

Zhiyi Fu, Hanno Reckmann, Armin Kueck | Baker Hughes

NUMERICAL SIMULATIONS USING THE DISCRETE ELEMENT METHOD TO INVESTIGATE HFTO MITIGATION STRATEGIES IN PDC DESIGNS

Motivation

Polycrystalline Diamond Compact (PDC) bits with multiple fixed cutters are widely used in the oil and gas, geothermal, and mining industries. The bit-rock interaction excites various types of vibrations, among which High-Frequency Torsional Oscillations (HFTO) are one of the most severe types, causing premature failures of drill string components and non-productive time in drilling operations. To improve drilling performance, a better understanding of the HFTO excitation mechanism is needed. A well-accepted phenomenological explanation for the self-excited HFTO is the velocity-weakening characteristic of the torque on bit, which can be further attributed to velocity-dependent rock cutting forces at each cutter. Therefore, a unified investigation approach that includes both drill string dynamics and rock cutting processes is desirable to help investigate mitigation strategies for HFTO. For this purpose, numerical simulation provides another favorable and flexible way in addition to field and laboratory testing.

Methods

For the drill string dynamics, a reduced-order drill string model with torsional and axial modes is used to describe the HFTO at the selected frequency range. For the pressurized cutting process in downhole environments, a modified bonded-particle model (Discrete Element Method) is developed that incorporates cutting-velocity-dependent model parameters to generate the rate dependent cutting forces observed in the rock cutting tests with a single cutter. Then, bit force response maps are derived from multiple DEM cutting simulations and applied as the force boundary conditions of the drill string model in the time domain simulation.

Results

Due to the velocity dependency included in the bit force responses, fully developed HFTO occur in the simulation. The influence of different cutter designs on HFTO can then be quantified by generating corresponding bit force maps and comparing the duration of the excitation phase in the time domain. In this way, beneficial cutter features that reduce instability and prolong the HFTO excitation time are identified.

Conclusion

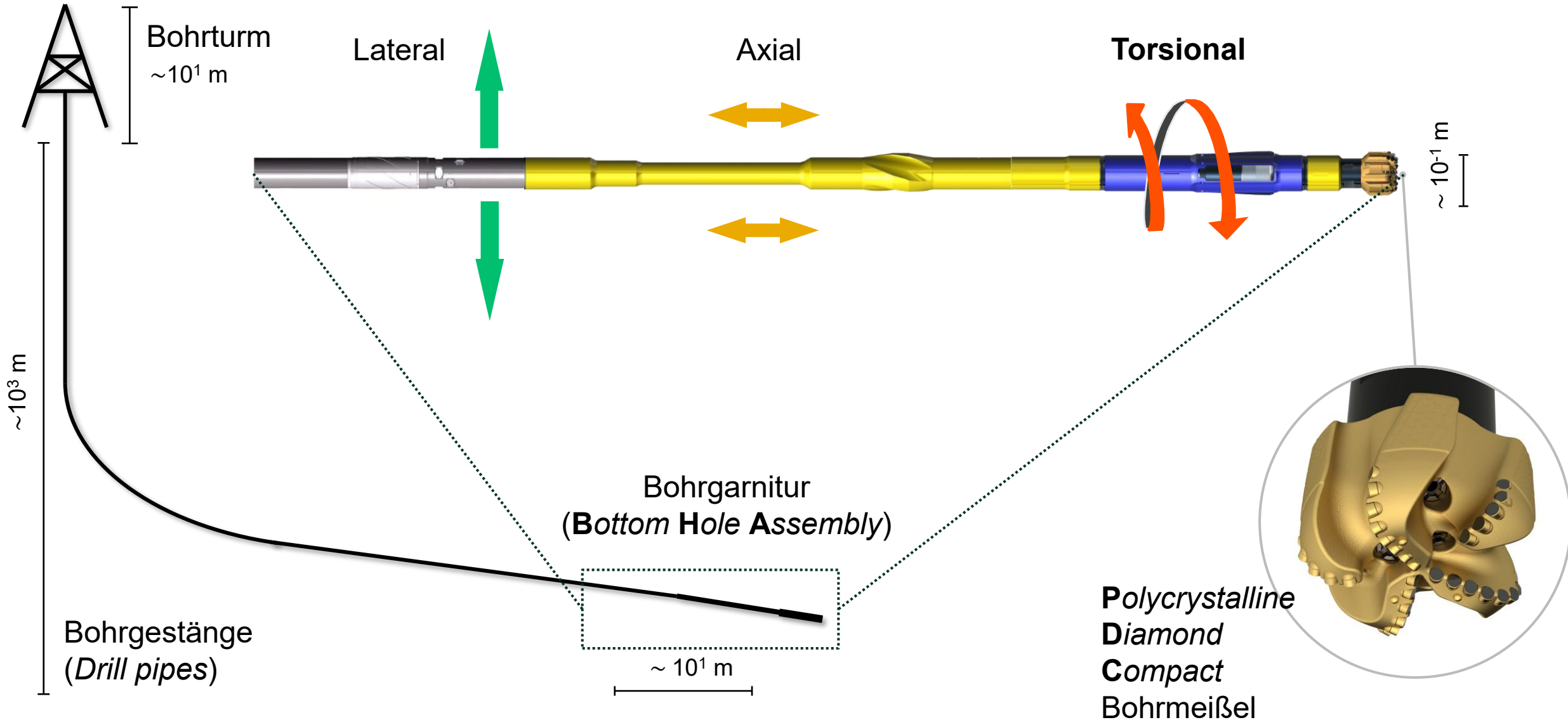
This study presents a numerical approach to investigating potential cutter design features for HFTO mitigation. The results are considered a first step towards computer-aided cutter design against HFTO. The knowledge gained from these simulations also provides guidance for further experimental and field validation of these strategies.

Numerical Simulations Using the Discrete Element Method to Investigate HFTO Mitigation Strategies in PDC Designs

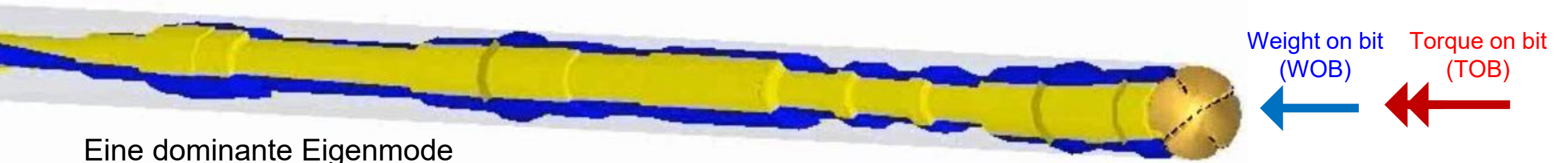
Zhiyi Fu, Hanno Reckmann, Armin Kueck

08. June 2026

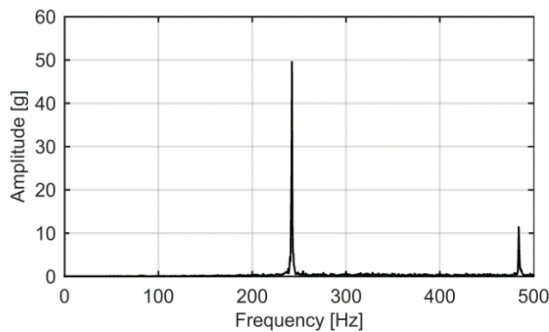
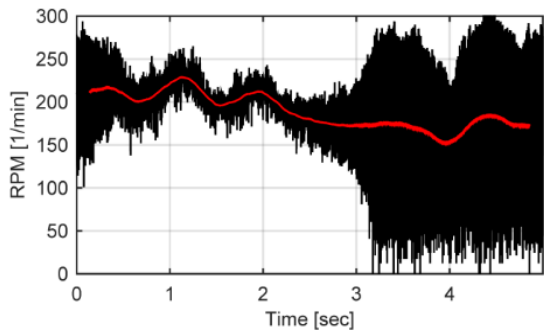
Bohrstrangschwingungen



