

# Kalibrierung eines dreidimensionalen Finite-Differenzen-Modells einer Massenbewegung mithilfe der adaptiven Kalman-Filtertechnik

T.Schmalz<sup>1</sup>, A. Eichhorn<sup>2</sup>, E. Tentschert<sup>3</sup>, A. Preh<sup>3</sup>, K. Mair am Tinkhof<sup>3</sup>, C. Zangerl<sup>4</sup>

<sup>1</sup>) Institut für Geodäsie und Geophysik, Forschungsgruppe Ingenieurgeodäsie, TU Wien

<sup>2</sup>) Geodätisches Institut, Forschungsgruppe Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt

<sup>3</sup>) Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, TU Wien

<sup>4</sup>) AlpS GmbH, Innsbruck

**FWF** Der Wissenschaftsfonds.

<http://info.tuwien.ac.at/ingeo/research/kasip>

# Messgebiet

- Gries im Sellrain, Tirol
- Paragneis, Amphibolit, Granodiorit
- Monitoring seit 2003  
(terrestrischer Laserscanner,  
Tachymetrie)
- Neigungswinkel:  $43^\circ$  im oberen  
Bereich,  $31^\circ$  im unteren Bereich der  
Böschung
- Mächtigkeit: 10 bis 20 m  
(überwiegend Lockermaterial)
- Absolute Mächtigkeit: 70 bis 100 m



# Bewegungsraten:

- 200 bis 267 mm/Jahr,
- im hochaktiven Bereich 800 bis 1500 mm/Jahr  
(Zeitraum: 11/03-09/05)

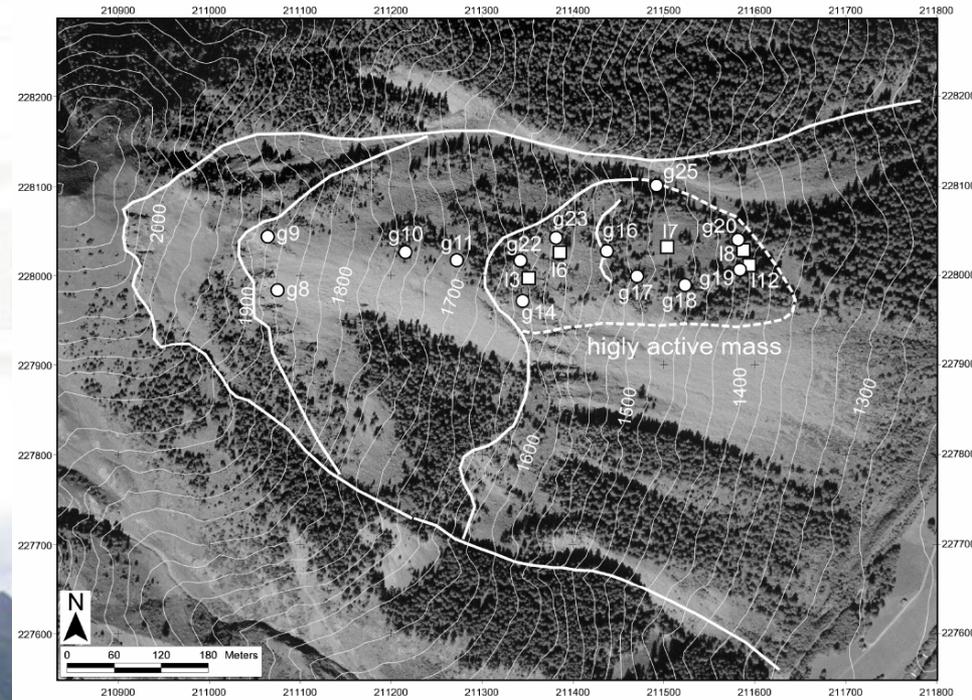


Abb.1: Positionen der Reflektoren (g) und terrestrischen Laserscannerfenster (l) (aus: Deformation behavior of deep-seated rockslides in crystalline rock (Zangerl et al., 2007))

