LMBV
Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH

gub Ingenieur AG

Wissenschaftlich-technische Untersuchung zur Beurteilung der Sicherheit gegenüber Geländeeinbrüchen von böschungsfernen Kippenflächen bei Grundwasseranstieg in verflüssigungsempfindlichen Böden - Sackungsfließen -

Referent: Dr.-Ing. Wilfried Hüls

am 07. April 2011

- Workshop „Geländebrüche auf Lausitzer Kippen“ -

Inhaltsübersicht

1. Zielsetzung und Vorgehensweise
2. Grundlagen und Stand der Forschung
3. Analytische Modellierung
4. Numerische Modellierung
5. Ausblick

Notwendigkeit des Vorhabens

Verflüssigungsempfindliches Kippenmaterial

- **Leitfaden** „Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen“ (**1998**)

Das Auftreten von Geländeeinbrüchen auf böschungsfernen Kippenflächen im Zusammenhang mit großräumigem Grundwasseranstieg macht eine Wiederaufnahme von Untersuchungsprogrammen zu speziellen Fragen des Geländeeinbruchs/Grundbruchs infolge Verflüssigung erforderlich, um den Mechanismus theoretisch exakt beschreiben und daraus praktische Schlussfolgerungen ziehen zu können.

- **Leitfaden** „Verflüssigungsgrundbruch“ (**2010**)

Offene geotechnische Probleme, die mit den klassischen erdstatischen Berechnungsverfahren nicht beantwortet werden können.

- **Vorgesehener Lösungsweg:**
  Mikromechanisch-hydraulische Modellierung des Bodens

Vorgehensweise (1)

Forschungskooperation Sackungsfließen BAF und GUB seit Mai 2010

Bearbeitungsteam (seitens BAF):

TU Bergakademie Freiberg, IfGT, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau
Projektleiter: Herr Prof. Dr. habil. Heinz Konietzky
Wiss. Mitarbeiter (Forschung/Promotion): Herr Dipl.-Geophys. Christian Jakob

„Grundlagen der numerischen Modellierung des Verflüssigungsverhaltens von Kippen des Braunkohlenbergbaus beim und nach dem Wiederaufgang von Grundwasser“

Bearbeitungszeitraum 2010 bis 2014
Finanzierung: Gewerbliche Wirtschaft und Fördermittel

Vorgehensweise (2)

Bearbeitungsteam (seitens GUB):

G.U.B. Ingenieur AG Büro Leipzig
Projektleiter: Herr Dr.-Ing. Dipl.-Math. Wilfried Hüls,
Sachverständiger für Geotechnik
Wiss. Betreuung: Herr Dr.-Ing. Dietmar Grießl, Vorstandsvors. der G.U.B. Ingenieur AG,
Sachverständiger für Geotechnik

„Wissenschaftlich-technische Untersuchung zur Berechnung der Sicherheit gegenüber Geländeeinbrüchen von böschungsfernen Kippenflächen bei Grundwasseranstieg in verflüssigungsempfindlichen Böden – Sackungsfließen –“

AG: LMBV mbH Zentrale und Betrieb Lausitz Senftenberg

Laufzeit: 2011 bis 2012
(2007 – 2010 Projekt Leitfaden Verflüssigungsgrundbruch)

Setzungsfließen - Verflüssigungsgrundbruch / Sackungsfließen

Verflüssigtes Kippenmaterial

Das Kippenmaterial kann infolge vorhandenen hydraulischen Potentials in eine Hohlform abfließen

