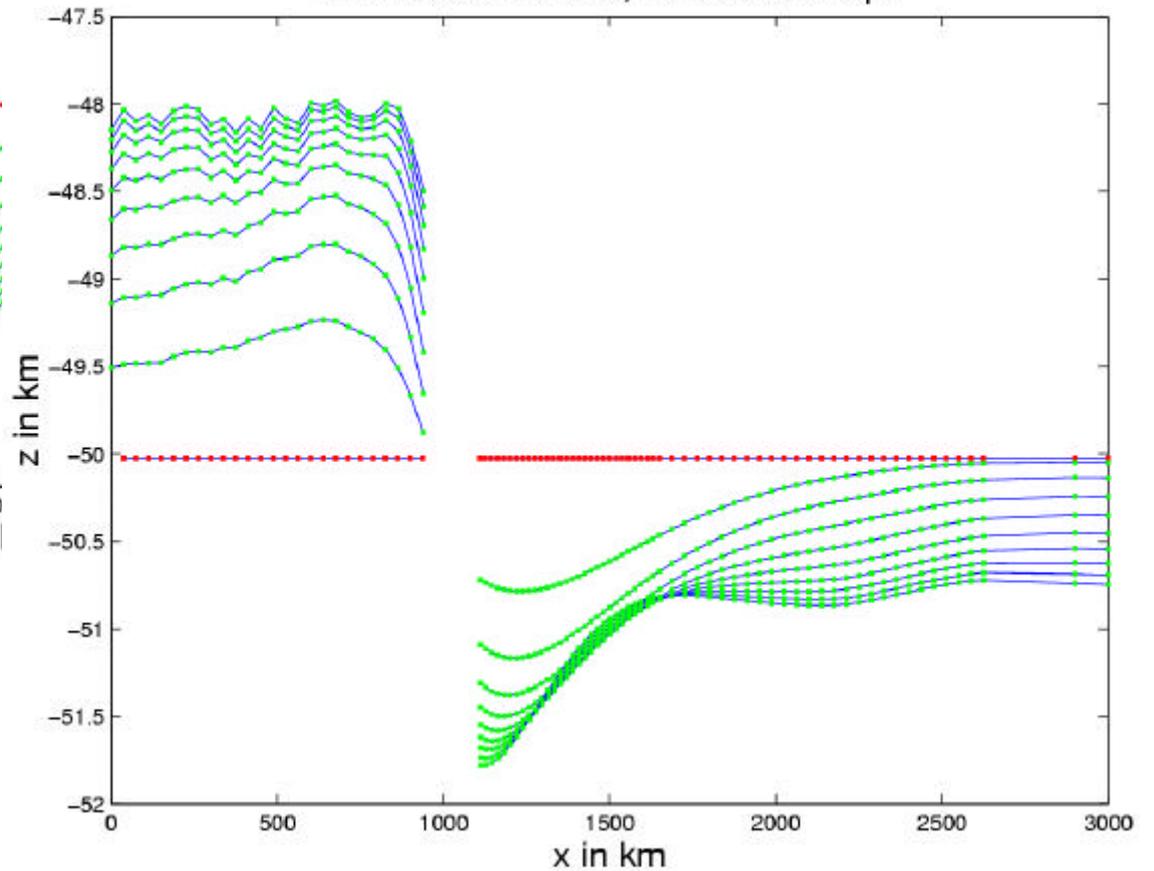
<http://www.geophysik.uni-frankfurt.de/geodyn/geodyn.html>

# Tonographv

resolution 81 x 321, 2 ka time steps



resolution 81 x 321, 10 ka time steps



# What if no low viscosity layer (free surface) is assumed? (advantage: longer time steps, 1% CPU time)