# Betrag der Bewegungsvektoren

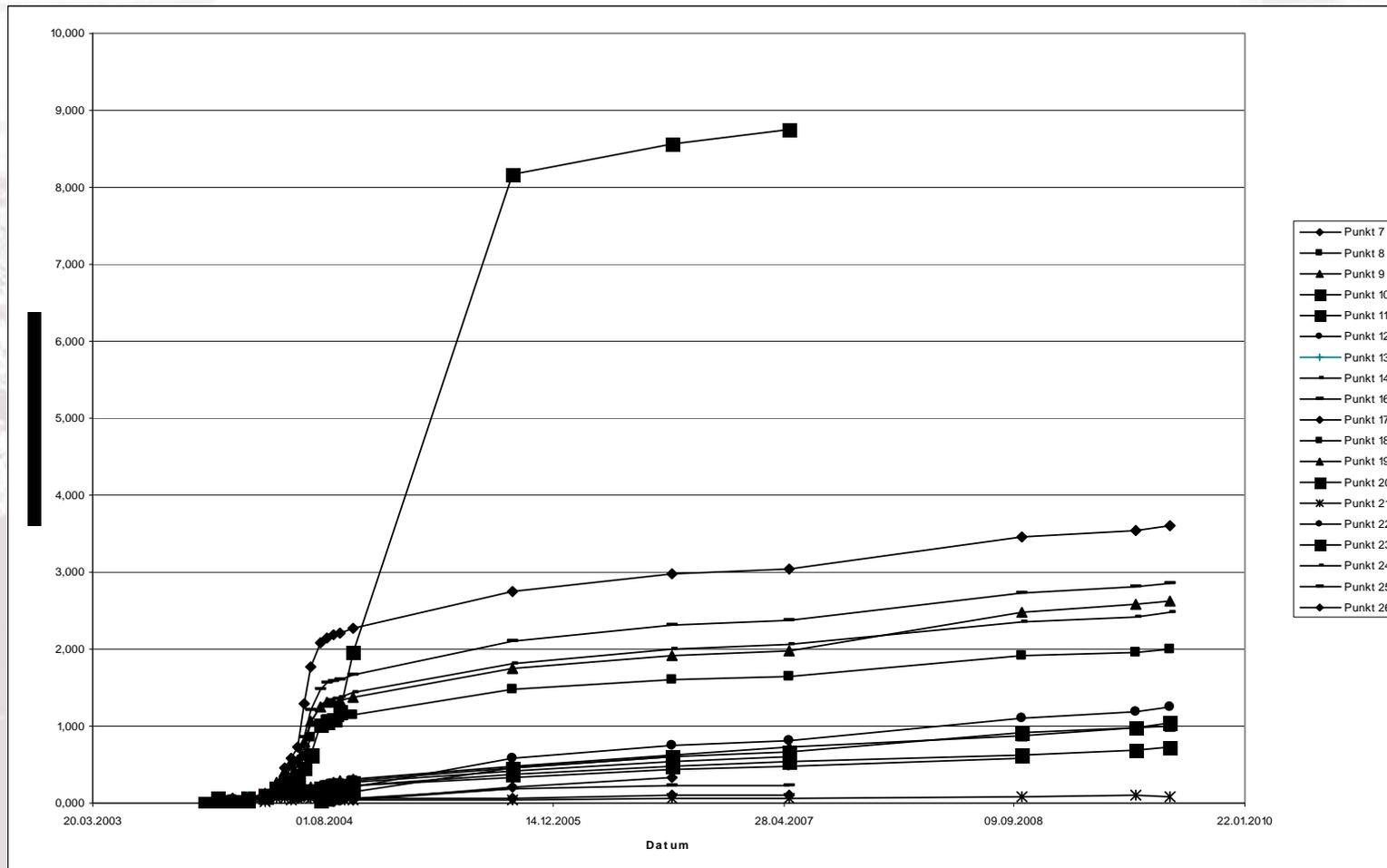


Abb.2: Betrag der Bewegungsvektoren seit 11/03 (Quelle: alpS)