Hochfrequente torsionale Schwingungen (HFTO)

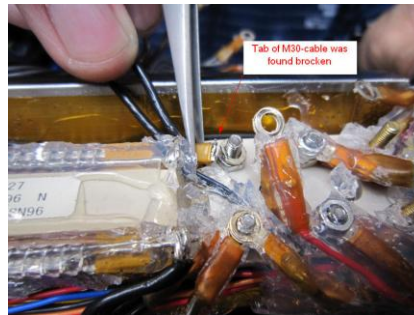


Eine dominante Eigenmode selbsterregt zwischen 50 Hz und 500 Hz

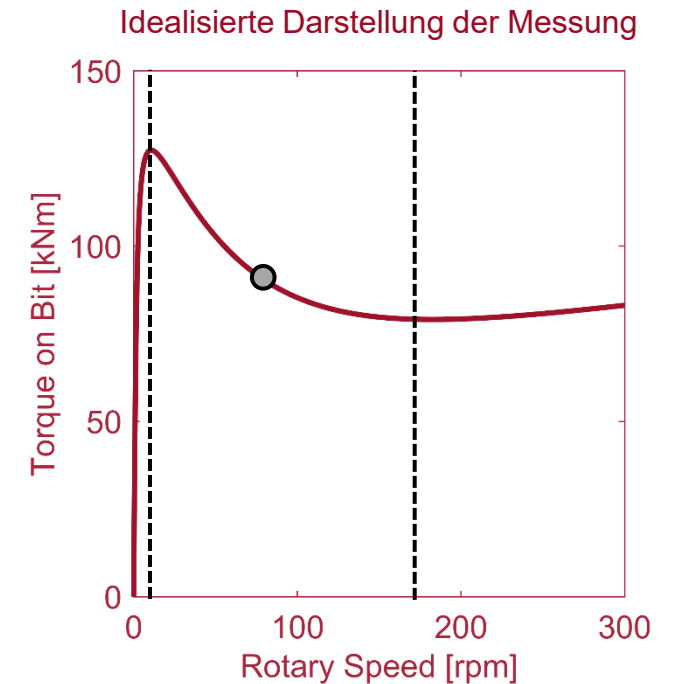


[HOH16]

Hohe Tangentialbeschleunigungen und dynamische Torsionsmomente

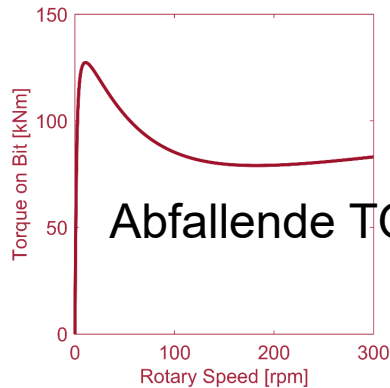
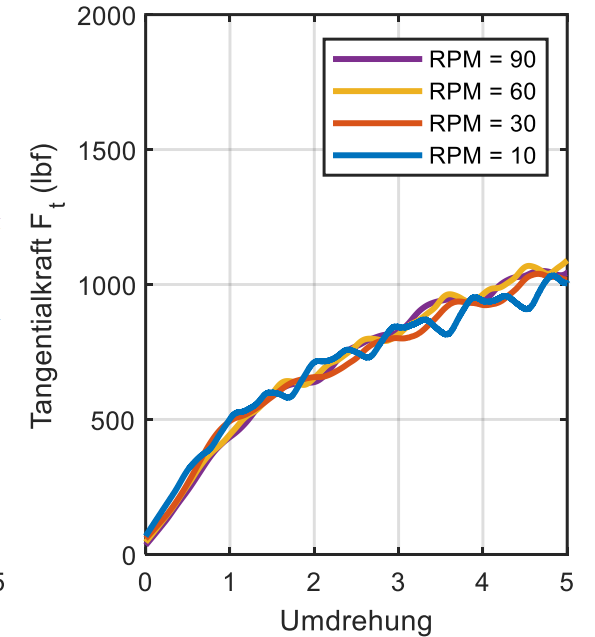
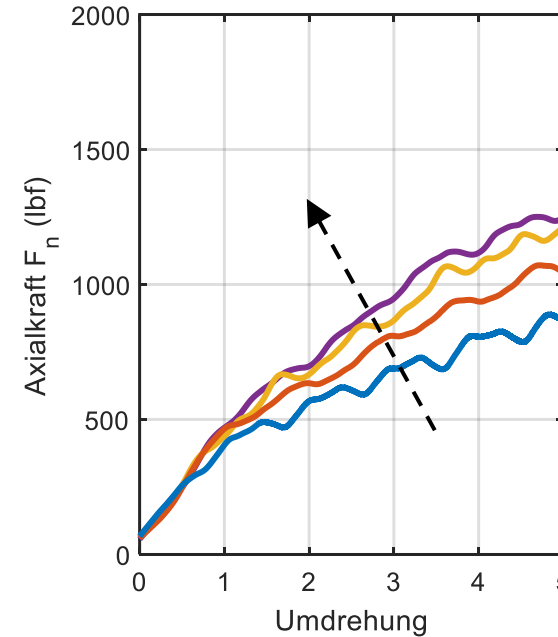
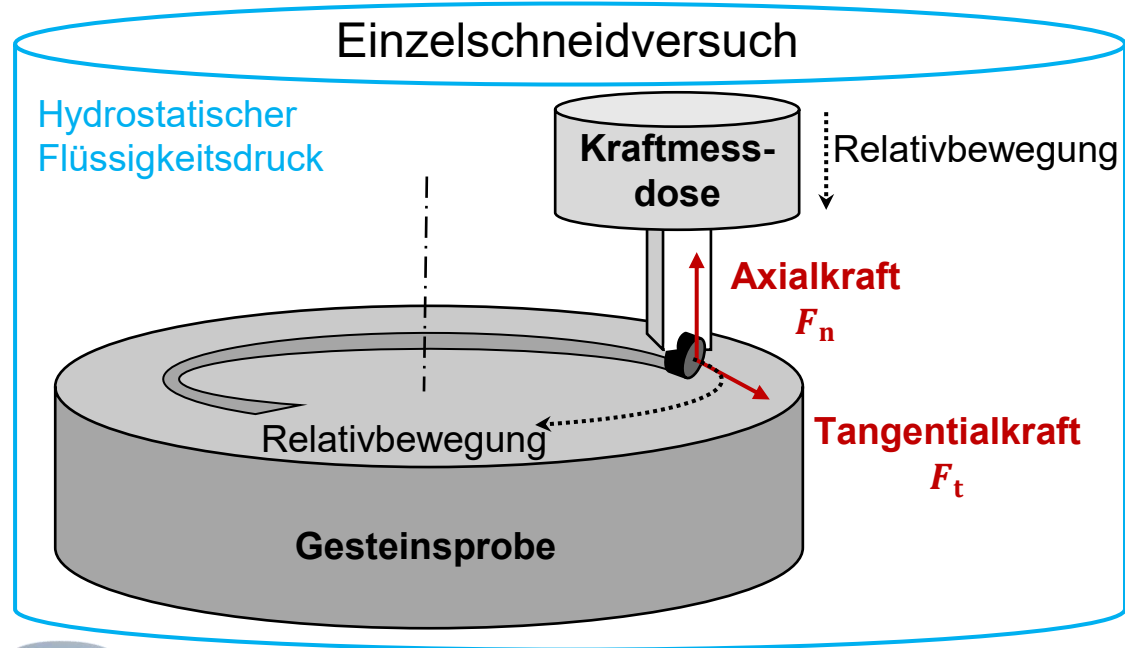


[Baker Hughes]



Abfallende TOB-Kennlinie unter konstantem WOB

Ratenabhängigkeit im Gesteinsschneidprozess



Abfallende TOB-Kennlinie

- Ratenabhängigkeit in **axialer** Richtung deutlicher
- Abfallende Kennlinie der Aggressivität $\frac{F_t}{F_n}$

Kernfragen



Wie kann der ratenabhängige Gesteinsschneidprozess in einer geeigneten Simulation nachgebildet werden?



Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Ratenabhängigkeit und der abfallenden TOB-Kennlinie?



Wie wirkt sich die Ratenabhängigkeit im Gesteinsschneidprozess auf selbsterregte HFTO aus?

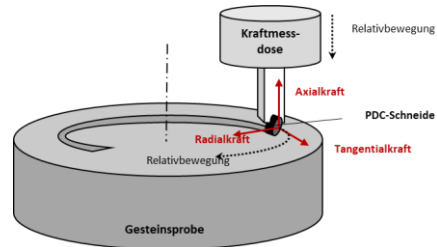
Agenda

- Einleitung & Motivation
- Partikelmethode für den Gesteinsschneidprozess beim Tiefbohren
- Modifikation zur Nachbildung des ratenabhängigen Schneidprozesses
- Anwendung zur Untersuchung hochfrequenter Torsionsschwingungen
- Zusammenfassung und Ausblick

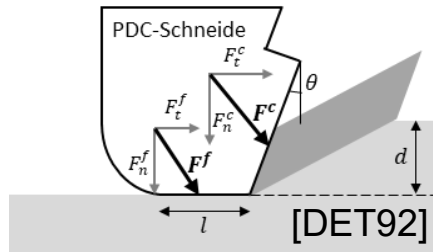
Partikelmethode für den Gesteinsschneidprozess beim Tiefbohren

Untersuchungsmethoden für den Gesteinsschneidprozess

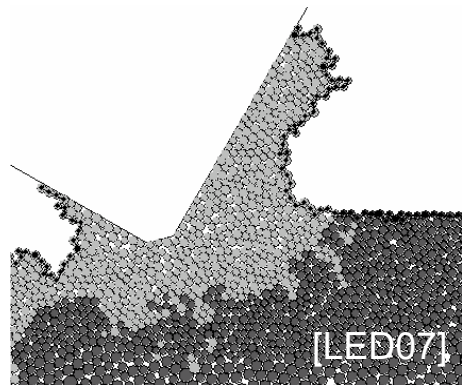
❖ Experimentell



❖ Analytisch



❖ Numerisch



Aktualisierung der Partikelpositionen



2. Newtonsches Gesetz
(für jeden Partikel)



Kontaktkraftgesetz
bzw. Kontaktmodell
(für jedes Kontaktpaar)

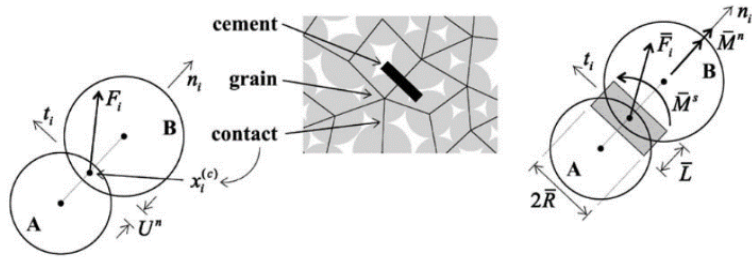
Aktualisierung der Kontaktkräfte

Diskrete-Elemente-Methode

- + Kostengünstig & mehr Einblick statt begrenzter Messtechnik
- + Komplexe Randbedingungen modellierbar
- + Effiziente Berücksichtigung großer Verformungen

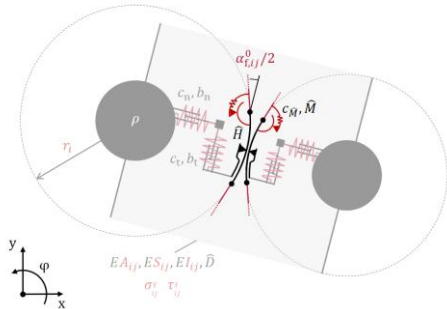
Partikelmethode für den Gesteinsschneidprozess beim Tiefbohren

Bonded-Particle Model [POT04]



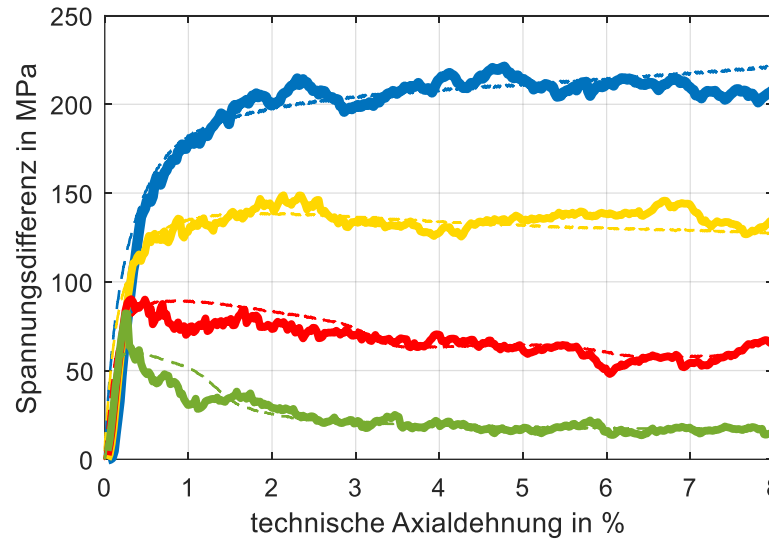
- Teilchen mit Elastizität und Reibung
- Parallele Bindungen mit Steifigkeit und Festigkeit

Modifiziertes BPM [TER19]

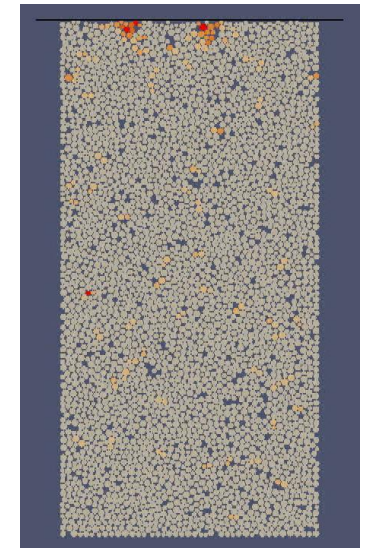
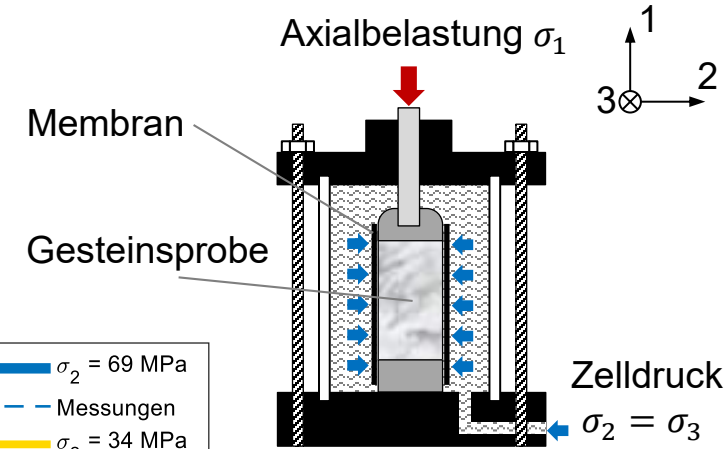


