

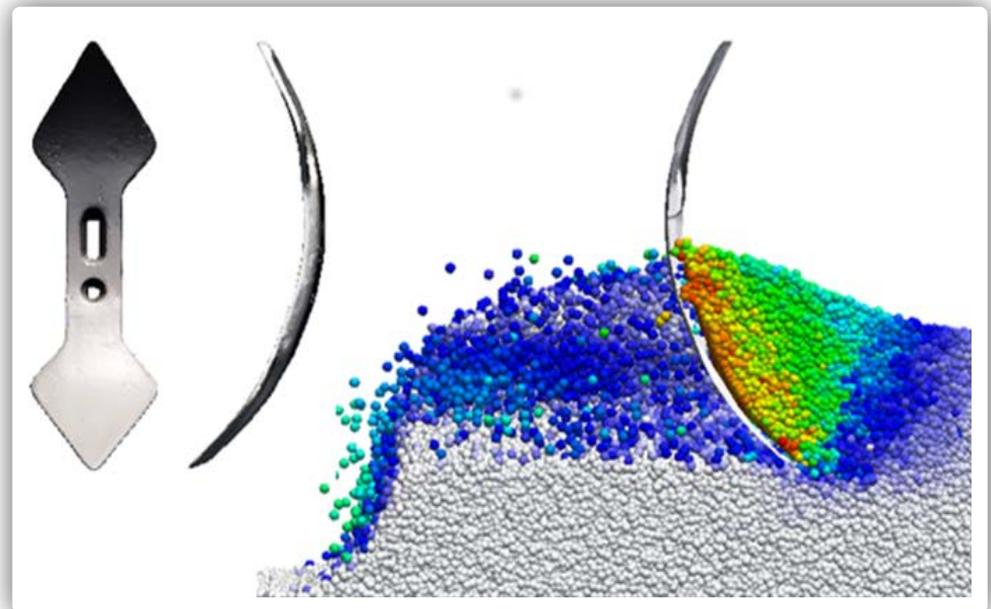
Analyse von Grabprozessen durch systematische Nachbildung maschineller stoffgebundener Arbeitsprozesse mittels DEM

Dr.-Ing. Xin Wu, Institut für Landtechnik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
 Dipl.-Ing. Andreas Prüfer, Institut für Bau- und Landmaschinentechnik Köln, TH Köln
 Dipl.-Ing. Jan Daniel Schendel, Valmet automotive GmbH

Technology
Arts Sciences
TH Köln

Vortragender:
Dipl.- Ing. Andreas Prüfer
Institut für Bau- und
Landmaschinentechnik
TH Köln

Dresden, 21.09.2018



Gliederung

1. Einleitung

2. Konzept der Vorgehensweise

3. Implementierung des Konzeptes

(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)

➤ 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche

➤ 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren

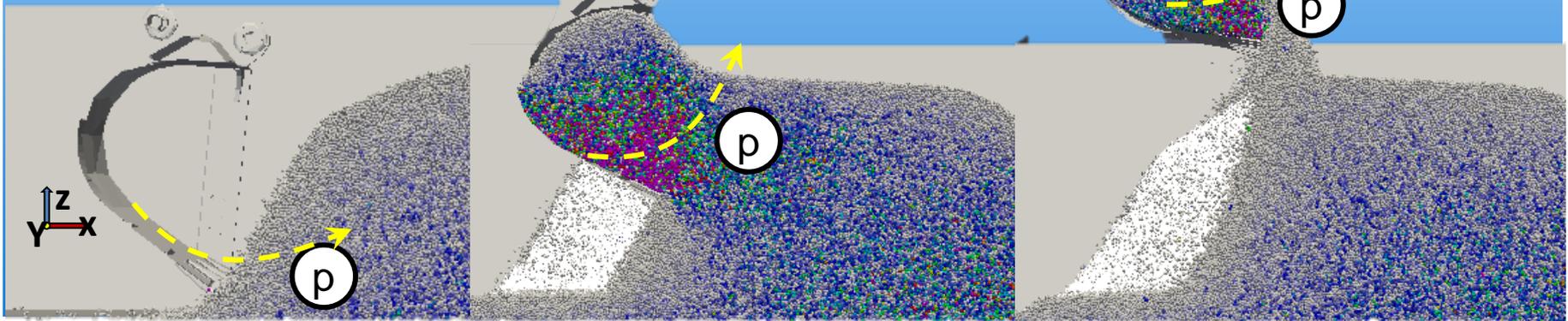
➤ 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse

4. Zusammenfassung und Ausblick

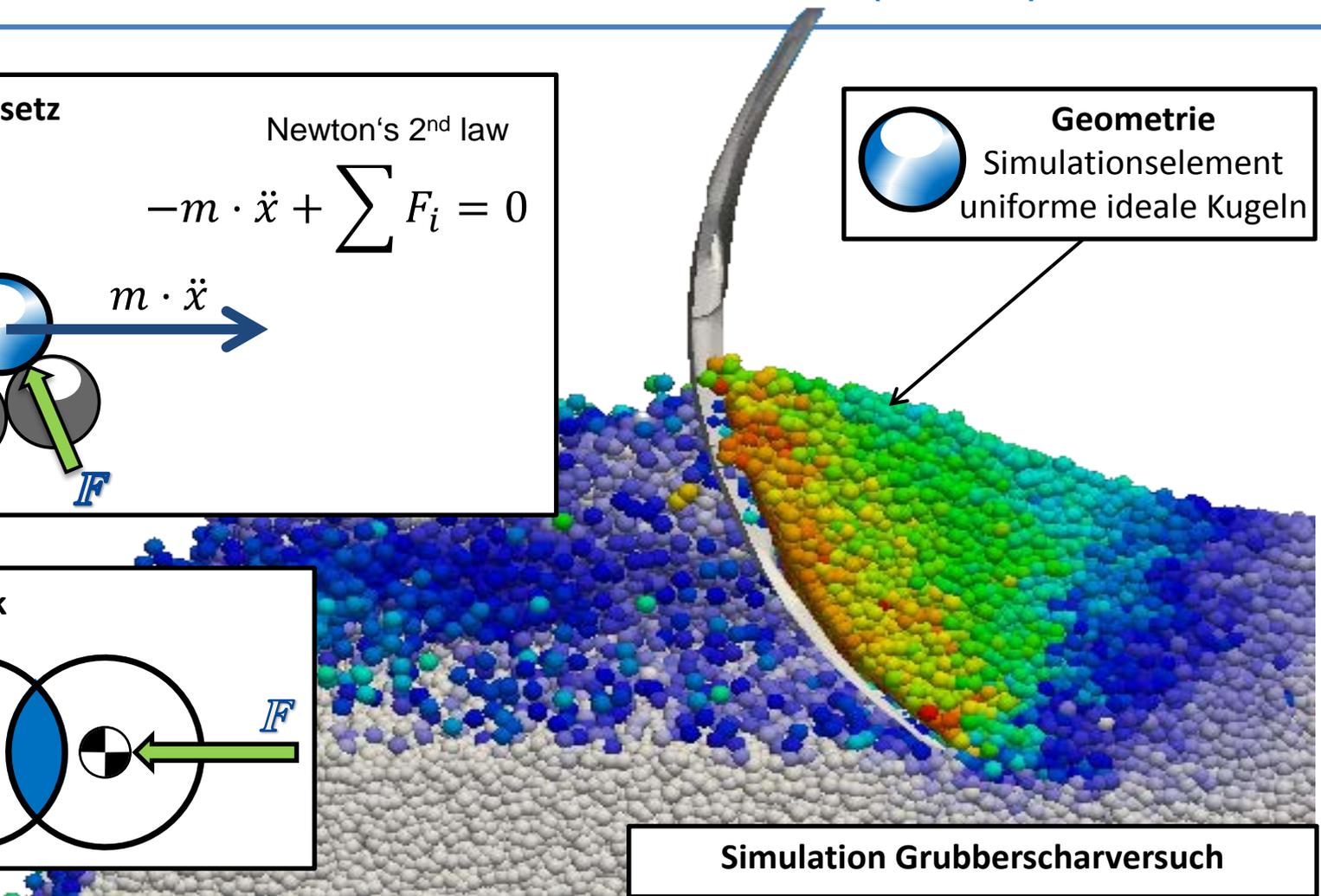
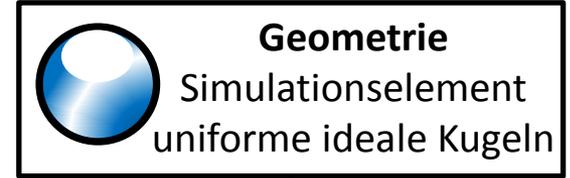
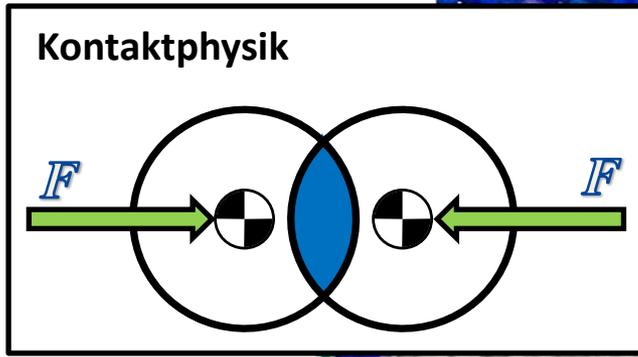
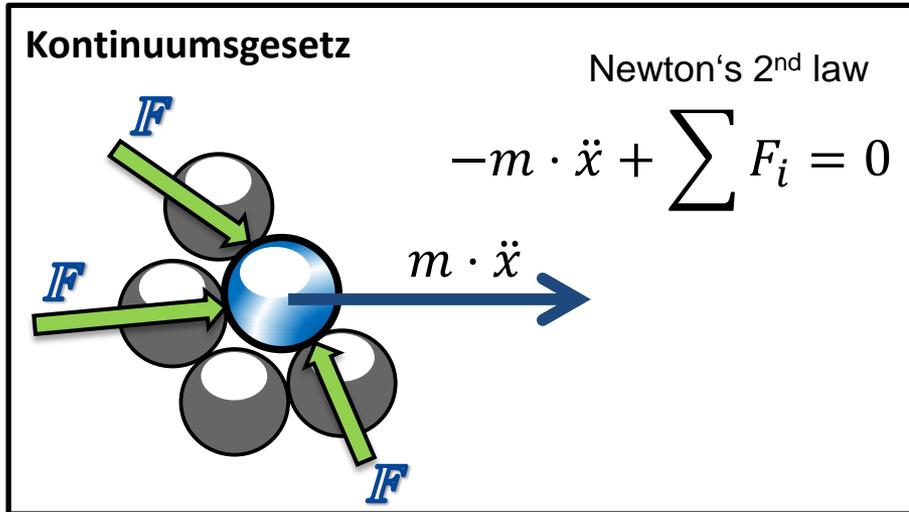
Maschineller stoffgebundener Arbeitsprozess

Begriffe und Zielstellung:

- (w) Arbeitswerkzeug (Löffel)
- (e) Arbeitsobjekt (Erdstoff)
- (p) Arbeitsprozess (Graben)
- (v) Charakteristisches Verhalten
- ⇒ Interaktion Werkzeug-Stoff
- ⇒ Energetische Betrachtung
- ⇒ Technologische Beurteilung