# Projekt KASIP

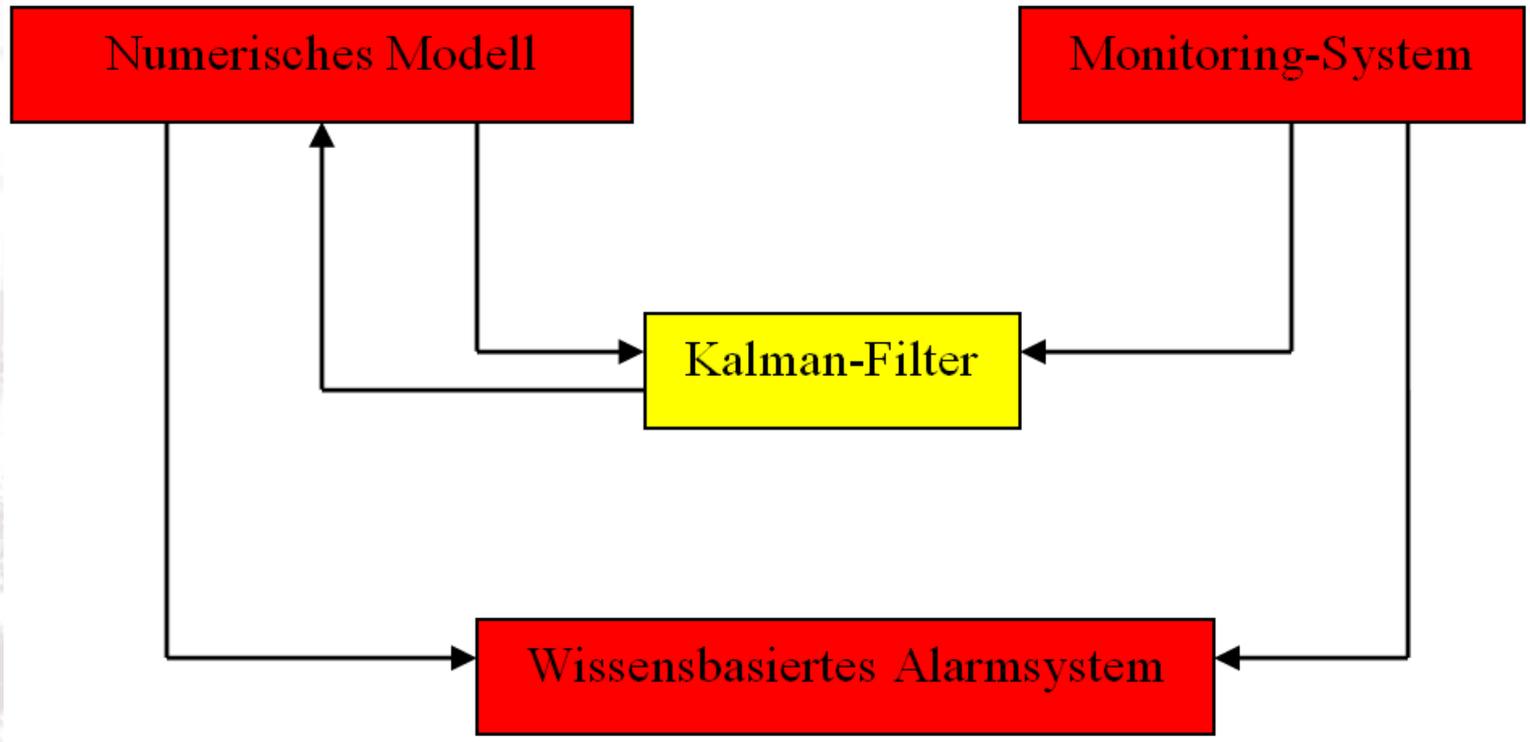


Abb.3: Projekt KASIP



# Finite Differenzen vs. Finite Elemente

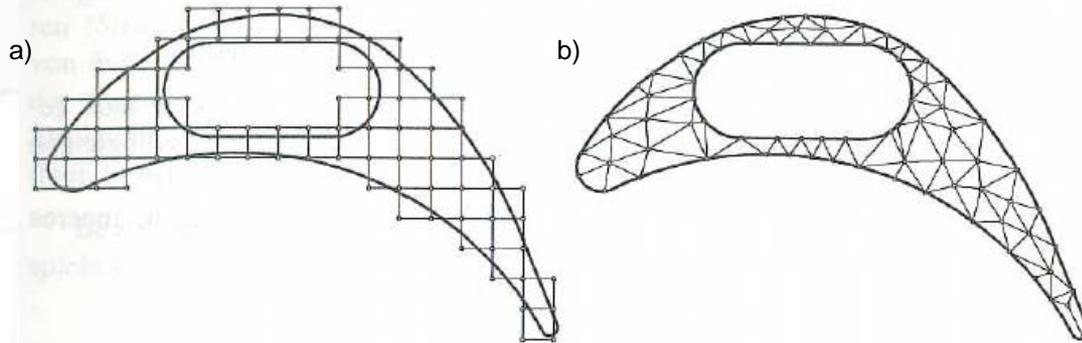


Abb.4: Diskretisierung einer Turbinenschaufel

a) finite Differenzen

b) finite Elemente

(aus: Finite Elemente für Ingenieure I (Betten, 1997))