Setzungsfließrutschung

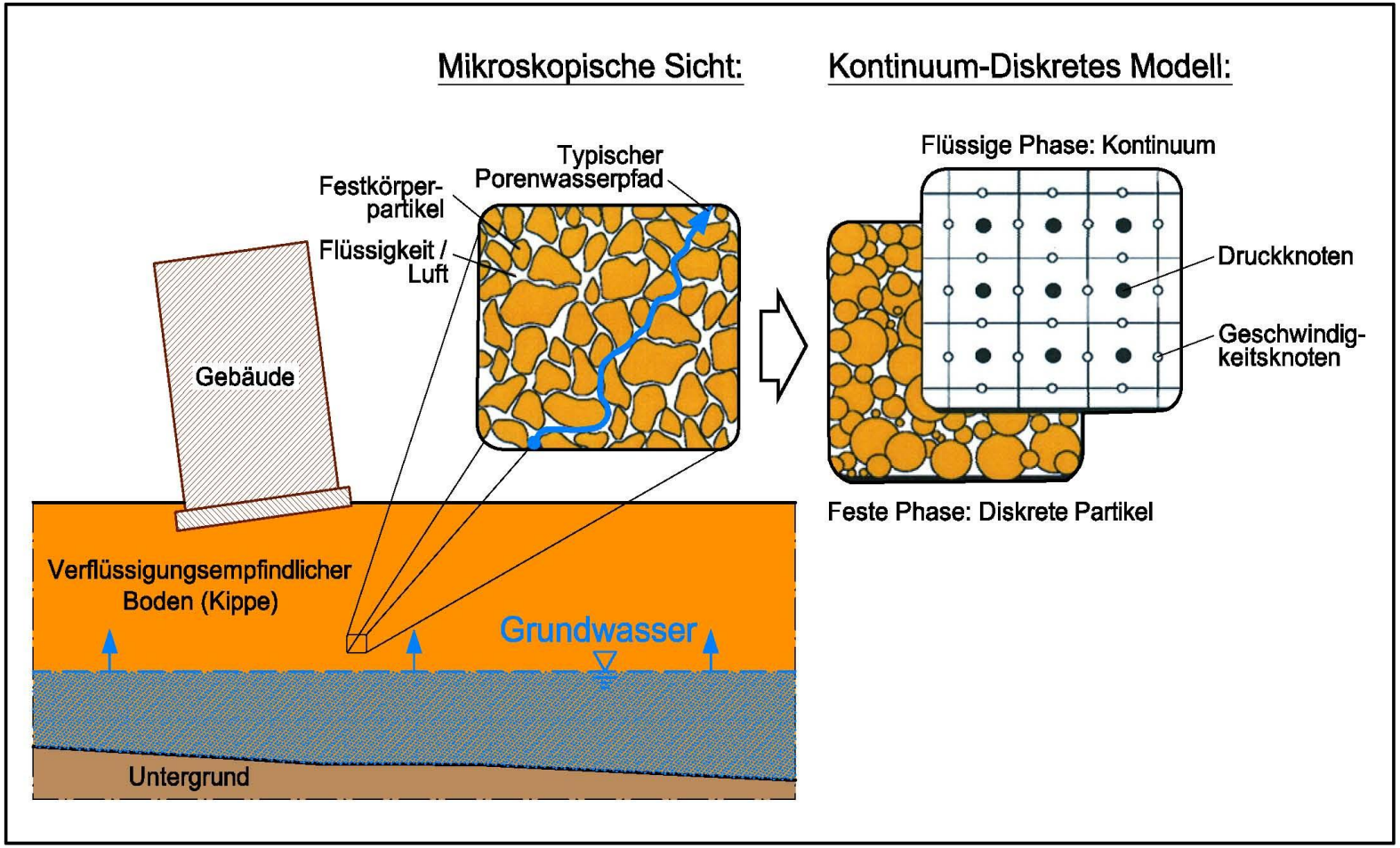
Das Kippenmaterial kann infolge fehlenden hydraulischen Potentials nicht abfließen

Verflüssigungsgrundbruch → **Schneeballeffekt**

Sackungfließen

Modell der mikromechanisch-hydraulischen Kopplung

Visualisierung der mikromechanisch-hydraulischen Kopplung



Anforderungen an die Modellierung (1)

Was muss das Modell leisten?

- Der Berechnungsalgorithmus muss alle während der Bewegung der Einzelpartikel sich einstellende Kontakte oder deren Aufhebung selbständig detektieren.
- Alle kinematischen Bewegungsmöglichkeiten sind für jedes Einzelpartikel permanent gewährleistet, wobei auch bei völliger Aufhebung der Kontakte sowie Neubildung von Kontakten eine physikalisch korrekte Bewegung der Partikel im physikalischen Feld erfolgt.

Welche Stoffgesetze sind erforderlich?

- Stoffgesetze für die einzelnen Partikel selbst (z. B. elasto-plastische Matrix),
- Stoffgesetze für die Wechselwirkung der Partikel untereinander (z. B. elasto-plastische Diskontinuitäten) sowie
- Stoffgesetze der Kopplung mit anderen Feldern (z. B. hydraulische Kopplung).

Anforderungen an die Modellierung (2)

Welche Einwirkungen müssen berücksichtigt werden?

- Natürliche / induzierte Seismizität (große Initiale)
- Statische / dynamische Beanspruchung (kleine Initiale)
- Zeitunabhängige / zeitabhängige Beanspruchung
- Alterungseffekt
- Grundwasserzutritt
- Porenwasserdruckänderungen

Welche Kriterien und Grenzwerte sind erforderlich?

- Übergang von lokaler zu globaler Verflüssigung
- Kurzzeit- /Langzeitstandsicherheit

Stand von Wissenschaft und Technik (1)

In der modernen Bodenmechanik müssen wissenschaftlich-technische Untersuchungen zunehmend mittels neuer numerischer Methoden durchgeführt werden. Auf der Basis der Methode der Distinkten Elemente kann der Particle Flow Code (PFC) die Bewegung und Wechselwirkung von belasteten Elementeensemblen modellieren.

In der internationalen Erdbebenforschung wird dazu von Fortschritten bei der numerischen Modellierung des Sackungsfließens berichtet, wobei derzeit am EERI Diskussionsbedarf zu einer Standard-Mongraphie über die Interpretation von CPT-Sondierungen entstanden ist.

Modellversuche und statistisch gestützte Betrachtungen zu Sackungen von Kippen wurden an der TU BAF in den vergangenen Jahren durchgeführt.

Deutlich wird hierbei der fehlende Lösungsansatz zur numerischen Modellierung des Sackungsfließens bei Grundwasseranstieg sowie bei geringen dynamischen Initialen.

Patente sind für diesen Lösungsansatz ebenfalls nicht bekannt.