Diskrete Elemente Methode (DEM)



Simulation Grubberscharversuch

Gliederung

1. Einleitung

2. Konzept der Vorgehensweise

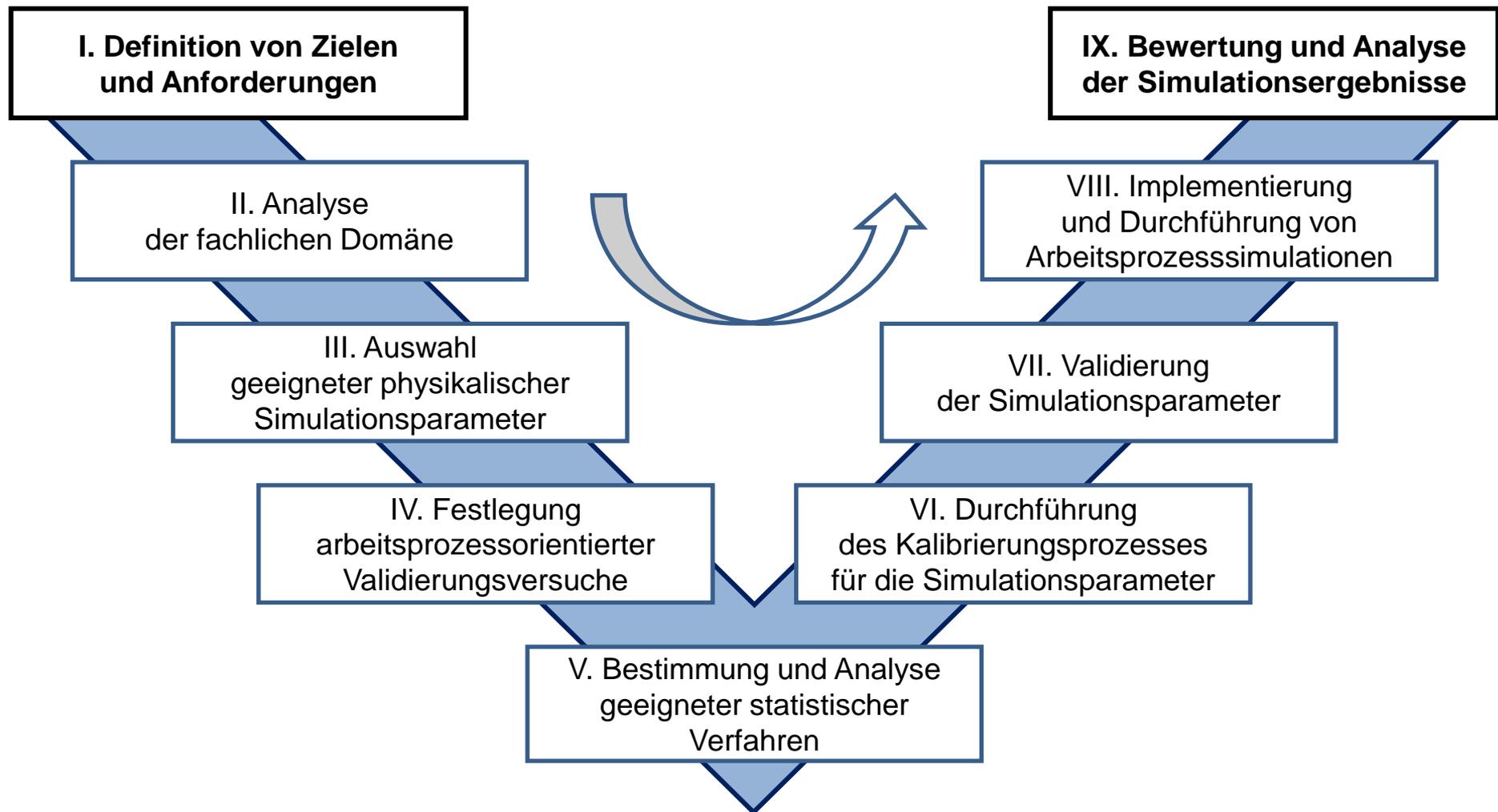
3. Implementierung des Konzeptes

(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)

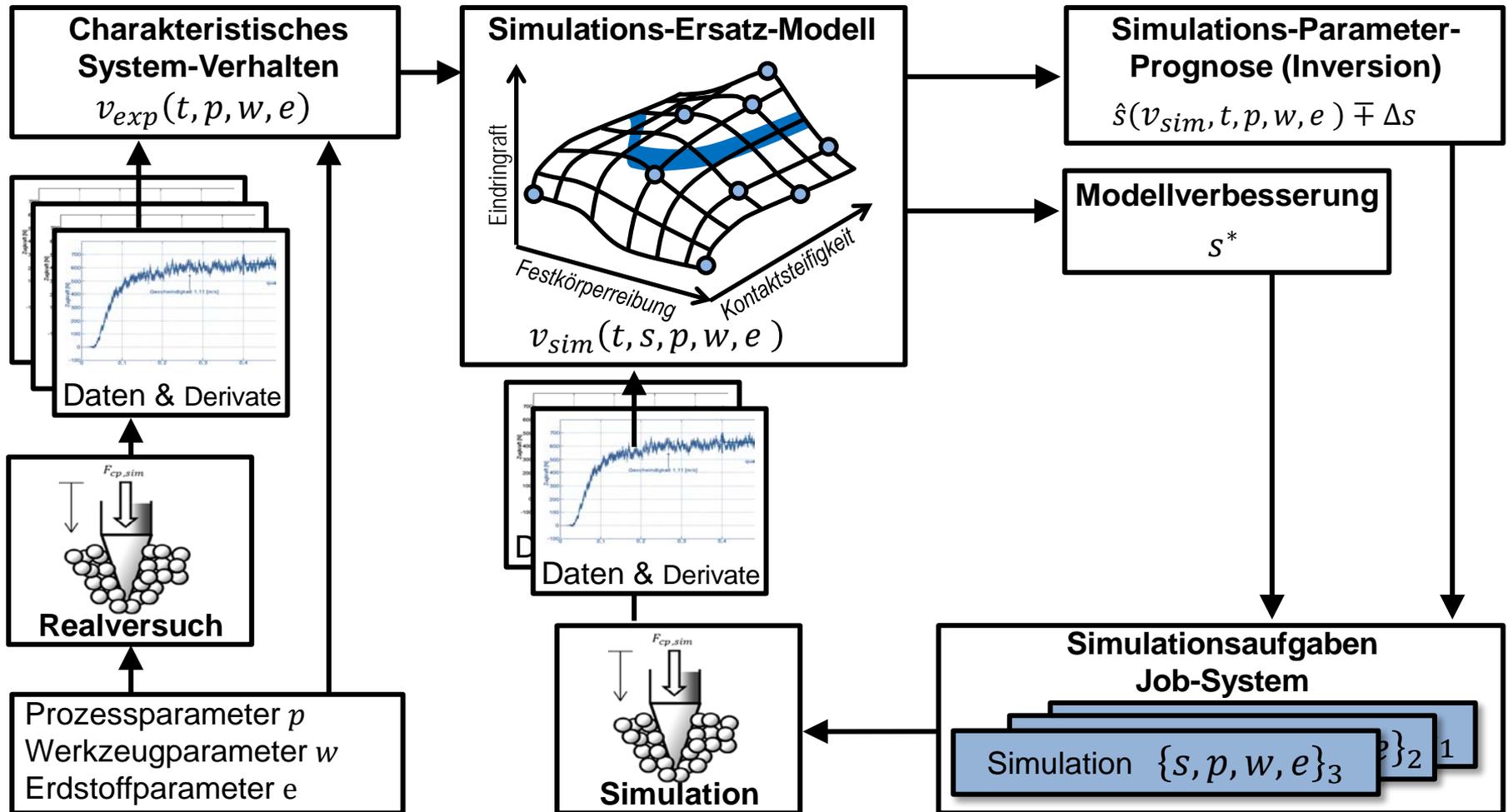
- 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche
- 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren
- 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse

4. Zusammenfassung und Ausblick

V-Modell als Grundkonzept



Ersatzmodell und Inversion



Gliederung

1. Einleitung

2. Konzept der Vorgehensweise

3. Implementierung des Konzeptes

(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)

➤ **3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche**

➤ 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren

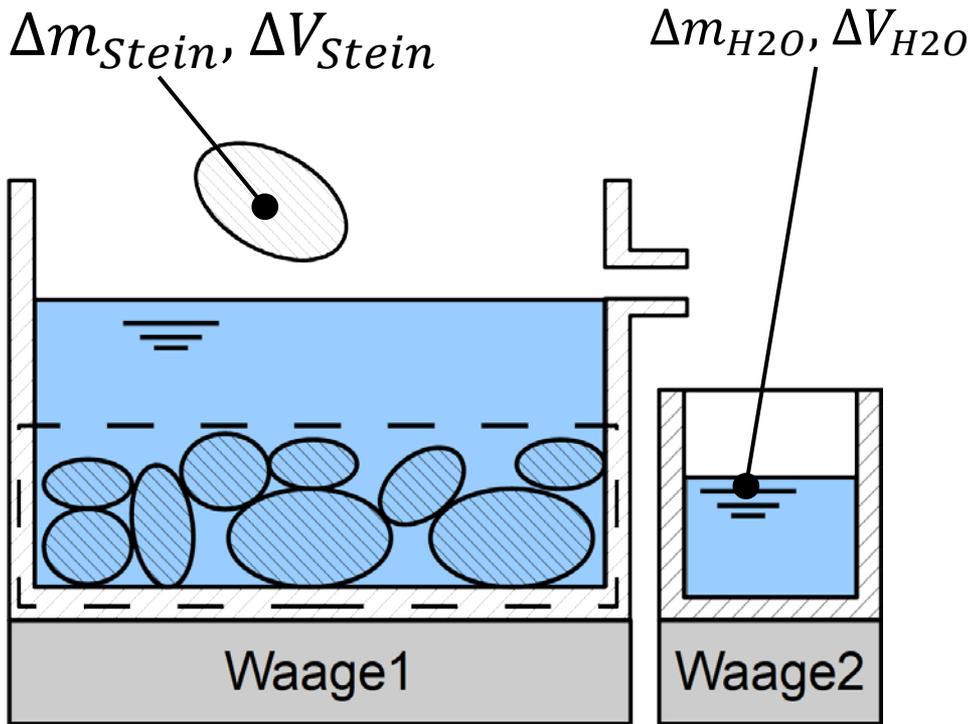
➤ 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse

4. Zusammenfassung und Ausblick

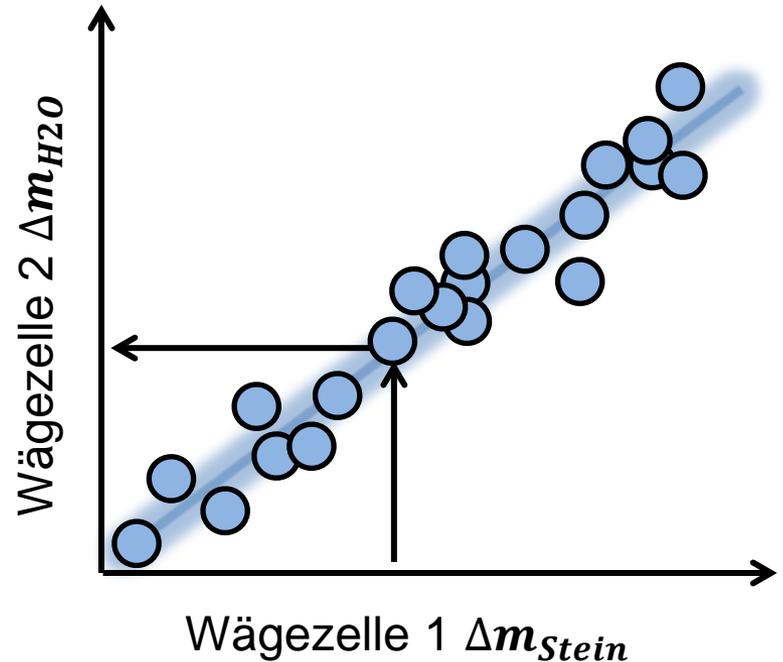
Ausgewählte Versuche

Lfd. Nr.	Versuchsbezeichnung	Messgrößen	Versuchszweck
1	Pyknometerversuch	Reindichte	Parameterermittlung
2	Penetrometerversuch	Eindringverhalten Eindringkraft Eindringtiefe	Kalibrierung
3	Rahmenscherversuch	Scherverhalten Scherfestigkeit Scherweg Setzung	Kalibrierung
4	Grubberscharversuch	Horizontale Zugkraft	Validierung
5	Zugkraftversuch	Horizontale Zugkraft	Validierung

1. Pyknometerversuch

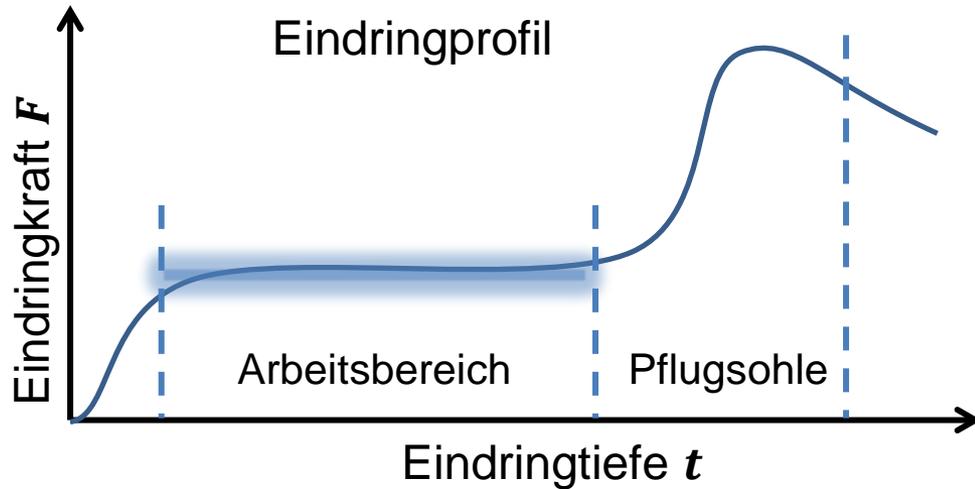
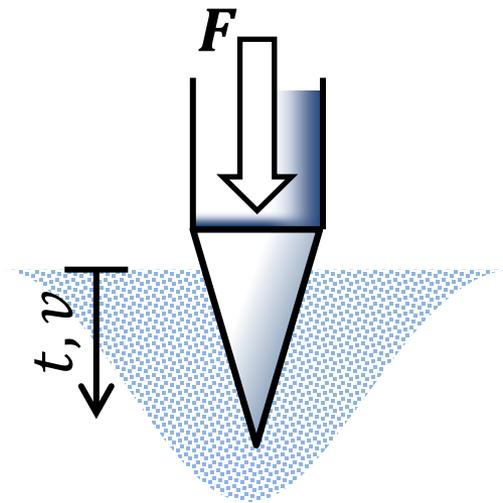


Messprinzip Überlaufbehälter



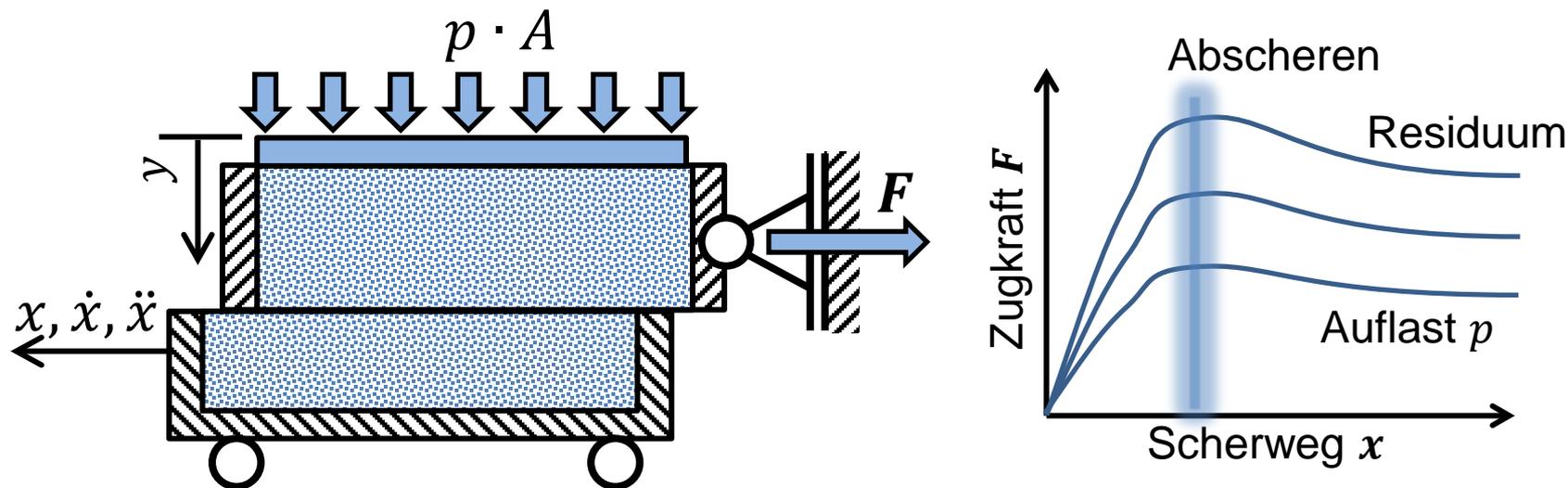
Analyseergebnis: Reindichte

2. Penetrometerversuch



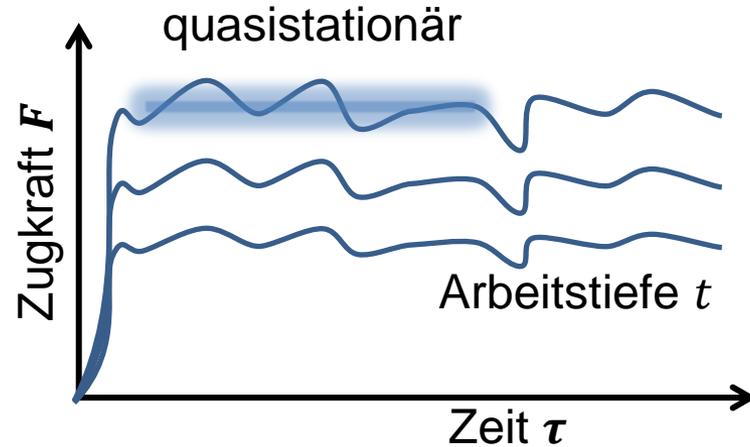
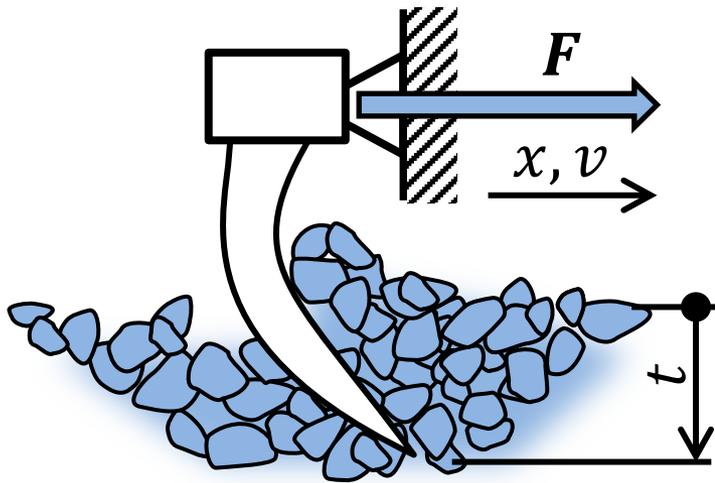
Element	Beschreibungsparameter
Arbeitswerkzeug	Konischer Probekörper Material (E-Modul, Reibungswinkel, Restitutionskoeffizient)
Arbeitsobjekt: Erdstoff	Eigenschaften: Dichte, Scherfestigkeit, Penetrationsverhalten, Scherverhalten, Schüttwinkel
Arbeitsprozess	Eindringgeschwindigkeit v , Eindringtiefe t
Charakteristisches Verhalten	Eindringtiefe-Eindringkraft-Verhalten $F(t)$

3. Rahmenscherversuch



Element	Beschreibungsparameter
Arbeitswerkzeug	Scherzelle Material (E-Modul, Reibungswinkel, Restitutionskoeffizient)
Arbeitsobjekt: Kies	Eigenschaften: Dichte, Scherfestigkeit, Penetrationsverhalten, Scherverhalten, Schüttwinkel
Arbeitsprozess	Schergeschwindigkeit v , Auflast p , Scherfläche A
Charakteristisches Verhalten	Scherverhalten $F(p,x)$, Scherfestigkeit T

4. Grubberscharversuch



Element	Beschreibungsparameter
Arbeitswerkzeug	Geometrie (3D-Lasercanner) Material (E-Modul, Reibungswinkel, Restitutionskoeffizient)
Arbeitsobjekt: Erdstoff	Eigenschaften: Dichte, Scherfestigkeit, Penetrationsverhalten, Scherverhalten, Schüttwinkel
Arbeitsprozess	Arbeitsgeschwindigkeit v , Arbeitstiefe t
Charakteristisches Verhalten	Zugkraft-Zeit-Verlauf, Median der Zugkraft $medF(v,t)$