	<b>FDM</b>	<b>FEM</b>
<b>Gittergeometrie</b>	- quadratisch, rechteckig	- flexibel
<b>Vorteile</b>	- nicht rechenintensiv bei einfachen Gebieten	- insbesondere bei geometrisch komplexen Gebieten - gute Erfassung der Randbedingung
<b>Nachteile</b>	- bei geometrisch komplizierten Gebieten unhandlich und aufwendig - Erfassung der Randbedingungen schwierig	- sehr rechenintensiv

# FLAC3D

- Numerische Berechnung von dreidimensionalen Kontinuumsmodellen unter Verwendung verschiedener elastischer und plastischer Materialmodelle
- Große Verformungen, Bruchzustände, plastisches Fließen können berücksichtigt werden

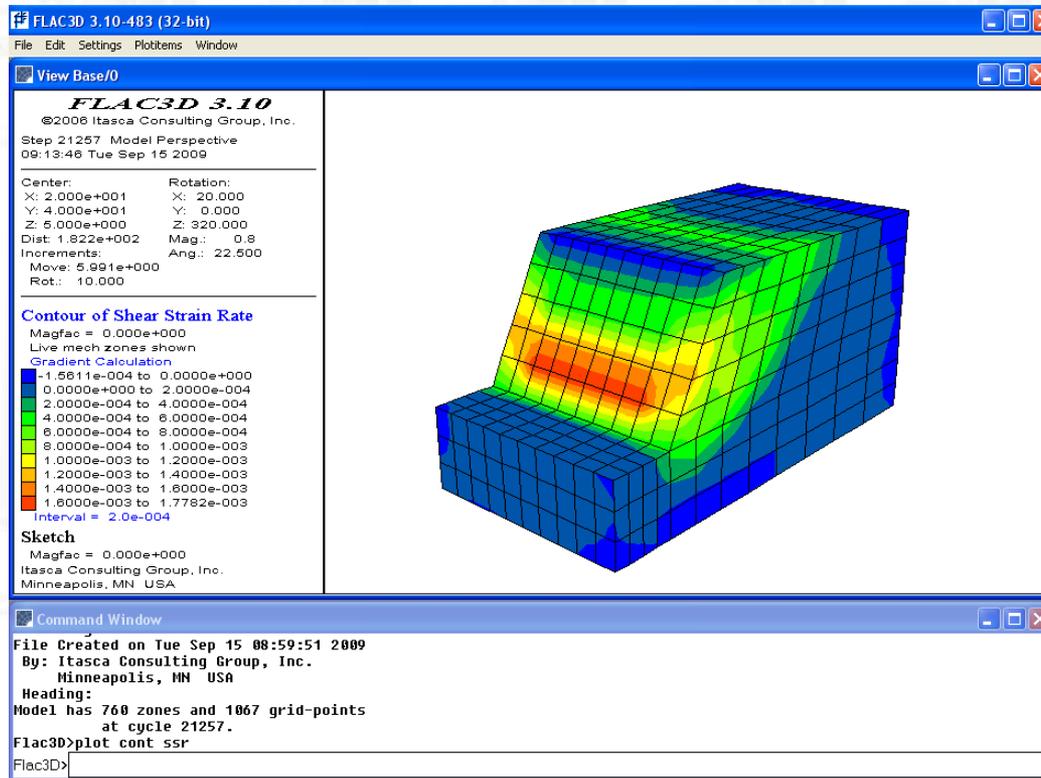


Abb.5: FLAC3D

# Berechnungsablauf in FLAC3D

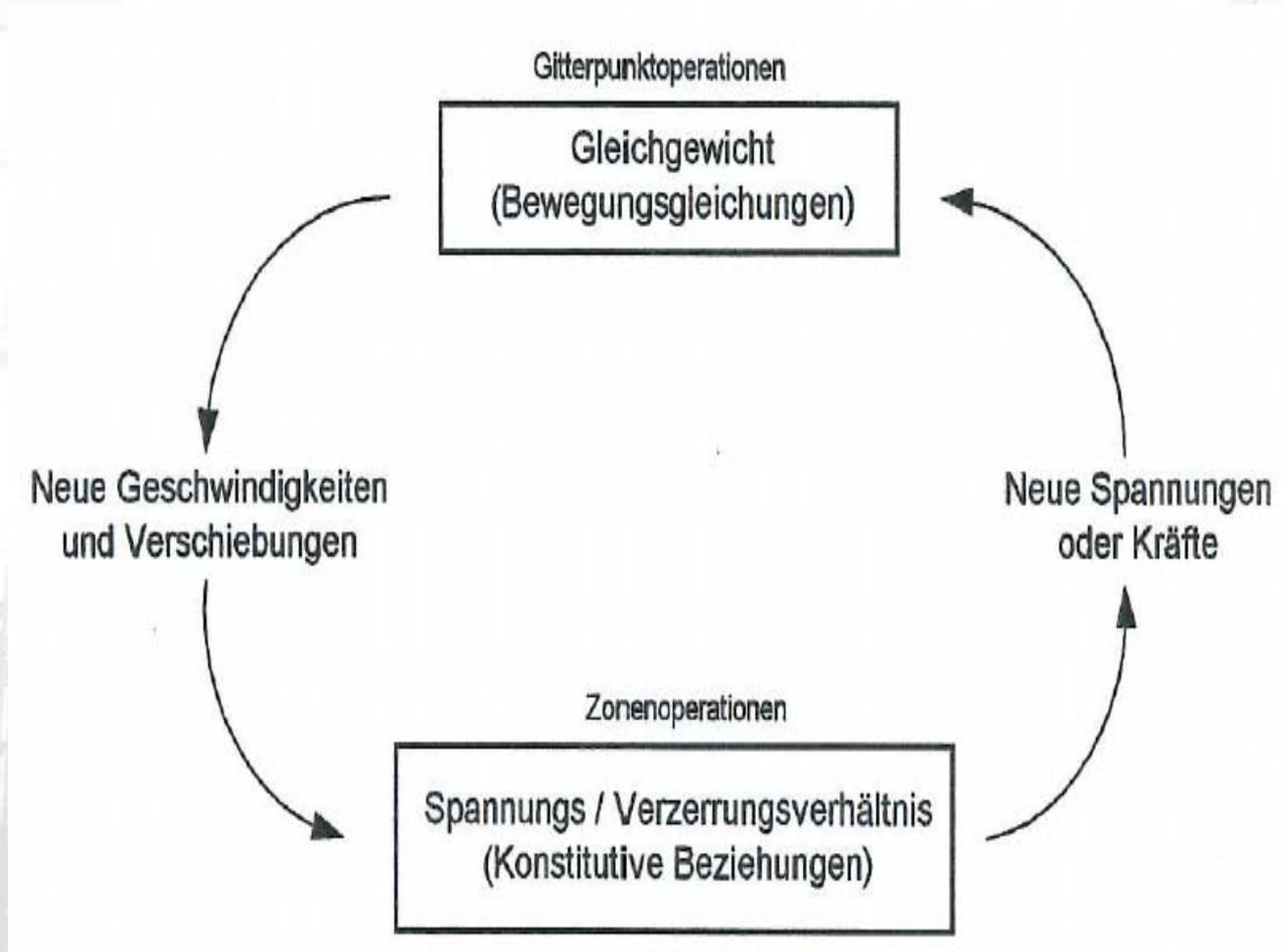


Abb.6: Prinzip des Berechnungskreislaufes in FLAC3D (aus: Ermittlungen von Sicherheitsfaktoren mittels des kontinuumsmechanischen Finiten Differenzen – Codes FLAC (Roth, 1999) )