Stand von Wissenschaft und Technik (2)

Nationale und internationale Kooperation

- Remedial Measures against Soil Liquefaction, from Investigation and Design to Implementation, Japanese Geotechnical Society, 1998
- A Coupled Continuum-Discrete Fluid-Particle Model for Granular Soil Liquefaction, U. El Shamy, Phil. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, 2004
- Liquefaction of Saturated Granular Soil Systems: A Micro-Mechanical Approach, M. Zeghal & U. El Shamy, Workshop on Micro-Geomechanics across Multiple Scales, Cambridge, England, March 2005
- Soil Liquefaction During Earthquakes, I. M. Idriss & R. W. Boulanger, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland CA, USA, 2008
- Ad Hoc Committee Report on Soil Liquefaction During Earthquake, T. D. O´Rourke, EERI, USA, March 2011
- Grundlagen der numerischen Modellierung des Verflüssigungsverhaltens von Kippen des Braunkohlenbergbaus beim und nach dem Wiederaufgang von Grundwasser, **TU Bergakademie Freiberg**, IfGT, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau seit 2010
- PFC2D- and PFC3D-Particle Flow Code, **ITASCA** Consulting Group Inc., Minneapolis, MN, USA, 2008 (seit 2011 Programmierung erforderlicher Softwarekomponenten)

Lösungsalgorithmus

Modellierung des Bodens als Mehrphasensystem (fest, flüssig) durch Überlagerung/Kopplung mit einem Strömungsfeld (Grundwasseranstieg)

Die Partikel des idealisierten Korngefüges werden durch Verbindungen an ihren Berührungspunkten zu einem Festkörper verknüpft, der wiederum durch eine progressive Schädigung der Bindungen zerstört werden kann.

In Kopplung mit einem numerischen Lösungsalgorithmus für die Strömungsgleichungen sowie für den Mechanismus der Porenwasserdruckänderung unter Verformungseinfluss ist die Modellierung von Sackung und Verflüssigungsgrundbruch möglich.

Theoretisches Basismodell:

Pore Fluid Model

- Averaged Navier-Stokes equations (incompressible inviscid fluid, Jackson 2000):

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla.(n\bar{\mathbf{v}}_\mathrm{f}) = 0$$

$$\rho_\mathrm{f}\left(\frac{\partial(n\bar{\mathbf{v}}_\mathrm{f})}{\partial t} + \nabla.(n\bar{\mathbf{v}}_\mathrm{f}\bar{\mathbf{v}}_\mathrm{f})\right) = -n\nabla\bar{p}_\mathrm{f}\boldsymbol{\delta} - \bar{\mathbf{f}}_{\mathrm{f-p}} + n\rho_\mathrm{f}\mathbf{g}$$

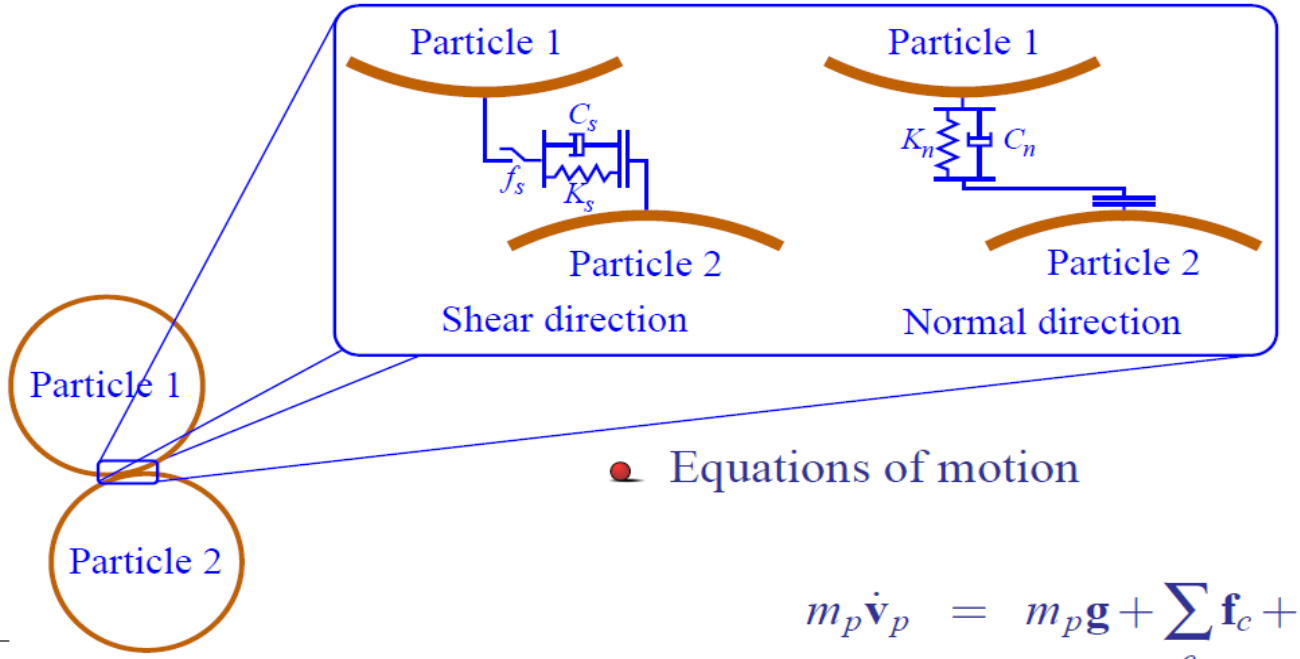
- Interaction term (Ergun 1952):

$$\bar{\mathbf{f}}_{\mathrm{f-p}} = \left(150\frac{\mu_\mathrm{f}(1-n)^2}{n\tilde{d}_\mathrm{p}^2} + 1.75\frac{(1-n)\rho_\mathrm{f}|\bar{\mathbf{v}}_\mathrm{f}-\bar{\mathbf{v}}_\mathrm{p}|}{\tilde{d}_\mathrm{p}}\right)(\bar{\mathbf{v}}_\mathrm{f}-\bar{\mathbf{v}}_\mathrm{p})$$