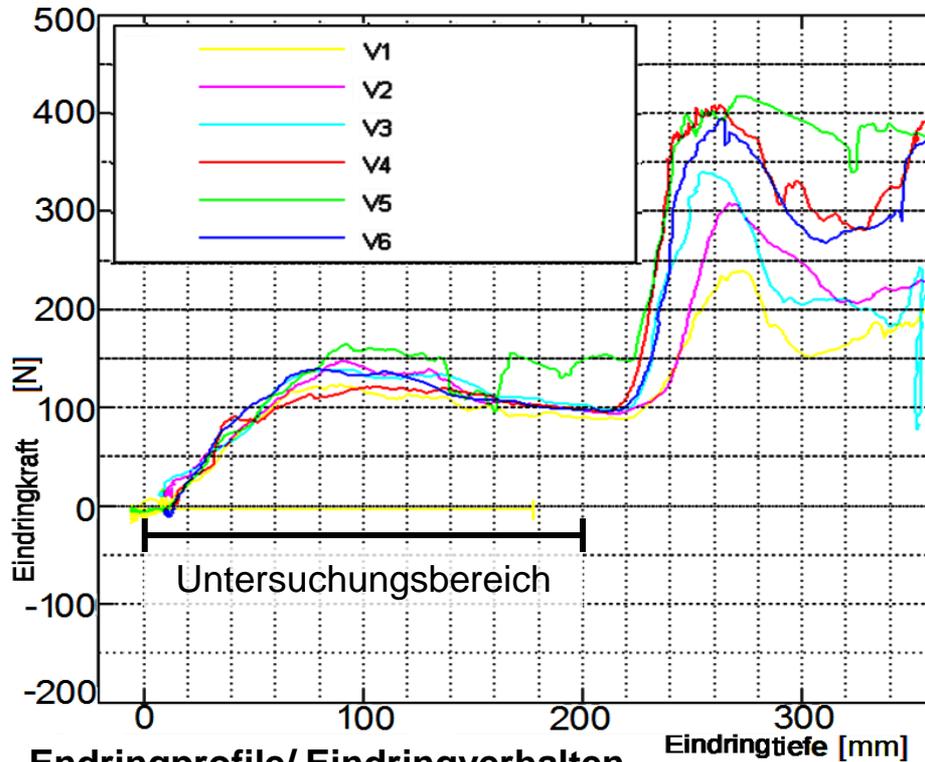
Gliederung

1. Einleitung
2. Konzept der Vorgehensweise
3. **Implementierung des Konzeptes**
(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)
 - 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche
 - **3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren**
 - 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse
4. Zusammenfassung und Ausblick

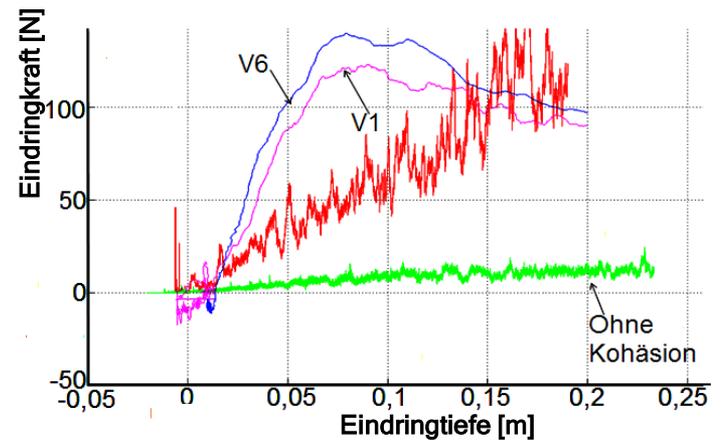
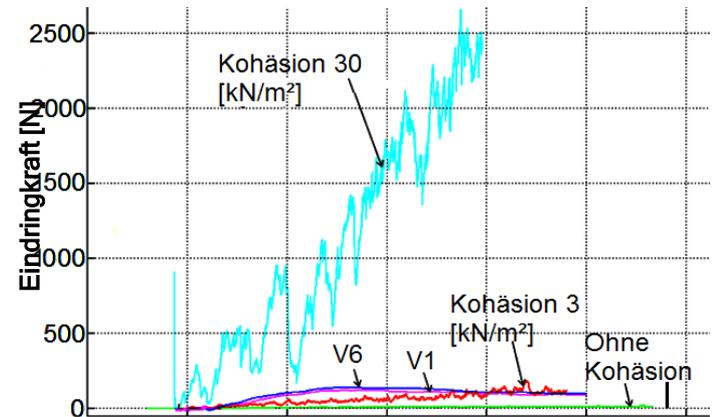
Kalibrierung mittels Penetrometerversuch

Eindringkraft am Penetrometer

- Vereinfachung
- Beschreibungsparameter: Eindringkraft
- Einfluss der Kohäsion

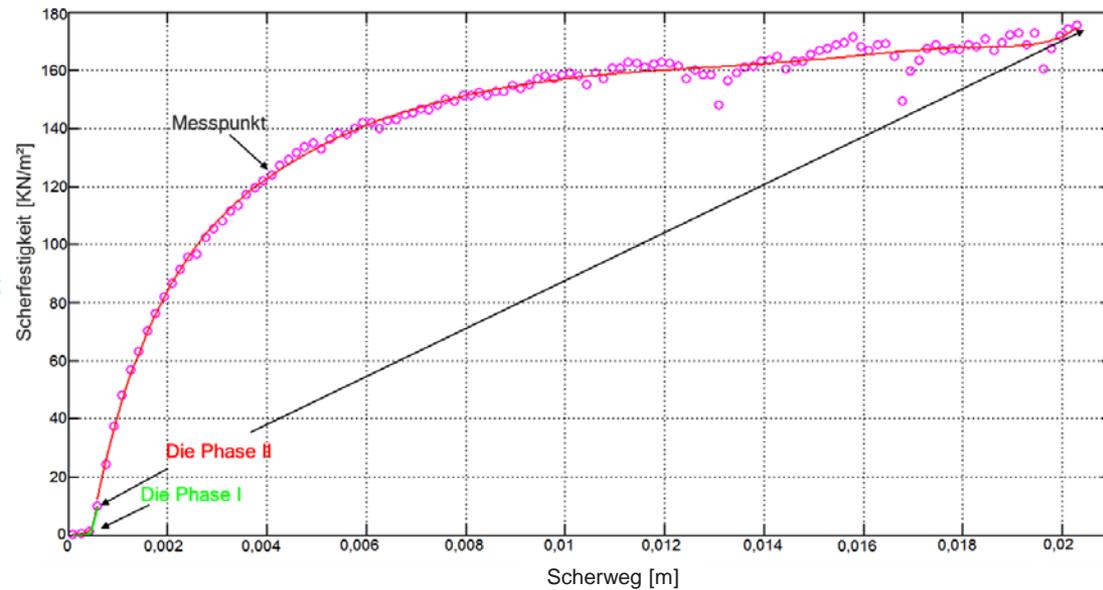
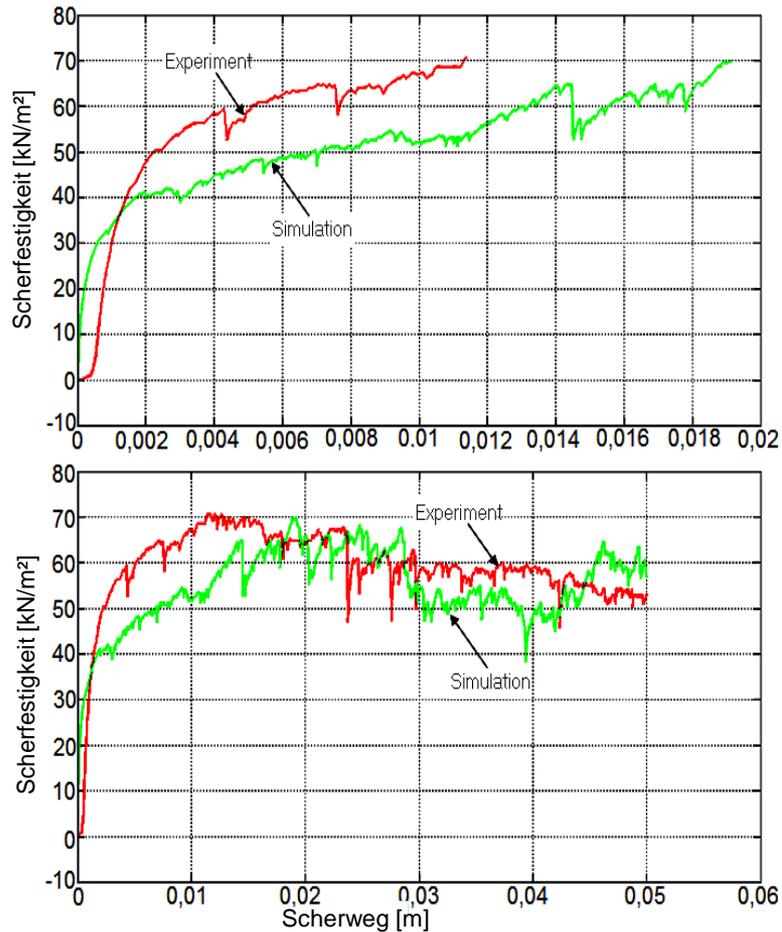


Eindringprofile/ Eindringverhalten
Messungen in der Bodenrinne



Simulation mit unterschiedlichen
Werten für die Kohäsionen (Detail vergrößert)

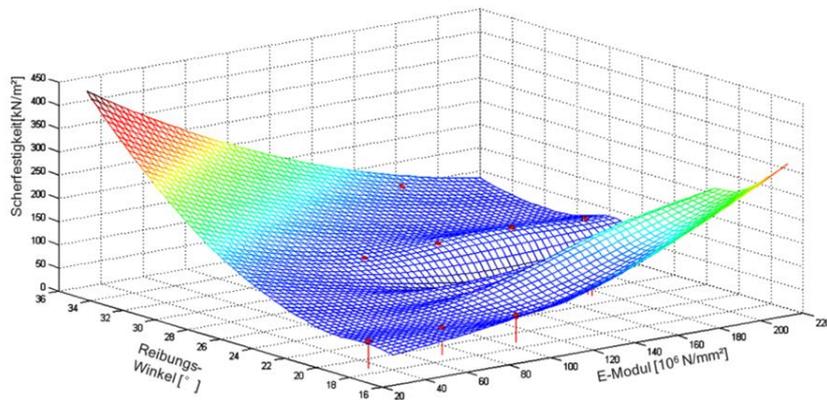
Kalibrierung mittels Rahmenschererversuch