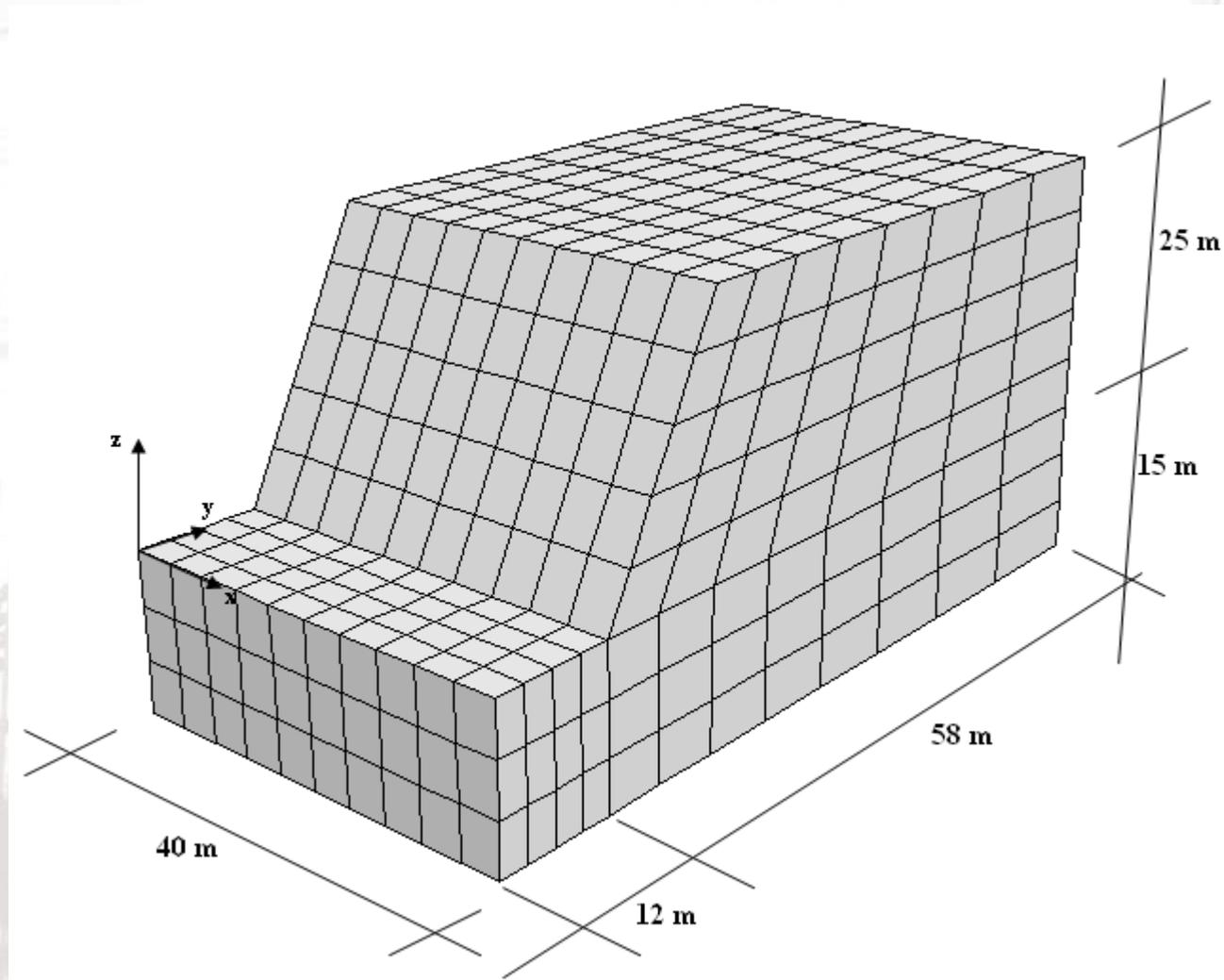


Abb.7: Böschungsgeometrie

# Filterstrategie

- Statisches System -> Trigger notwendig
- Problem: welche physikalische Größe kann als Trigger verwendet werden?
- Idee: 2 Materialparameter (Reibungswinkel, Kohäsion), wovon einer als Trigger verwendet wird; der andere wird geschätzt.
- Reibungswinkel (Trigger) wird über mehrere Epochen reduziert.
- Kohäsion geht als zu schätzender Parameter in den Zustandsvektor ein

# Kalman-Filter

Systemgleichung:  $\bar{y}_k = T_{k,k-1} \hat{y}_{k-1} + B_{k,k-1} u_{k-1} + S_{k,k-1} w_{k-1}$

Varianzfortpflanzung:  $\Sigma_{\bar{y}\bar{y},k} = T_{k,k-1} \Sigma_{\hat{y}\hat{y},k-1} T_{k,k-1}^T + B_{k,k-1} \Sigma_{uu,k-1} B_{k,k-1}^T + S_{k,k-1} \Sigma_{k,k-1} S_{k,k-1}^T$

Messgleichung:  $l_k = A_{y,k} \hat{y}_{k-1}$

Innovation:  $d_k = l_k - A_{y,k} \bar{y}_k$

Varianzfortpflanzung:  $\Sigma_{dd,k} = D_k = \Sigma_{ll,k} + A_{y,k} \Sigma_{\bar{y}\bar{y},k} A_{y,k}^T$