- + Rollwiderstandsformulierung
- + Kornscherfestigkeit

Kalibrierung durch Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Triaxialversuchen

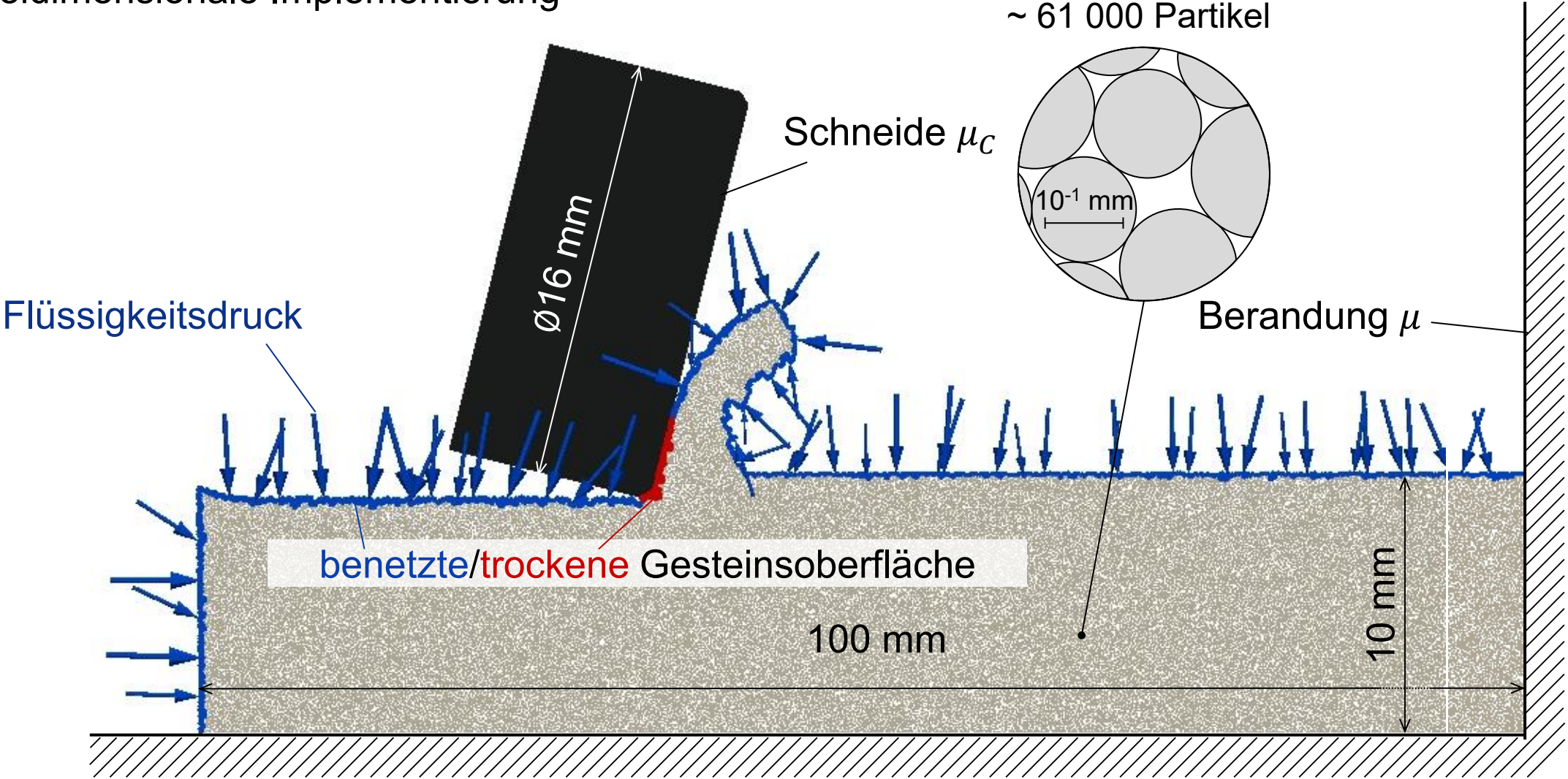


Gute Übereinstimmung über einen weiten Dehnungsbereich bei unterschiedlichen Flüssigkeitsdrücken

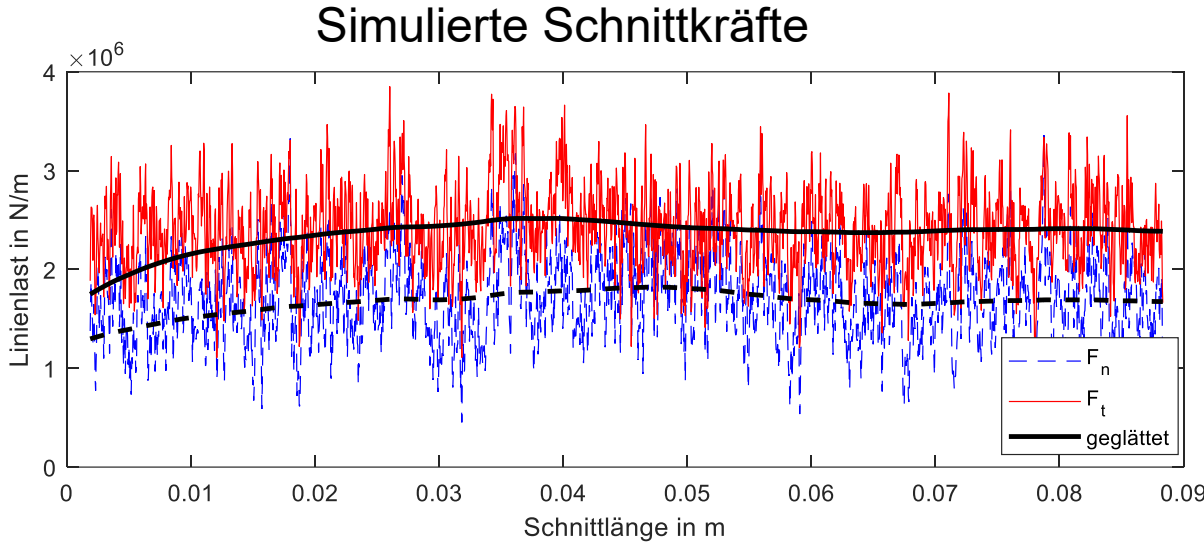
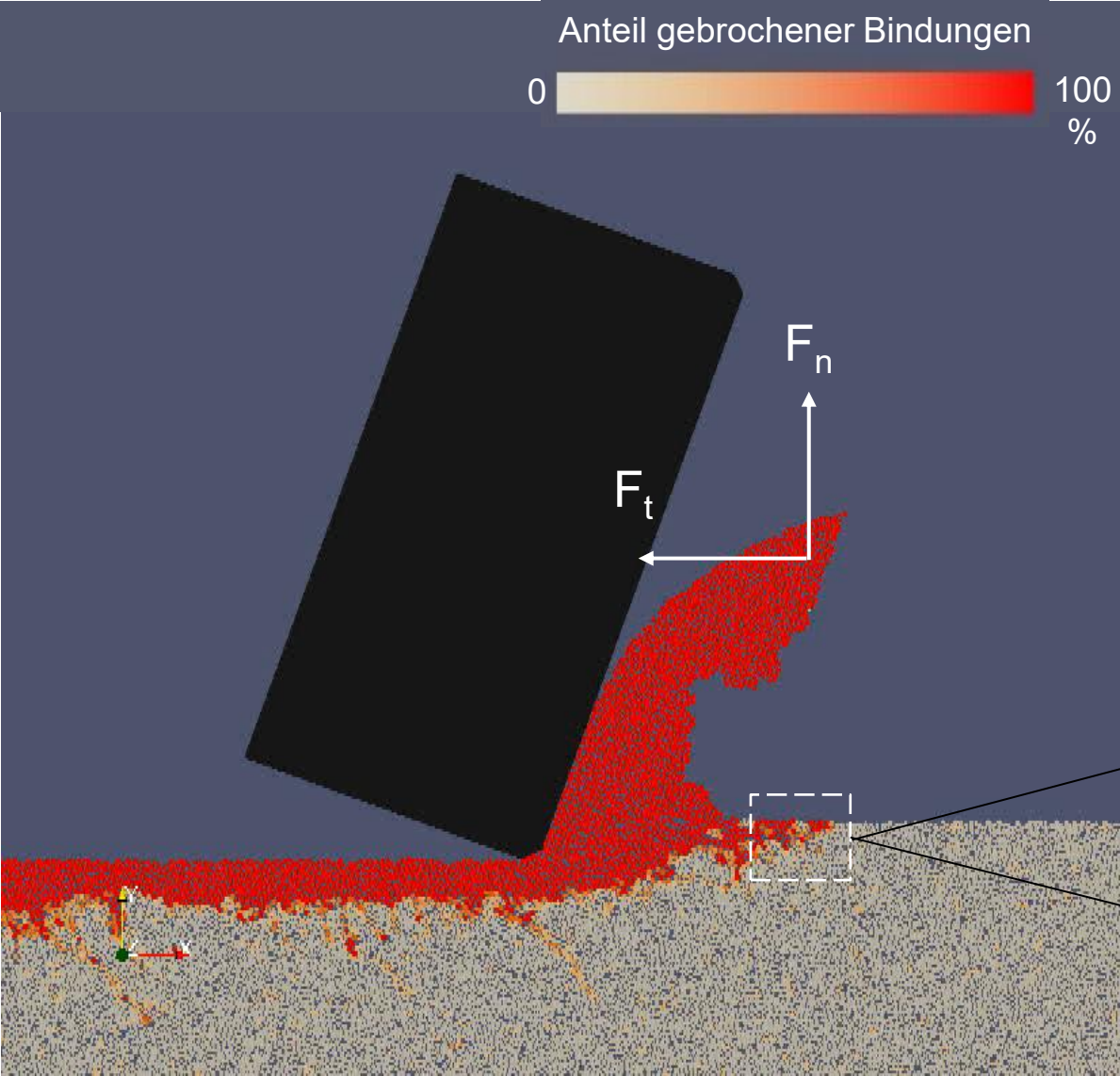