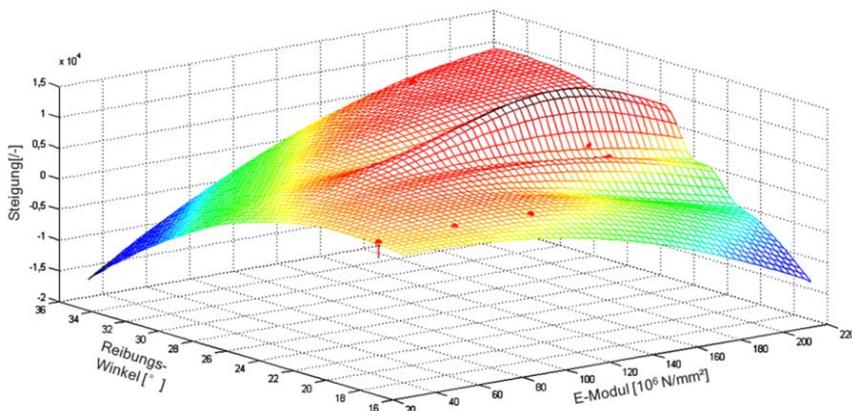
Kriterium 1: Scherfestigkeit

Kriterium 2: Krümmung der Kurve

Kalibrierung mittels Rahmenscherversuch



Scherfestigkeit Kriterium₁



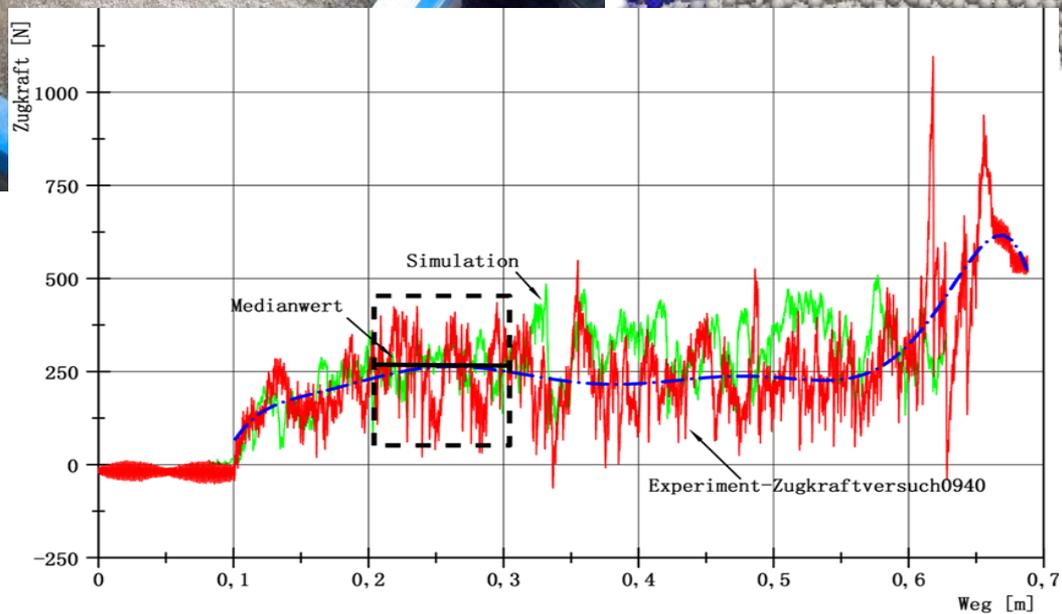
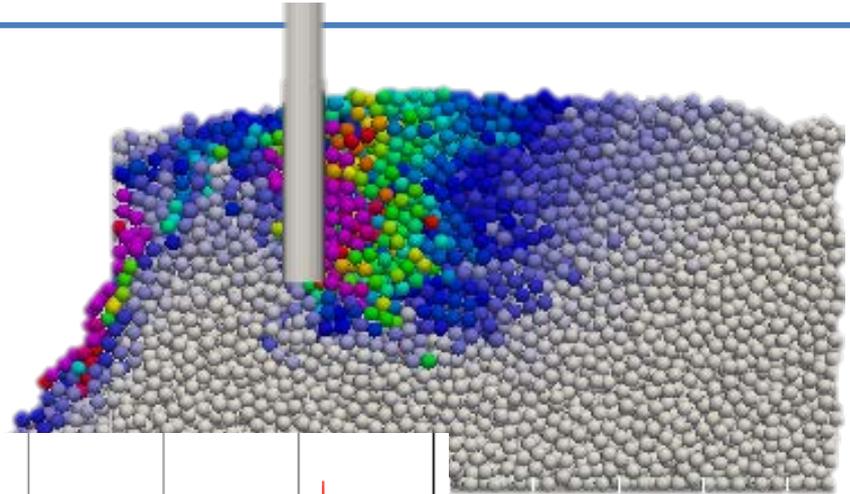
Kurvenkrümmung Kriterium₂

Variation der Simulationsparameter
 Multikriterielles Optimierungsproblem

$$\mathfrak{N}_1: (x_1, x_2) \rightarrow f_1(x_1, x_2) = \textit{Kriterium}_1$$

$$\mathfrak{N}_2: (x_1, x_2) \rightarrow f_2(x_1, x_2) = \textit{Kriterium}_2$$

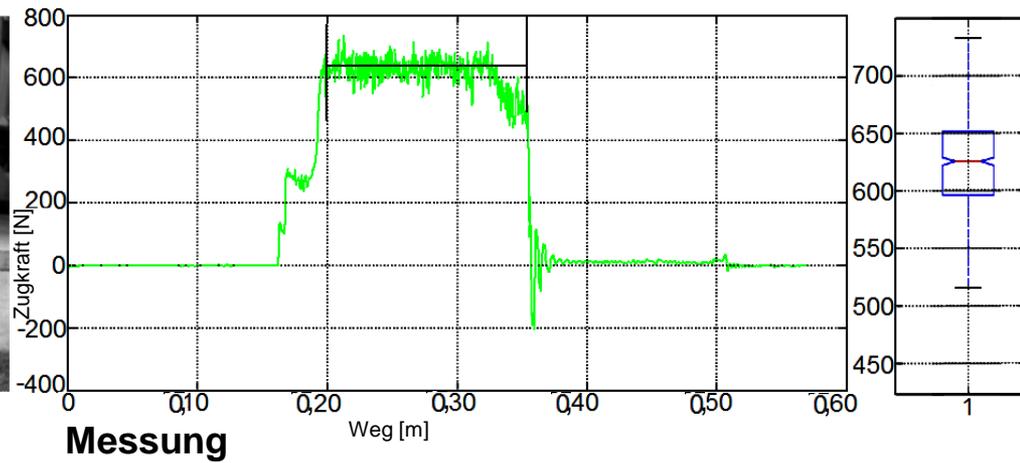
Validierung mittels Zugkraftversuch



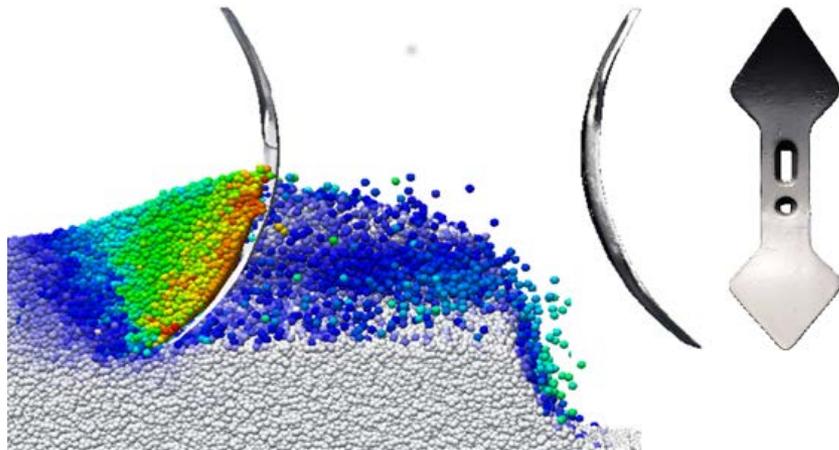
Validierung mittels Grubberscharversuch



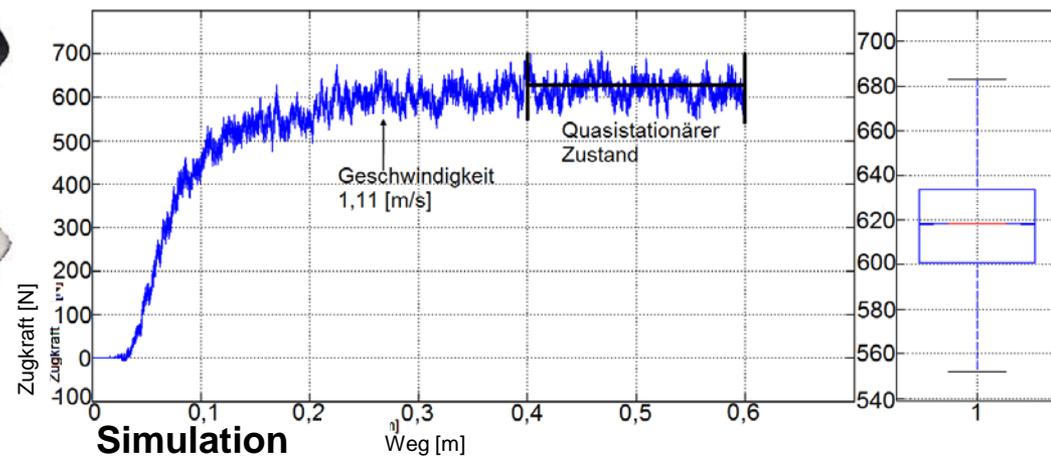
Laborversuch -Messung



Messung



Simulation mit YADE



Simulation

Gliederung

1. Einleitung

2. Konzept der Vorgehensweise

3. Implementierung des Konzeptes

(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)

➤ 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche

➤ 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren

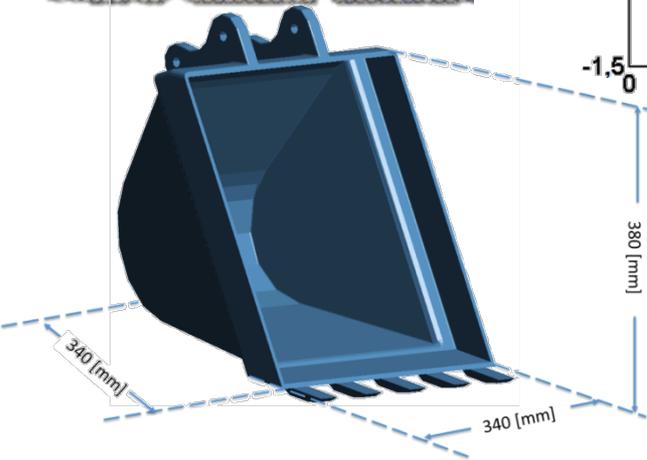
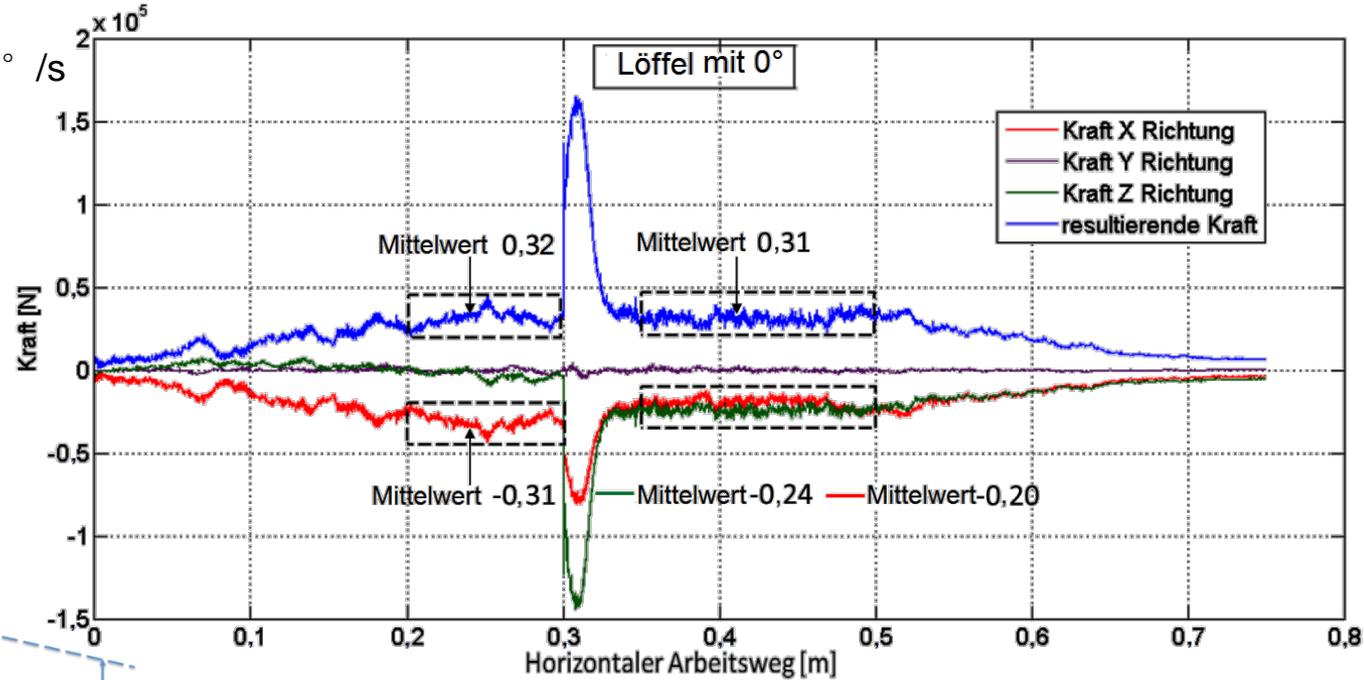
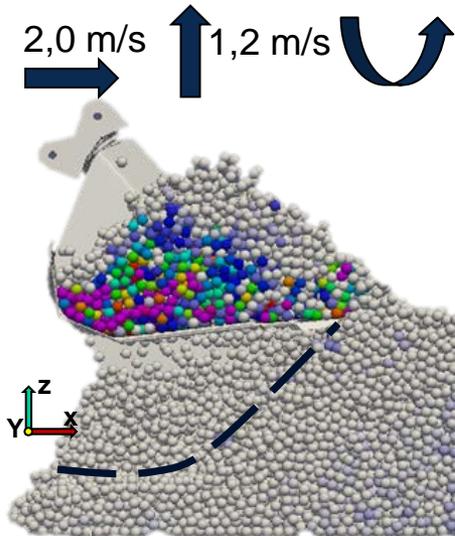
➤ **3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse**

4. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgewählte Arbeitsprozesssimulationen

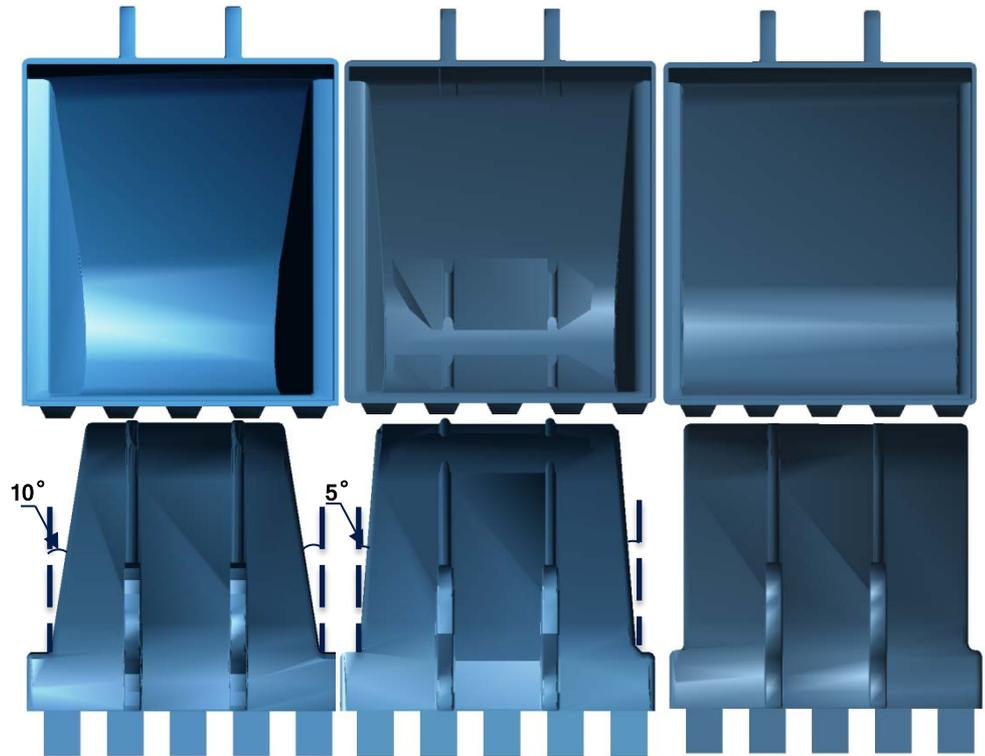
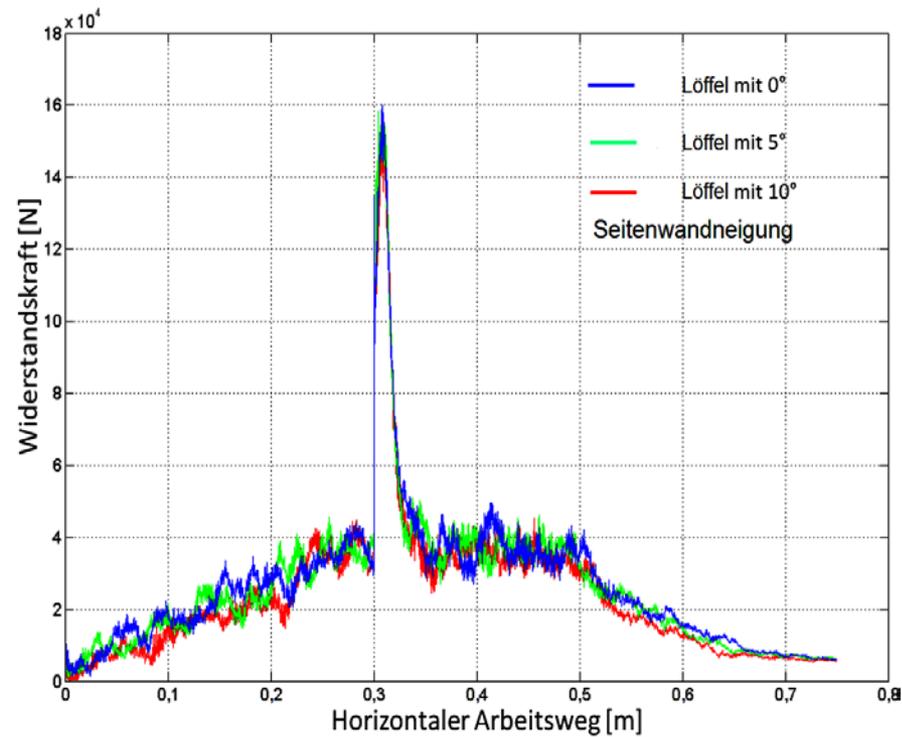
Lfd. Nr.	Simulation	Simulationszweck	Ermittelte Größen
1	Gabprozess an Minilöffeln unter Variation der Seitenwände	Simulation Arbeitsprozess (Werkzeugeinfluss) Vergleich mit theoretischem Grabkraftmodell	Grabkraft Füllmenge
2	Gabprozess von Löffel eines XCMG Baggers	Simulation Arbeitsprozess Vergleich mit theoretischem Grabkraftmodell	Grabkraft
3	Planierschild	Simulation Arbeitsprozess Vergleich mit theoretischem Grabkraftmodell	Grabkraft

Grabprozess am Minilöffel

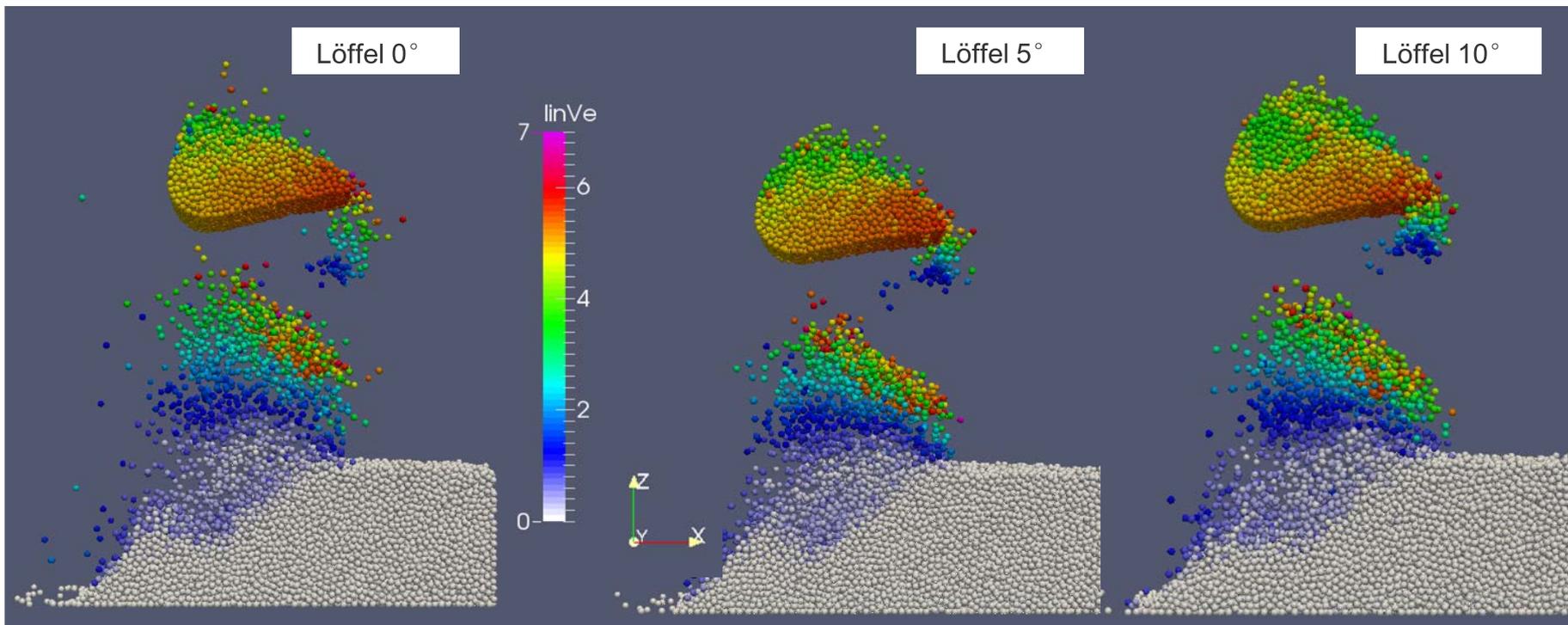


Vergleich mit Theoretischem Grabkraft-Modell $F_{th} = 13 \text{ kN}$
 (nach G. Kunze) $F_{sim} = 32 \text{ kN}$