Particle Model

Theoretisches Basismodell

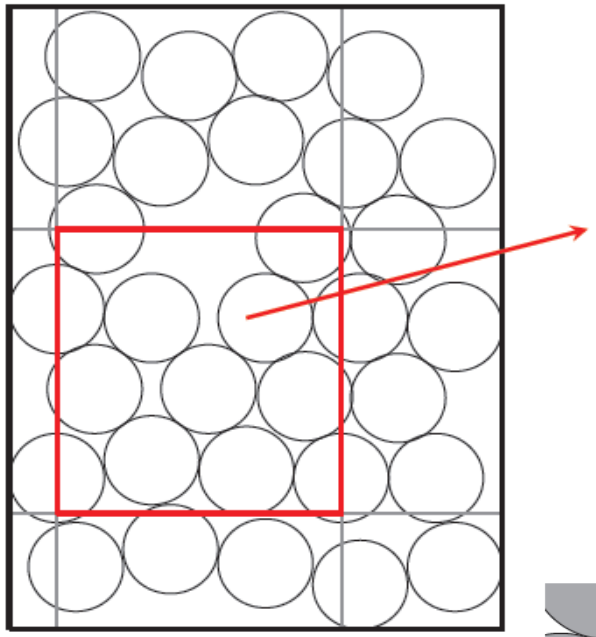
Solid phase: discrete element method



- Equations of motion

$$m_p \dot{\mathbf{v}}_p = m_p \mathbf{g} + \sum_c \mathbf{f}_c + \left(-\nabla \bar{p}_\mathrm{f} + \frac{\bar{\mathbf{f}}_{\mathrm{f-p}}}{1-n} \right) V_p$$