Simulation des untertägigen Gesteinsschneidprozesses

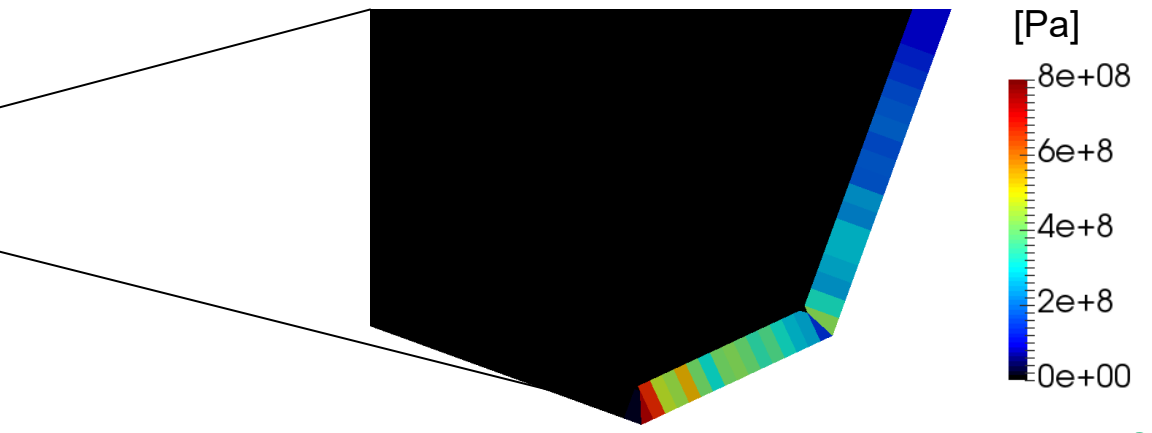
Zweidimensionale Implementierung



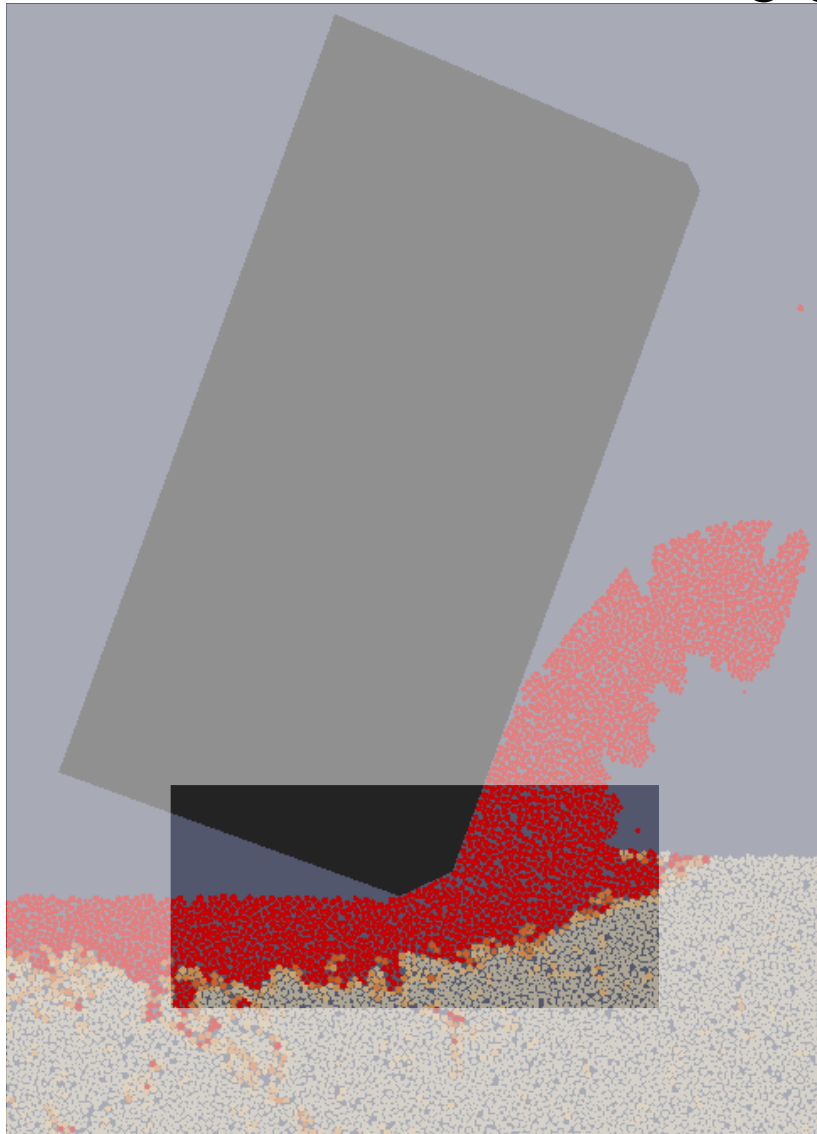
Simulation des untertägigen Gesteinsschneidprozesses