Schätzwert:  $\hat{y}_k = \bar{y}_k + K_k d_k$

Verstärkungsmatrix:  $K_k = \Sigma_{\bar{y}\bar{y},k} A_{y,k}^T D_k^{-1}$

Varianzfortpflanzung:  $\Sigma_{\hat{y}\hat{y},k} = \Sigma_{\bar{y}\bar{y},k} - K_k D_k K_k^T$

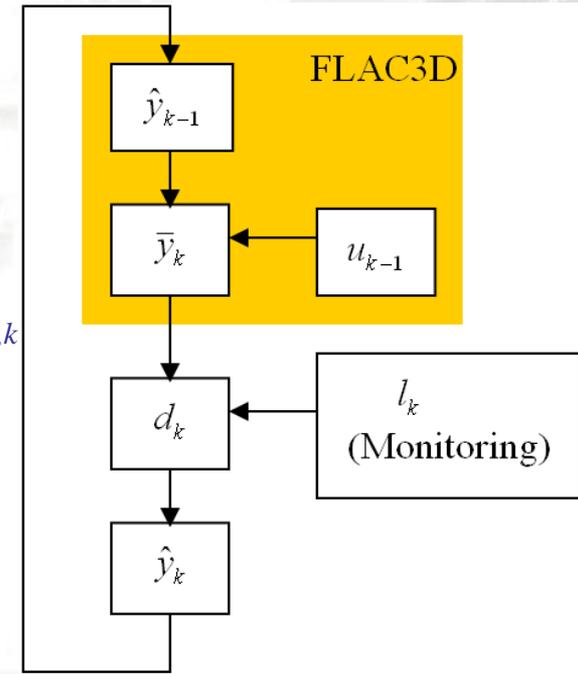


Abb.8: Prinzip des Filterablaufs

Grafische Darstellung des adaptiven Anteils (Kohäsion) im Filterverlauf

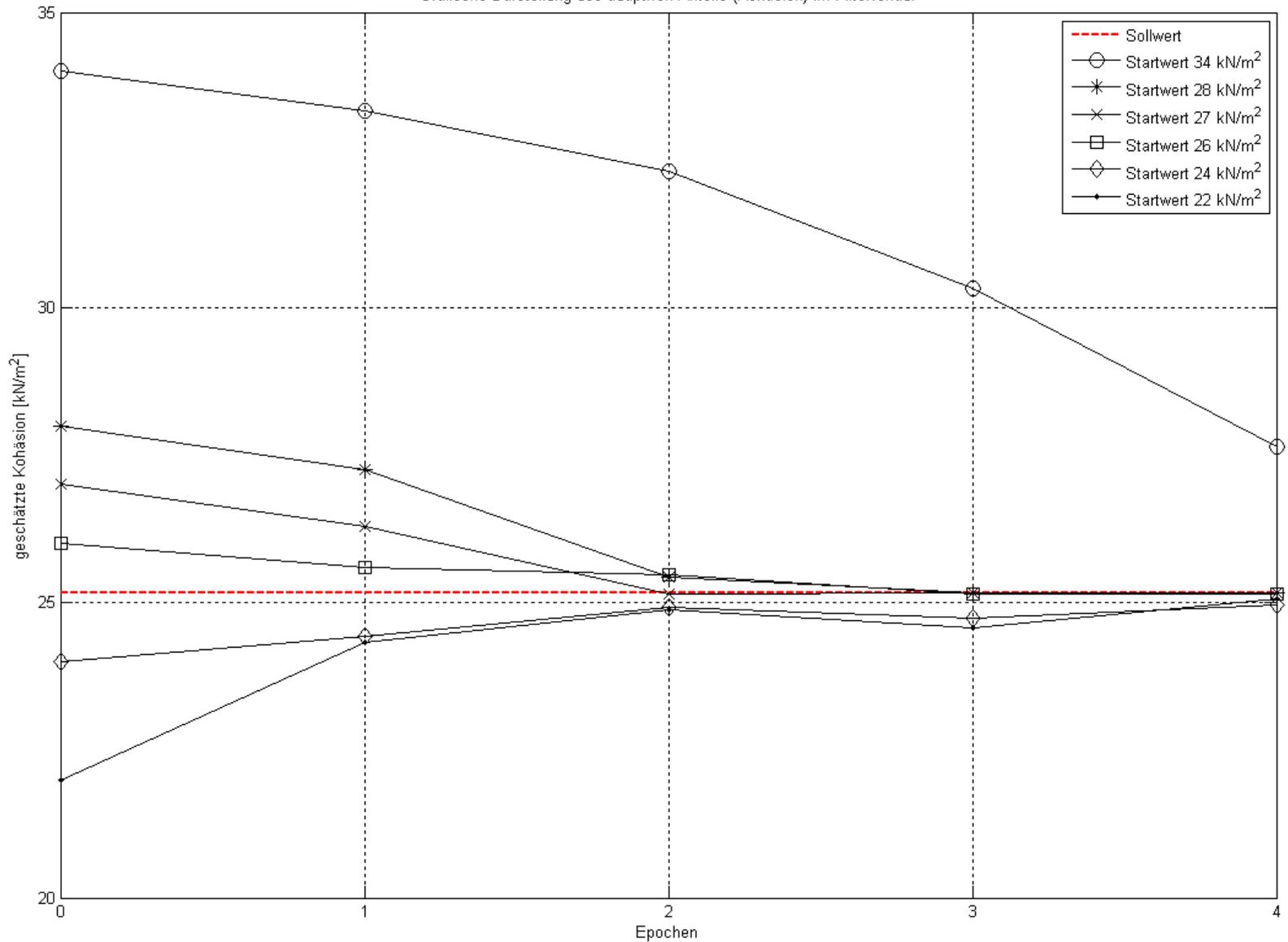