$$I_p \dot{\boldsymbol{\omega}}_p = \sum_c \mathbf{r}_c \times \mathbf{f}_c$$



Erweiterung des Basismodells

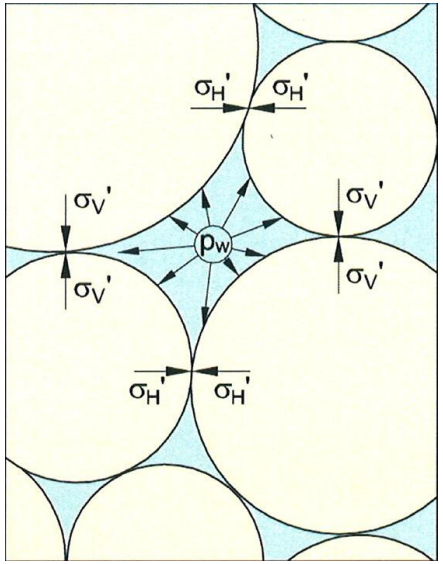
Fluidgeschwindigkeit $\vec{v}_f$

Partikelgeschwindigkeit $\bar{v}_p = \frac{1}{N}\sum_i \vec{v}_p^i$

Partikeldurchmesser $\bar{d} = \frac{1}{N}\sum_i 2R_i$

Porosität $\epsilon = 1 - \frac{V_P}{V}$

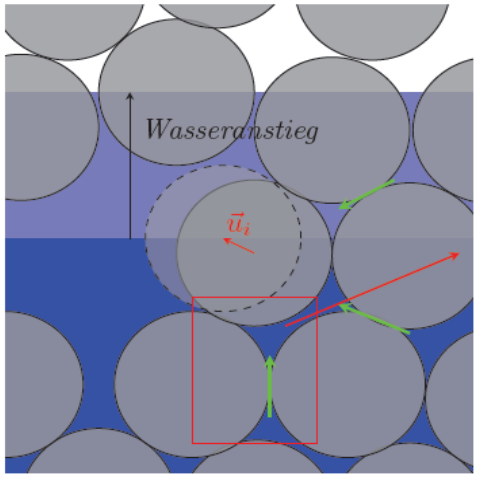
Fluiddruck p_f

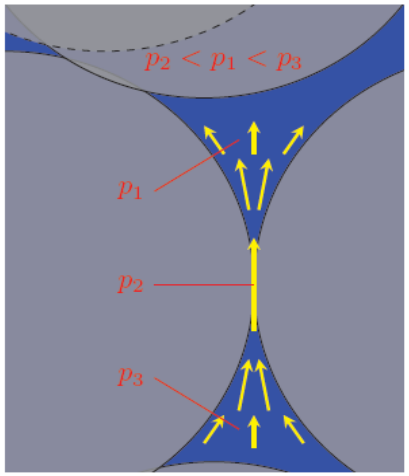


Totalverflüssigung $p_w \geqq \sigma_V'$

Teilverflüssigung $p_w \geqq \sigma_H'$

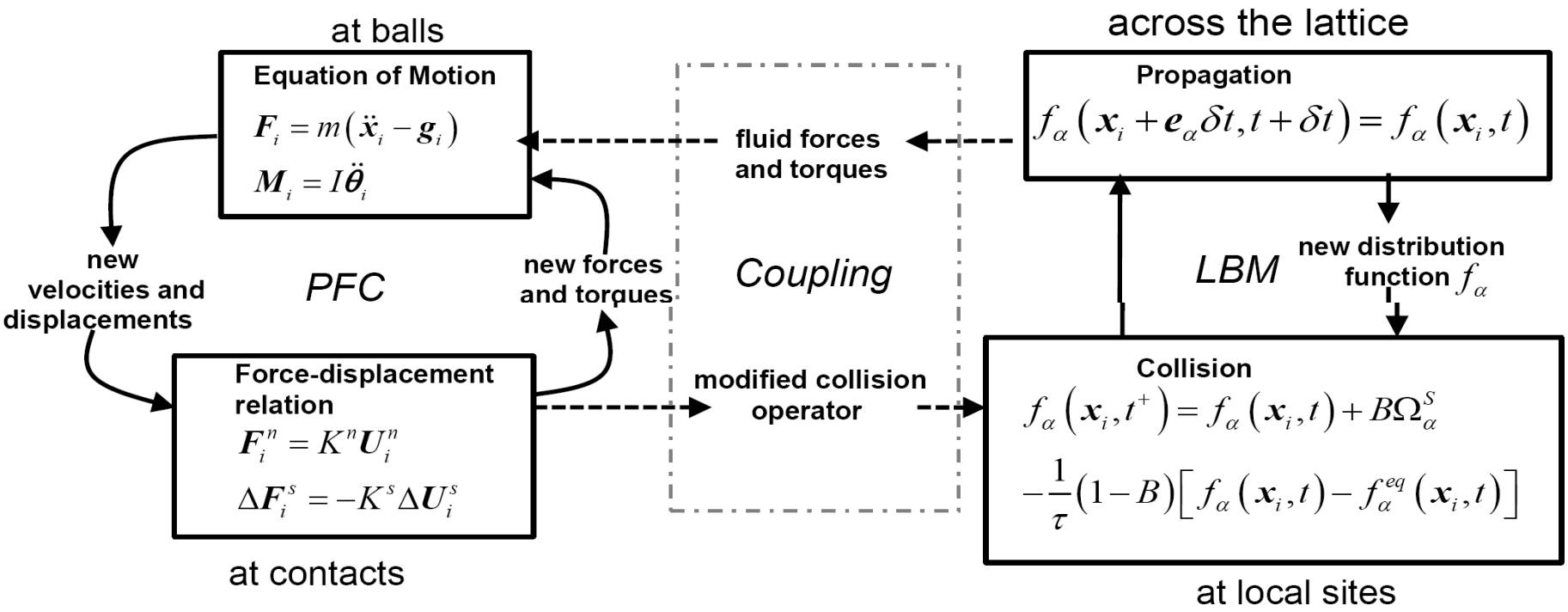
Mikromechanische Prozesse bei Grundwasseranstieg





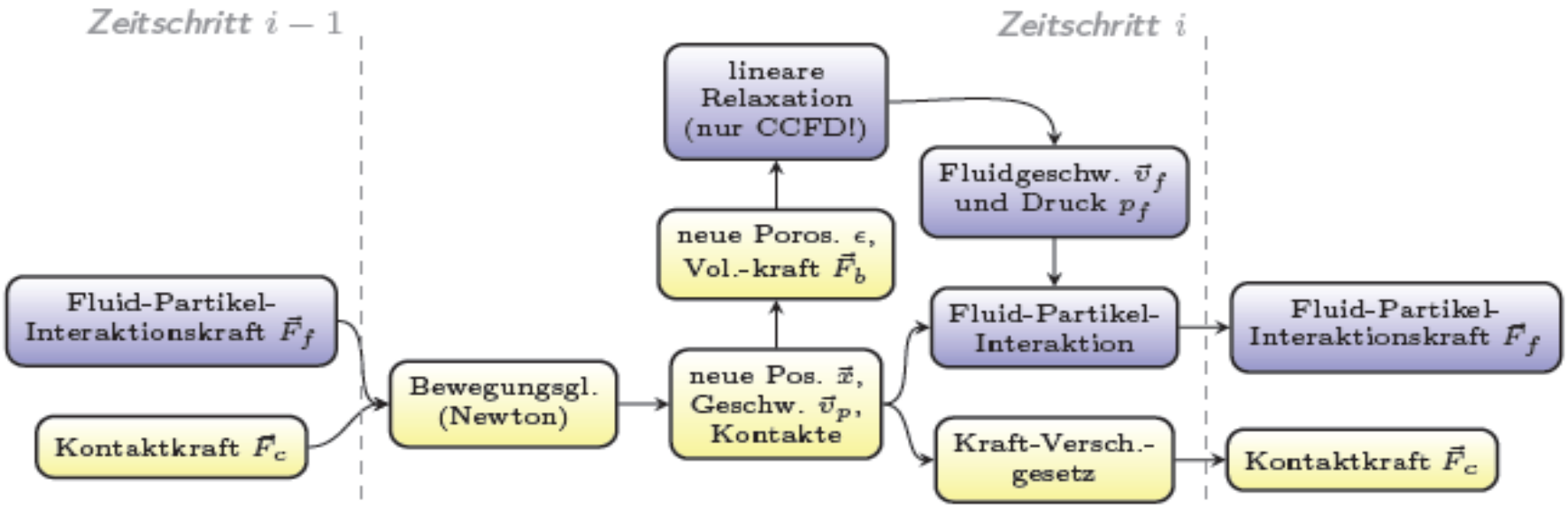
Porenwasserdruck und Wassergeschwindigkeit zwischen Körnern