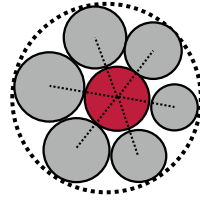
Normalspannung an der Schneide



Simulation des untertägigen Gesteinsschneidprozesses



DEM



Position $x_i^{(p)}$

Geschwindigkeit $v_i^{(p)}$

Kontaktkraft $F_j^{(c)}$

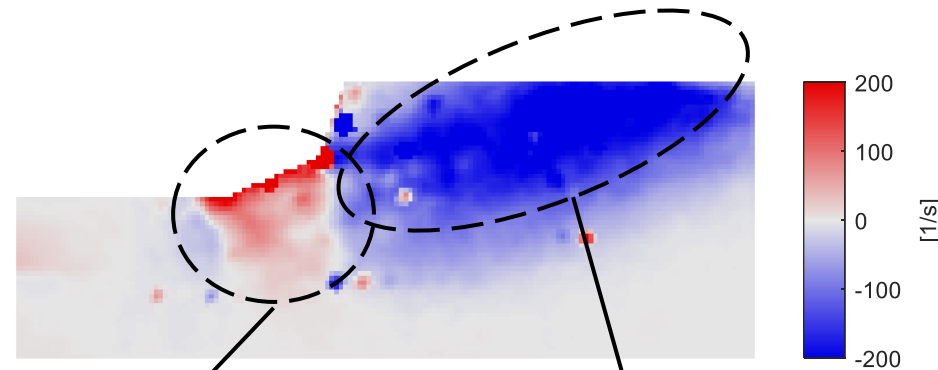
$$v_i^{(p)}, x_i^{(p)} \rightarrow \dot{\epsilon}$$

$$F_j^{(c)}, x_i^{(p)} \rightarrow \sigma$$

Kontinuumsmechanik

Dehnratenfeld $\dot{\epsilon}$

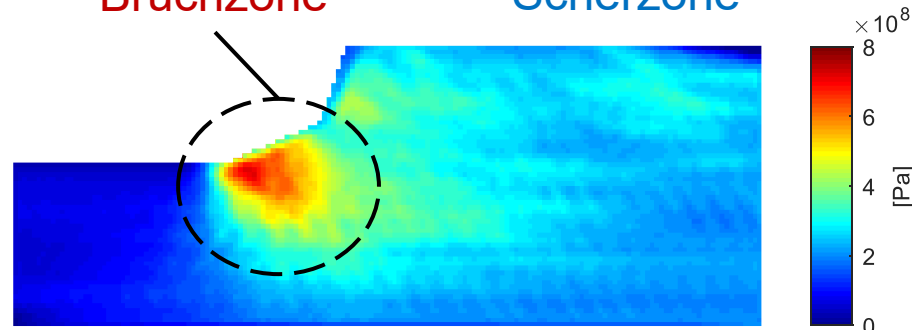
Spannungsfeld σ



Bruchzone

Scherzone

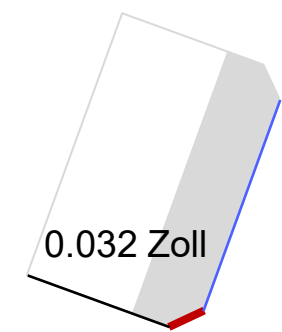
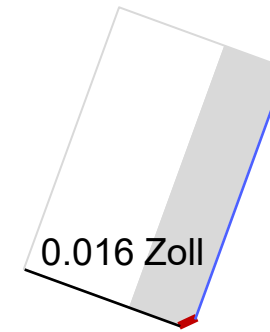
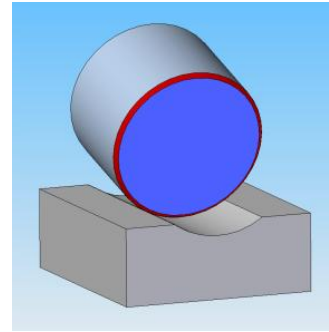
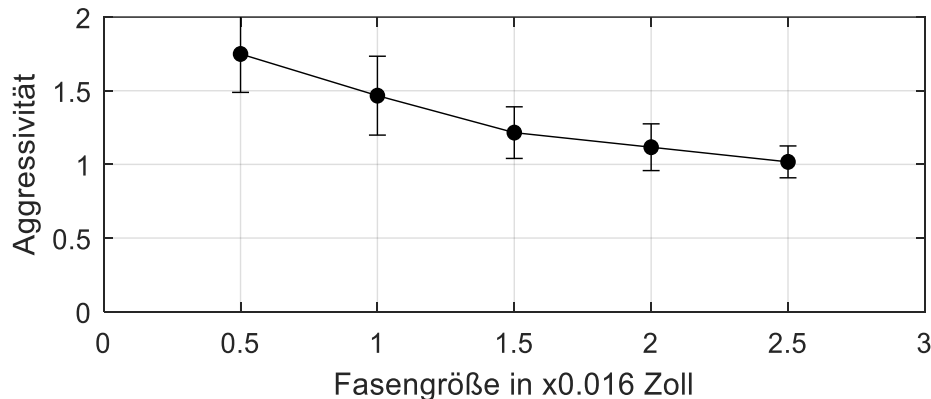
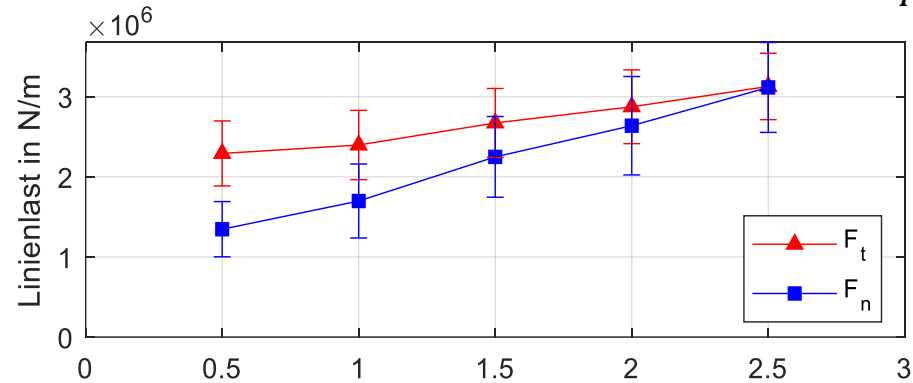
Gemittelte
volumetrische
Dehnrates $\dot{\epsilon}_V$



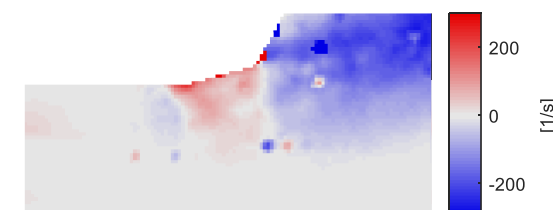
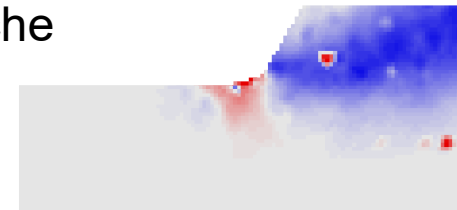
Gemittelte
volumetrische
Spannung σ_V

Simulation des untertägigen Gesteinsschneidprozesses

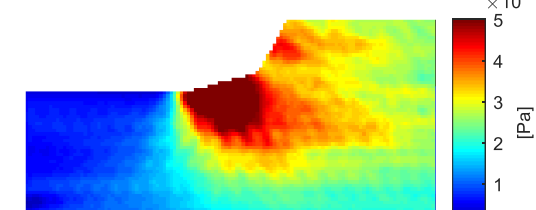
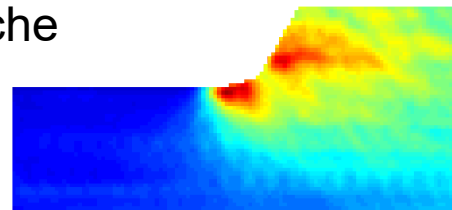
Gemittelte Schnittkräfte und Aggressivität $\frac{F_t}{F_n}$