Abb.9: Änderung des Schätzwertes im Filterverlauf

# Ausblick

- Weitere Untersuchungen im statischen System
- Übergang zum dynamischen System
- Anwendung auf das numerische Modell des Testhangs mit großen Datenmengen
- Einbettung der Ergebnisse aus dem kalibrierten numerischen Hangmodell in das wissensbasierte Alarmsystem

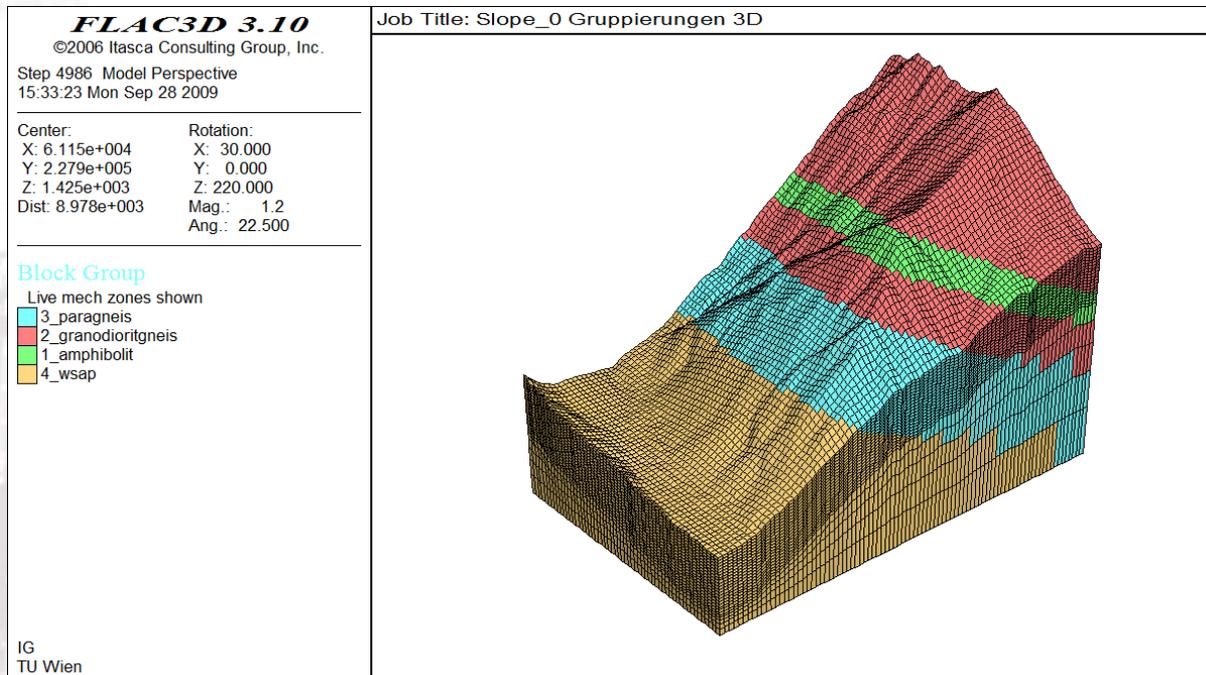


Abb.10: Messgebiet Steinlehen



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!