Schematische Darstellung des Lösungsalgorithmus



- Differentialgleichungssysteme
- konkrete Stoffgesetze sind zu entwickeln

Inkrementelle Lösung der Differentialgleichungssysteme



- Inkrementelle Lösung der DGl. über Zeitschrittverfahren
- Gleichungslöser sind zu entwickeln und zu programmieren

Software zur Modellierung (1)

Particle Flow Code (PFC) der Softwarefirma ITASCA

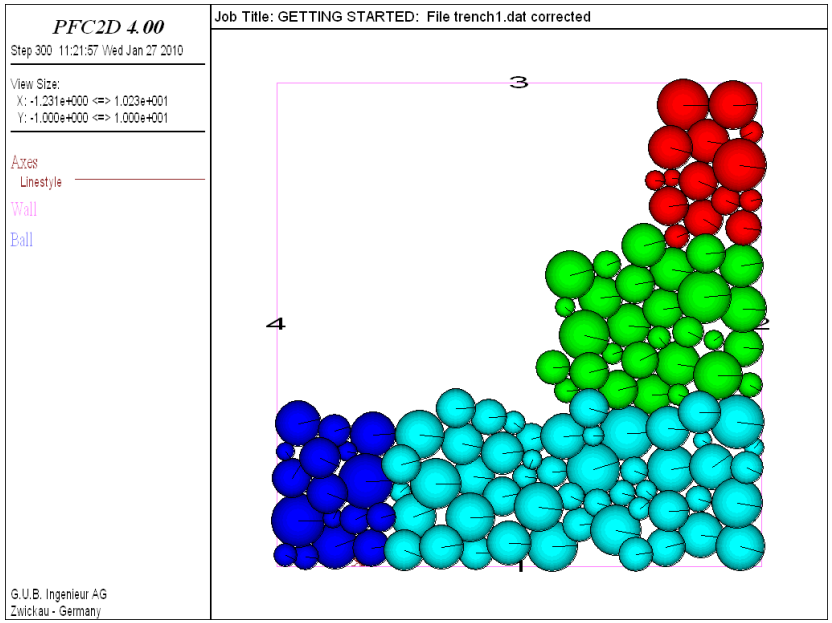
Annahmen zum numerischen Modell

- Idealisierung des Korngefüges mittels kugelförmiger Partikel.
- Die Partikel selbst sind nicht deformierbar, sondern starr.
- Die Deformierbarkeit wird generell durch Stoffgesetze zwischen den Partikeln erreicht.
- Geometrisch kompliziertere Elementarbausteine werden durch den Zusammenschluss mehrerer Kugelelemente bzw. Wandelemente hergestellt, die dann wiederum einen neuen Elementarbaustein (Klumpen) bilden.

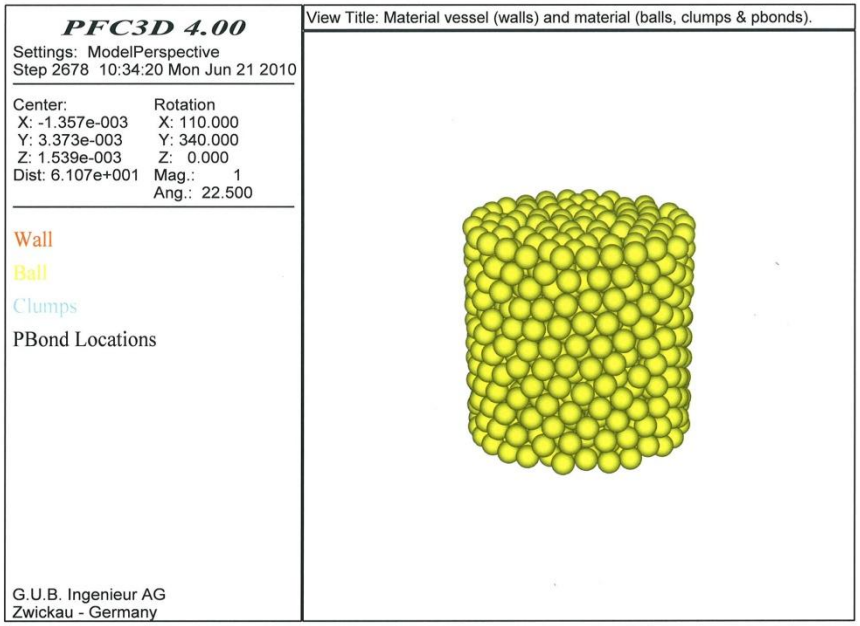
Beispiele:

Software zur Modellierung (2)