Volumetrische Dehnrate



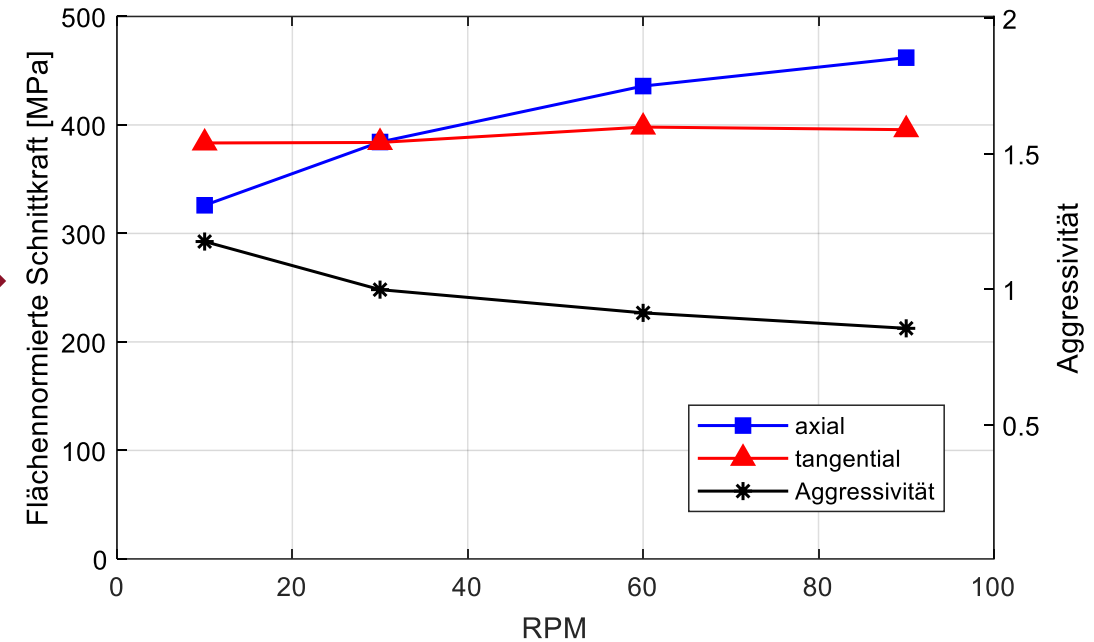
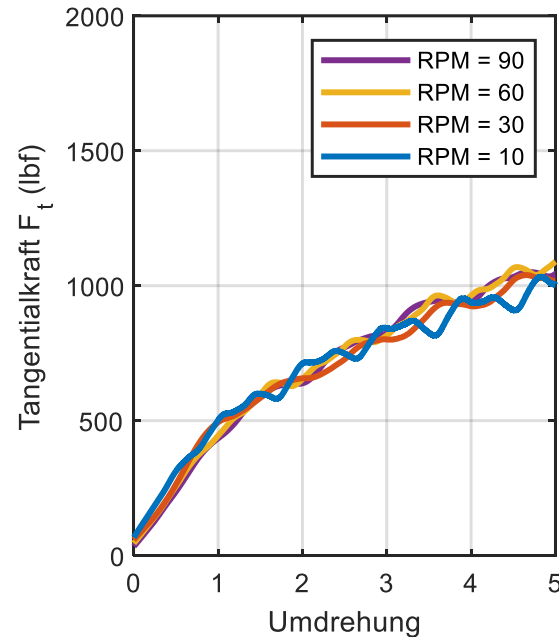
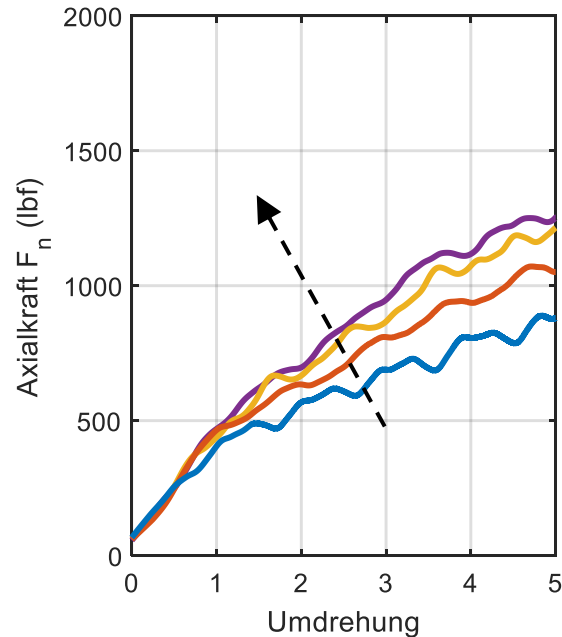
Volumetrische Spannung



- Die Fase hat einen größeren Einfluss auf die axiale als auf die tangentielle Schnittkraft.
- Mit zunehmender Fasengröße wird die Spannungskonzentration in der Bruchzone stärker

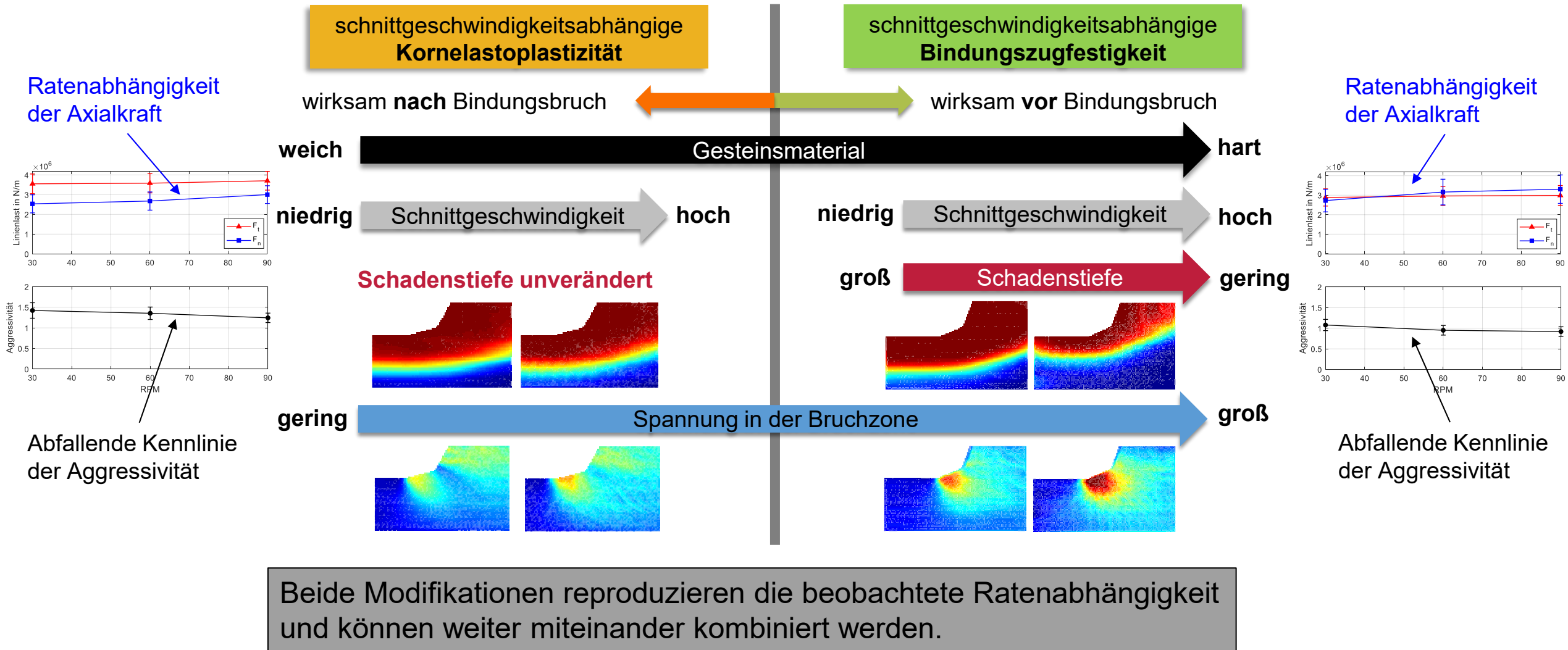
Charakterisierte Ratenabhängigkeit im Einzelschneidversuch