Variation der Werkzeugform am Minilöffel

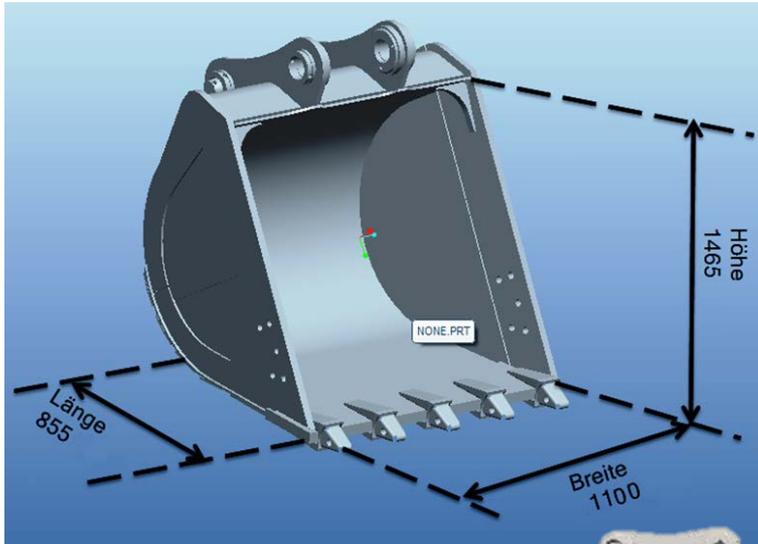


Variation der Werkform am Minilöffel

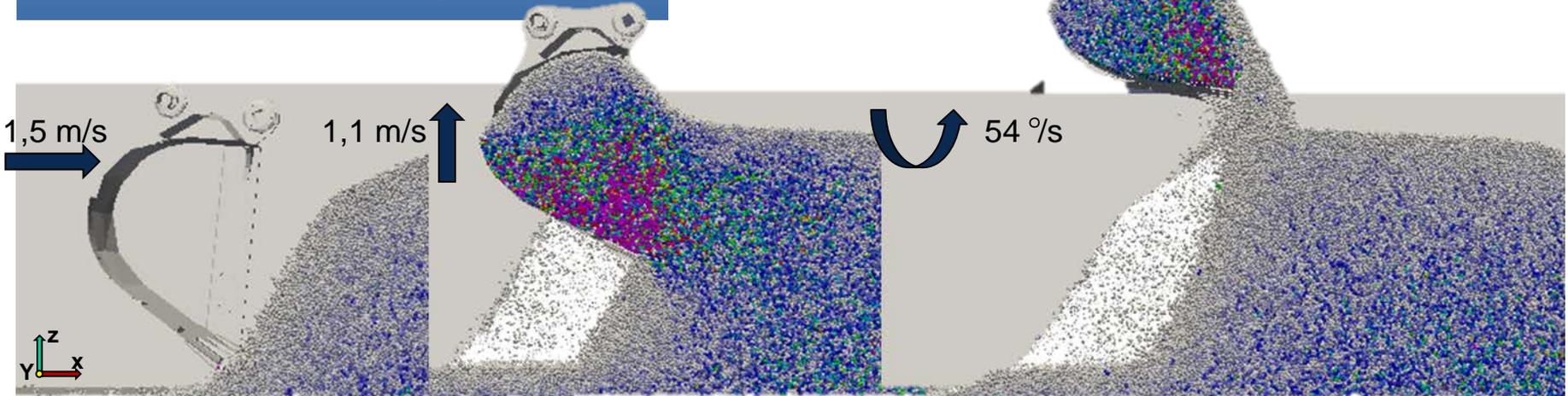


- Löffel 0° -Seitenwand: Lademasse 43,1 kg (4476 Kugeln)
- Löffel 5° -Seitenwand: Lademasse 47,5 kg (4926 Kugeln)
- Löffel 10 ° -Seitenwand: Lademasse 46,4 kg (4813 Kugeln)

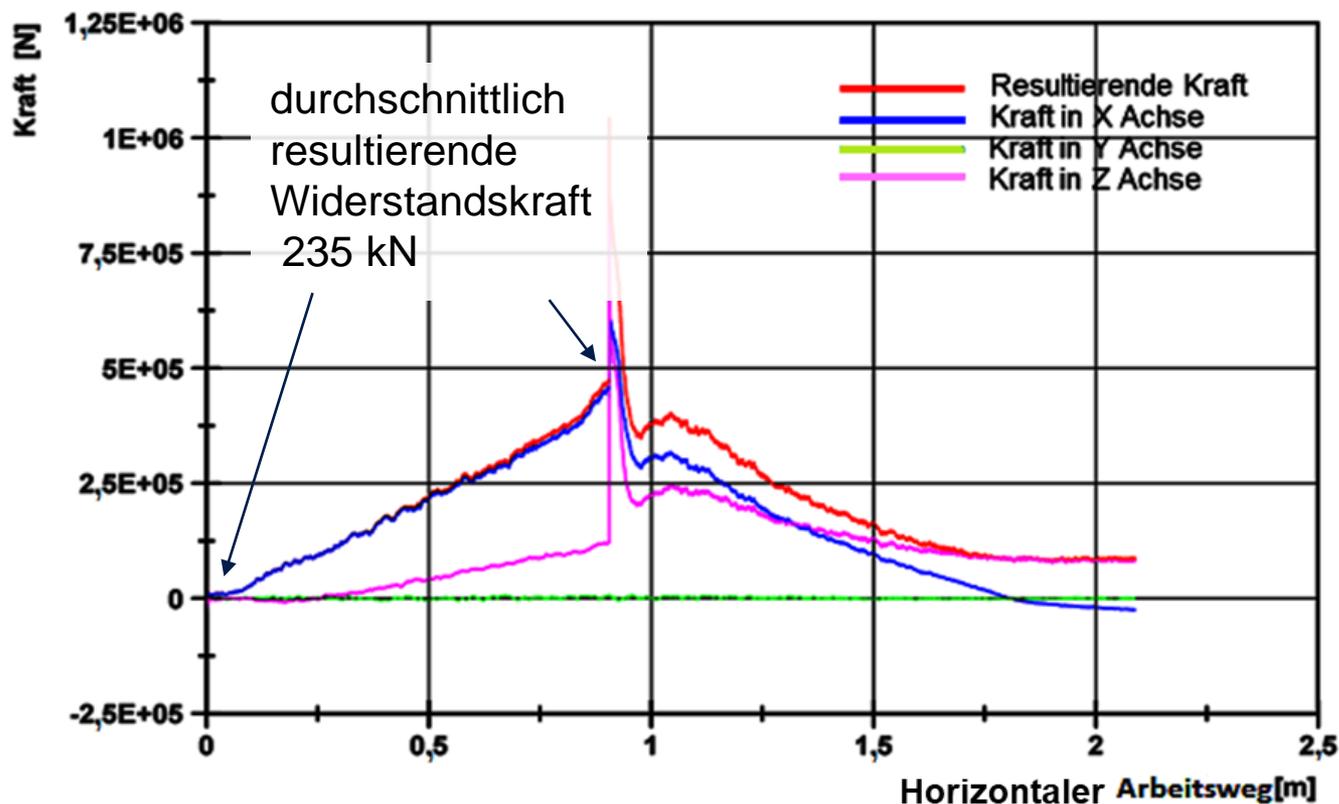
Grabprozess am Löffel eines XCMG-Baggers



- Startpunkt (0,0 m)
- Wendepunkt (0,907 m)
- Schlusspunkt (2,1 m)