Particle Flow Code (PFC) der Softwarefirma ITASCA



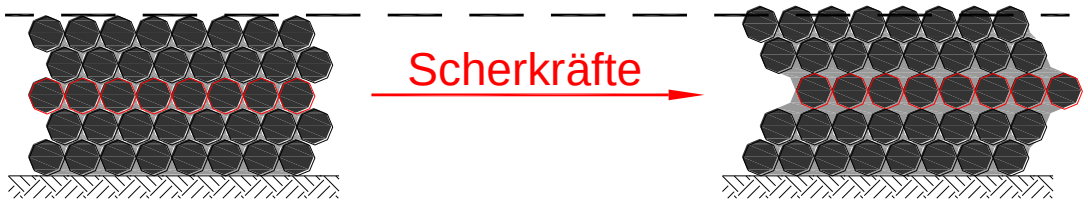
2-dimensionale Modellierung



3-dimensionale Modellierung

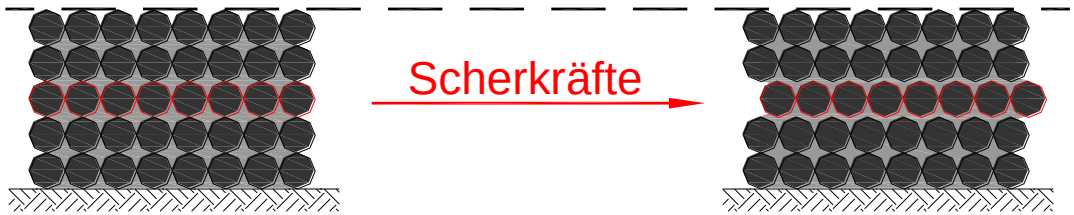
Boden bei Scherbeanspruchung

Sand, dichte Lagerung

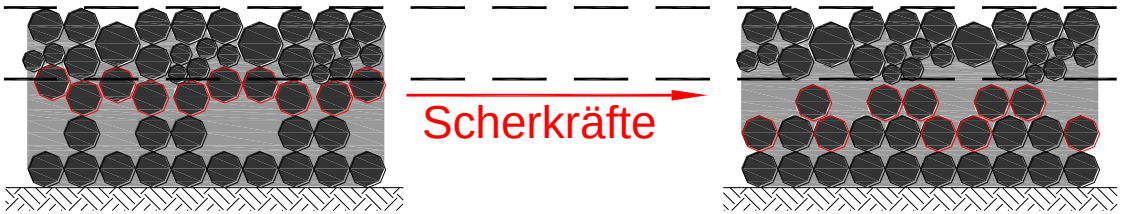


Auflockerung, Porenwasser-unterdruck

Sand, lockere Lagerung

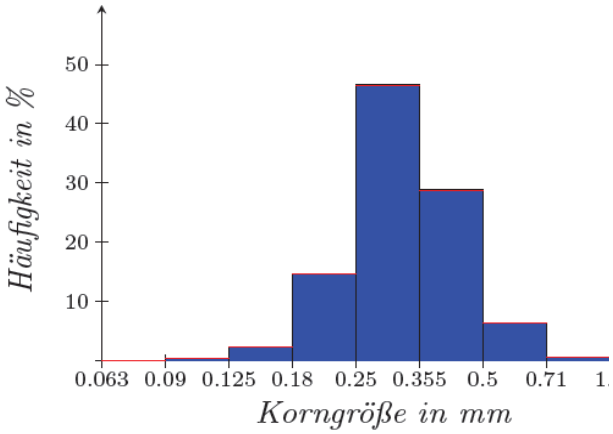


Verdichtung, Porenwasserüber-druck



Zusammenbruch der Struktur

Partikelmodell bei Gravitationsbelastung



Testsand H32:

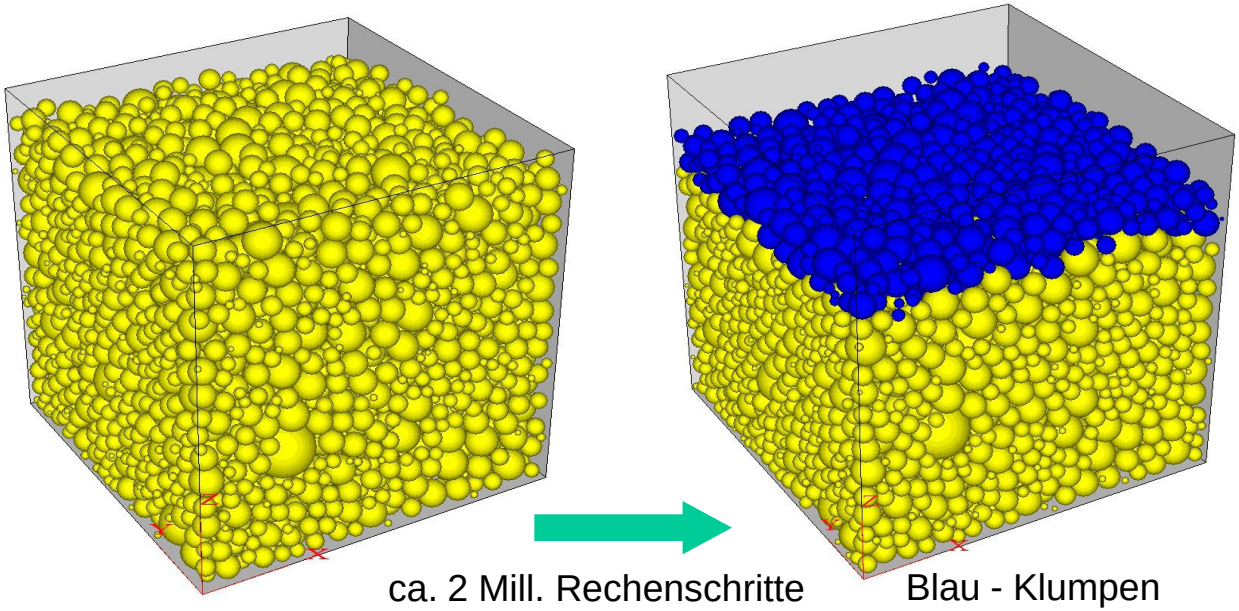
$G = 2{,}9 \times 10^6\ Nm^{-2}$

$\nu = 0{,}31$

Kornverteilung s. o.

6500 Partikel

Anfangsporosität $n_a = 37\ \%$ → Restporosität $n_r = 30\ \%$

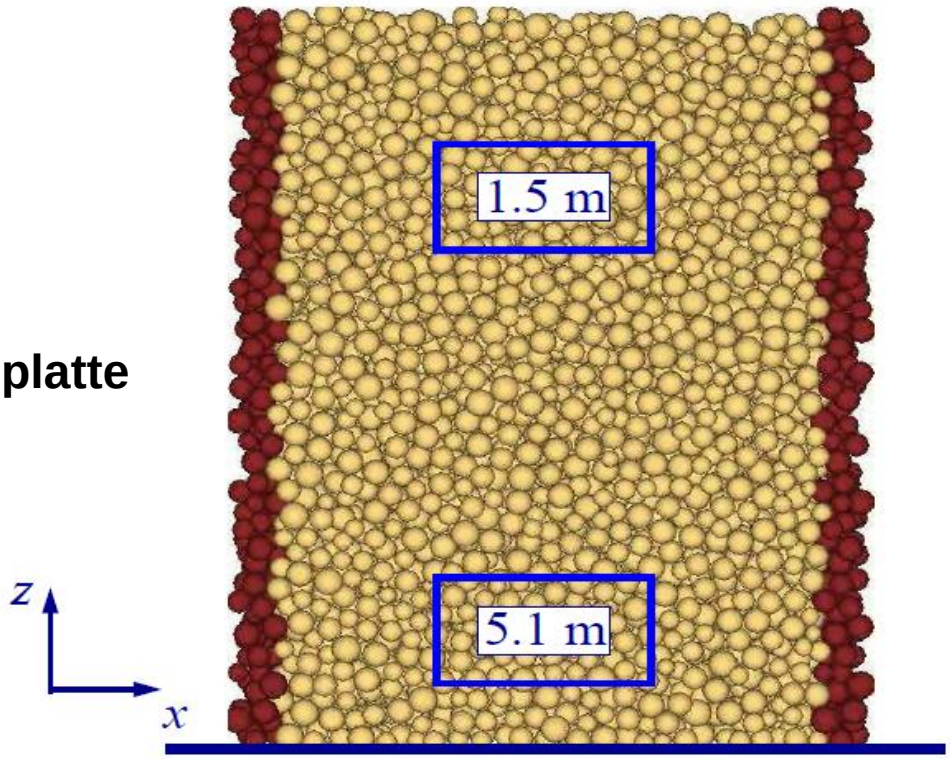


ca. 2 Mill. Rechenschritte für 5 sec. Realzeit

Blau - Klumpen
gelb - Einzelpartikel

Sackung bei lateraler dynamischer Anregung

Dynamische Anregung der Bodenplatte
(Literaturbeispiel mit Videoclip)



Offene Fragen

Welche Kennwerte / Kennwertkombinationen sind verantwortlich ?

z. B.:
- klassische bodenmechanische Parameter
- Parameter der Wechselwirkung im Korngefüge
- Dynamische Bodenkennwerte

welche Laboruntersuchungen und in situ Untersuchungen sind erforderlich für Kriterien / Grenzwerte ?

z. B.:
- Zentrifuge
- Resonant-Column-Test
- CPT-Tests

Fortführung des Untersuchungsprogramms:

- Ausbau der nationalen und internationalen Wissenschaftskooperation,
- Präzisierung der wissenschaftlichen Grundlagen zur analytischen Beschreibung und numerischen Modellierung des Sackungsfließens,
- Ableitung der erforderlichen Stoffgesetze und benötigter modelltechnischer Kennwerte,
- Entwicklung bzw. Programmierung der erforderlichen numerischen Software-Module für den Rechencode,
  - Coupled Computational Fluid Dynamics (CCFD),
  - Lattice-Boltzmann-Method (LBM),
- Entwicklung des Prognosemodells sowie Test- und Vergleichsrechnungen:
  - Kalibrierung des Modells anhand der Eingangsparameter,
  - Modellanwendung und Verifizierung anhand in situ Vorgaben.

Zum Videoclip

Wir bedanken uns für Ihre

Aufmerksamkeit!

www.gub-ing.de

G.U.B. Ingenieur AG • Katharinenstraße 11 • 08056 Zwickau
Tel.: +49 (0) 375 271750 • Fax: +49 (0) 375 27175-1299

LMBV
Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH

gub Ingenieur AG