Grabprozess am Löffel eines XCMG-Baggers

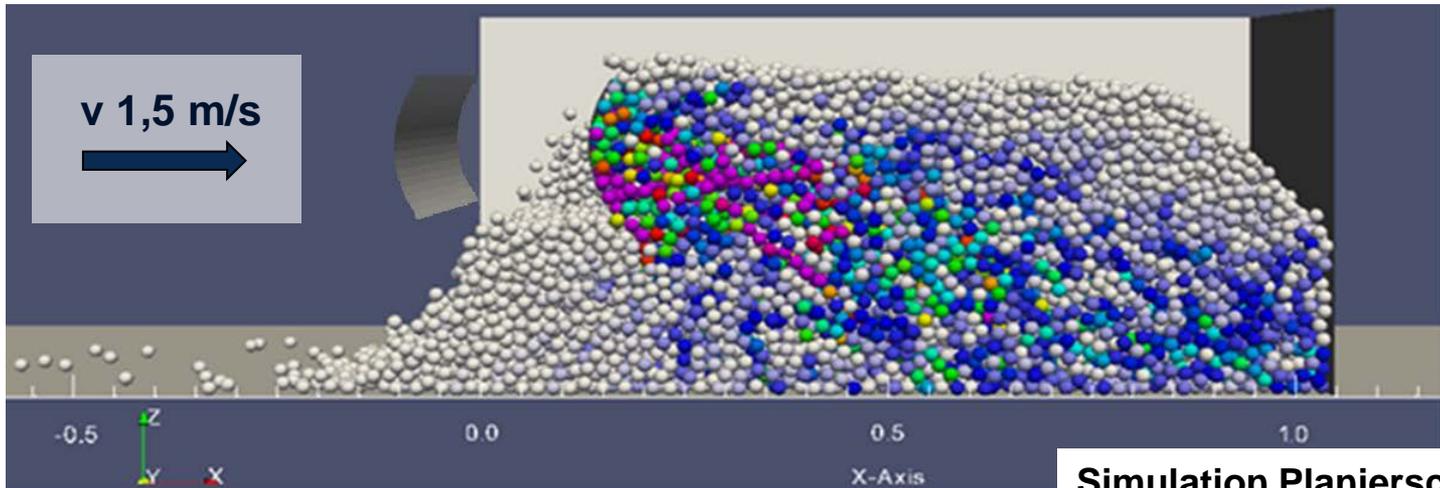


Vergleich mit Theoretischem
Grabkraft-Modell

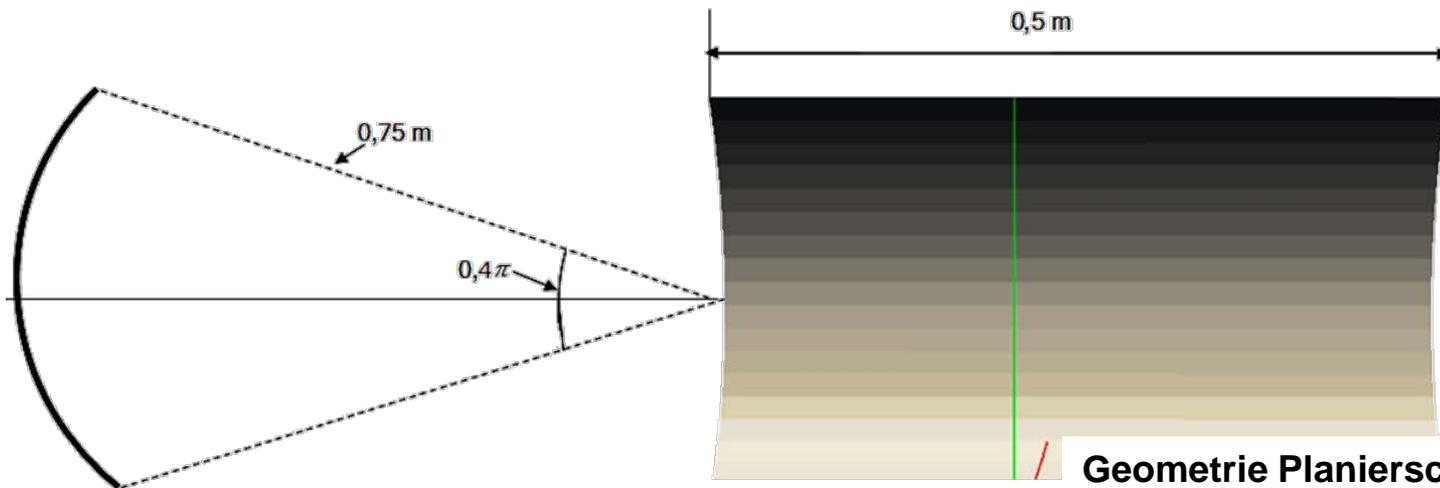
$$F_{th} = 113 \text{ kN}$$

$$F_{sim} = 235 \text{ kN}$$

Arbeitsprozess eines Planierschildes

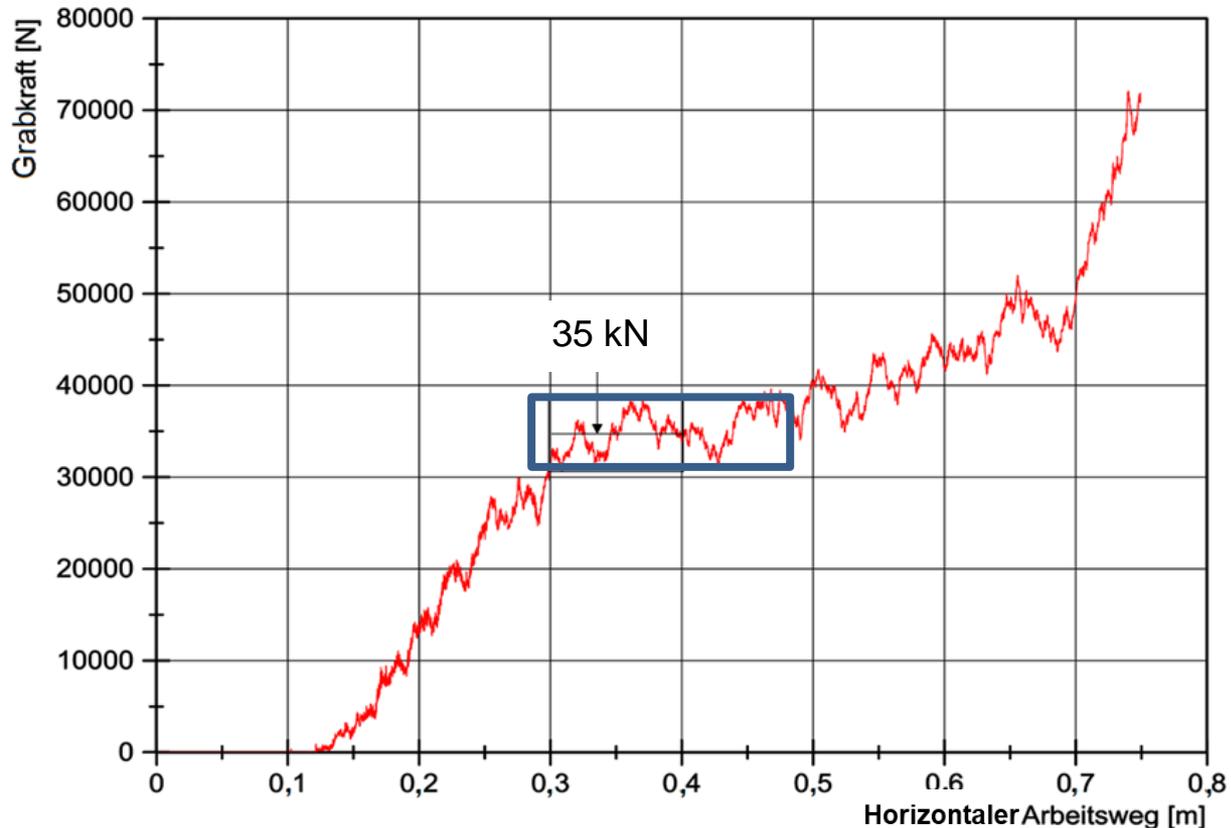


Simulation Planierschild



Geometrie Planierschild

Arbeitsprozess eines Planierschildes



Vergleich mit Theoretischem
 Grabkraft- Modell $F_{th}=35 \text{ kN}$

Gliederung

1. Einleitung
2. Konzept der Vorgehensweise
3. Implementierung des Konzeptes
(Experimente – Simulation – Statistische Methoden)
 - 3.1 Kalibrierungs- und Validierungsversuche
 - 3.2 Kalibrierungs- und Validierungsverfahren
 - 3.3 Simulationsmodelle für Arbeitsprozesse
4. **Zusammenfassung und Ausblick**

Zusammenfassung

- Konzeptionierung der Vorgehensweise analog dem V-Modell (Ziel – Analyse – Synthese – Validierung)
- Auswahl der Kalibrierungs- und der Validierungsversuche sowie der statistischen Methoden und der Optimierungsverfahren
- Durchführung der Kalibrierungsprozesse mit dem Pentrometerversuch und dem Rahmenscherversuch in Kombination mit dem Kriging-Verfahren und der Multivariaten Analyse
- Durchführung der Validierungsprozesse mit dem Zugkraftversuch und dem Grubberscharversuch
- Aufbau der Simulationsmodelle für die Arbeitsprozesse von Minilöffel und XCMG-Löffel mit 0.8 m³ Arbeitsvolumen sowie Planierschild
- Analyse der Simulationsergebnisse

Ausblick

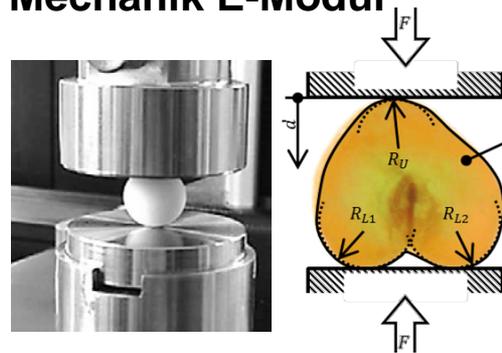
- Aufbau einer Stoff- und Prozess-Datenbank
 - Beschreibungsparameter oft in Arbeitsprozessen vorkommender Erdstoffe
 - Simulationsmodelle für oft verwendete Kalibrierungsexperimente
 - Simulationselemente für verschiedene Kornformen
- Überprüfung der Anwendungsmöglichkeiten weiterer statistischer Methoden
 - Künstliche neuronale Netze
 - Evolutionäre Algorithmen
 - Radial-Basis-Funktionen
- Identifikation weiterer Zielgrößen als geeignete Kriterien für Kalibrierungsverfahren
 - Residuum der Scherfestigkeit
 - Krümmung und Verlauf der Kurven

Projekt ADALS – Anwenderfreundliche DEM

Kornform



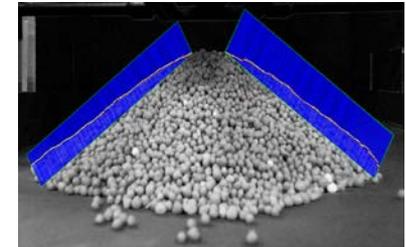
Mechanik E-Modul



Reindichte



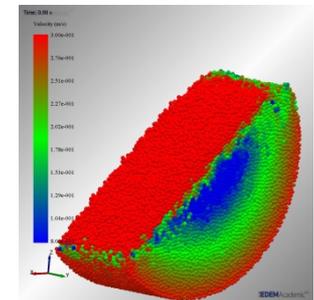
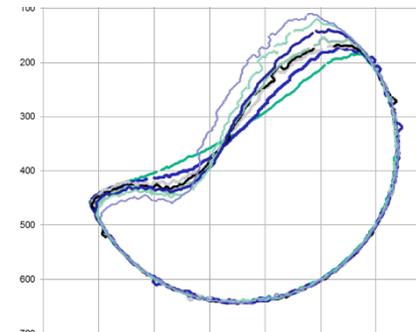
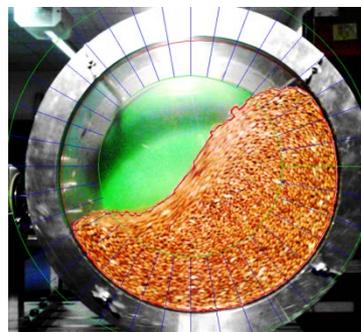
Statischer Schüttwinkel



Trommelversuch

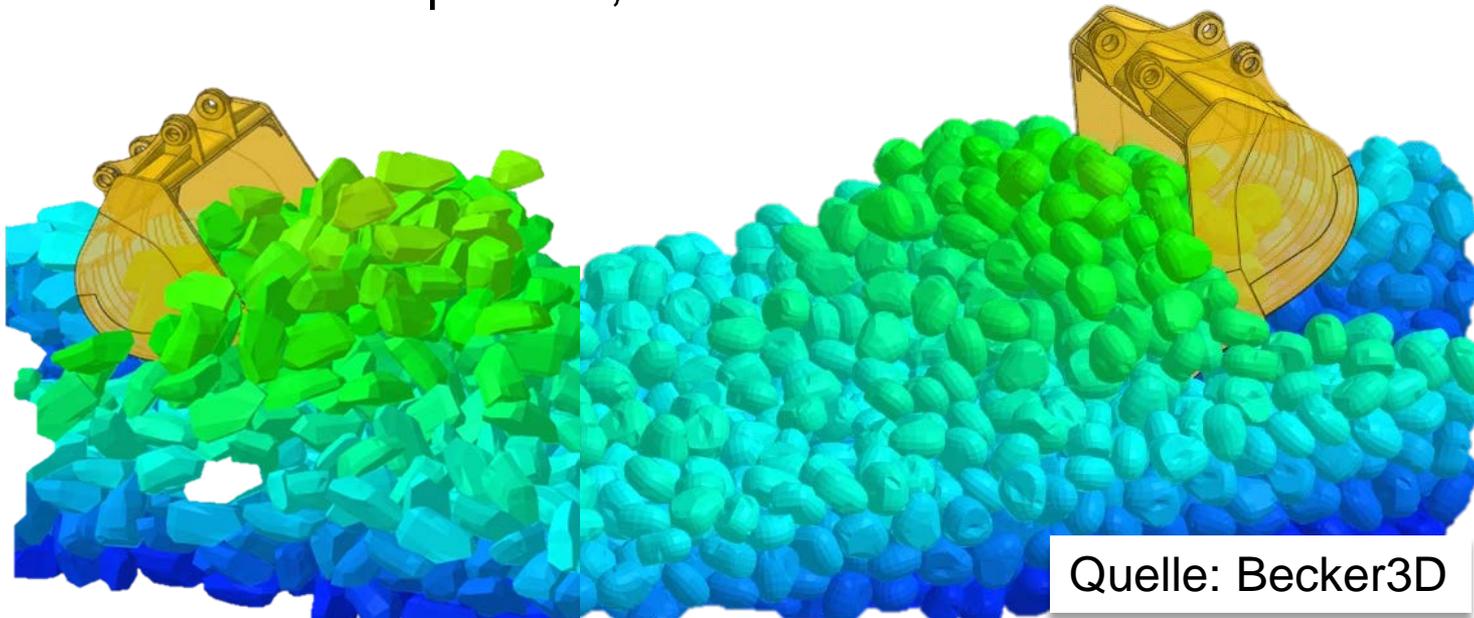


Prozesssimulation und Vergleich



Trends für die Zukunft

- Komplexere Partikelformen
- Komplexere Physik
- Direkte Interaktion mit
CFD – MKS – FEM – CAE^x
- Bessere Problemzerlegungsverfahren
- Transparente, offene Simulation



Quelle: Becker3D

Danke



**»Knowledge builds bridges
- education unites people.«**