Lineare Regression zwischen Schnittfläche und Schnittkräften



- Ratenabhängigkeit der **Axialkraft** deutlicher als **Tangentialkraft**
- Über die Schnittgeschwindigkeit abfallende Kennlinie der Aggressivität

Modifikationen des Partikelkontaktmodell mit der Schnittgeschwindigkeit



Ratenabhängigkeit mit schwankender Schneidbewegung

Partikelmodell mit schnittgeschwindigkeitsabhängiger

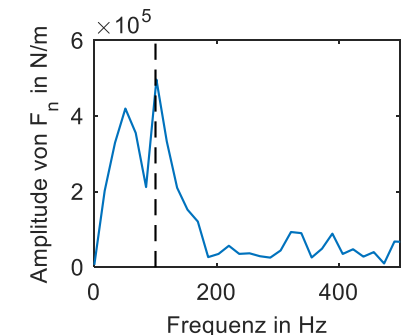
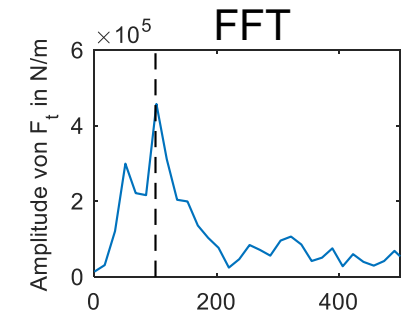
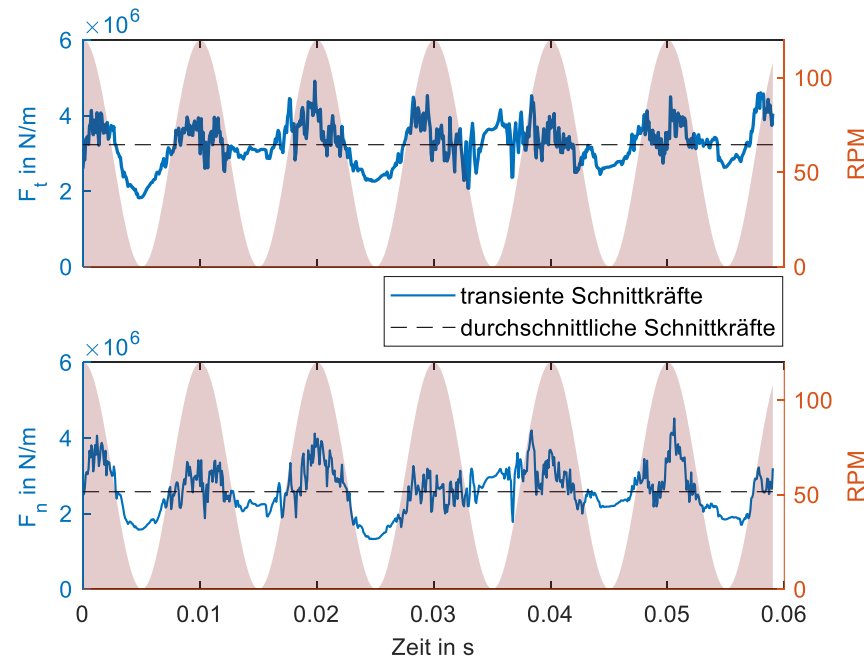
Kornelastoplastizität

und

Bindungszugfestigkeit

$$\bar{\varphi} + \hat{\varphi} \cos(\Omega t) =$$

$$60 \text{ RPM} + 60 \text{ RPM} \cdot \cos(100 \text{ Hz} \cdot 2\pi t)$$



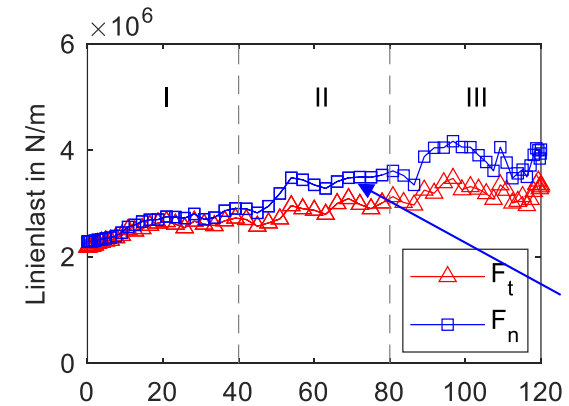
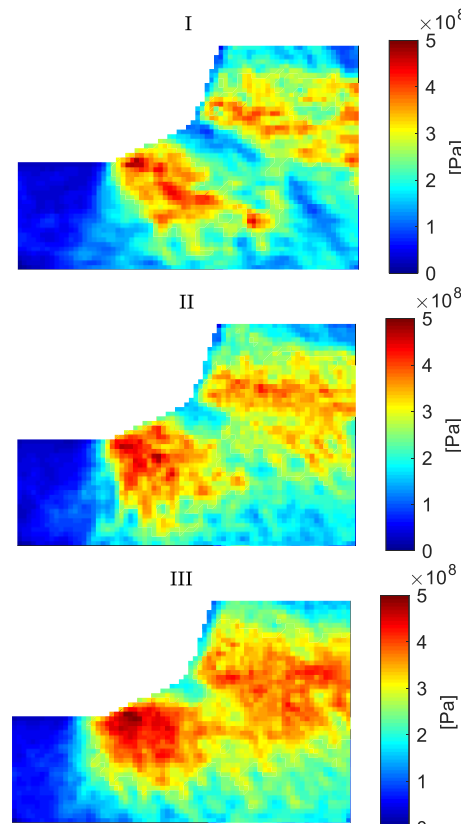
Ratenabhängigkeit mit schwankender Schneidbewegung

Partikelmodell mit schnittgeschwindigkeitsabhängiger

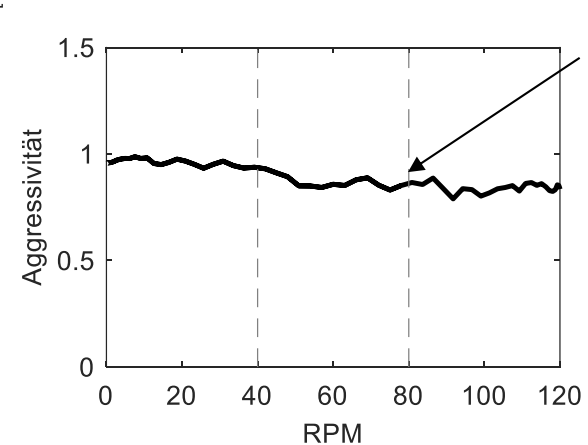
Kornelastoplastizität

und

Bindungszugfestigkeit



Ratenabhängigkeit der Axialkraft



Abfallende Kennlinie der Aggressivität

Ratenabhängige Meißelkraftkennfelder und abfallende Widerstandskennlinien

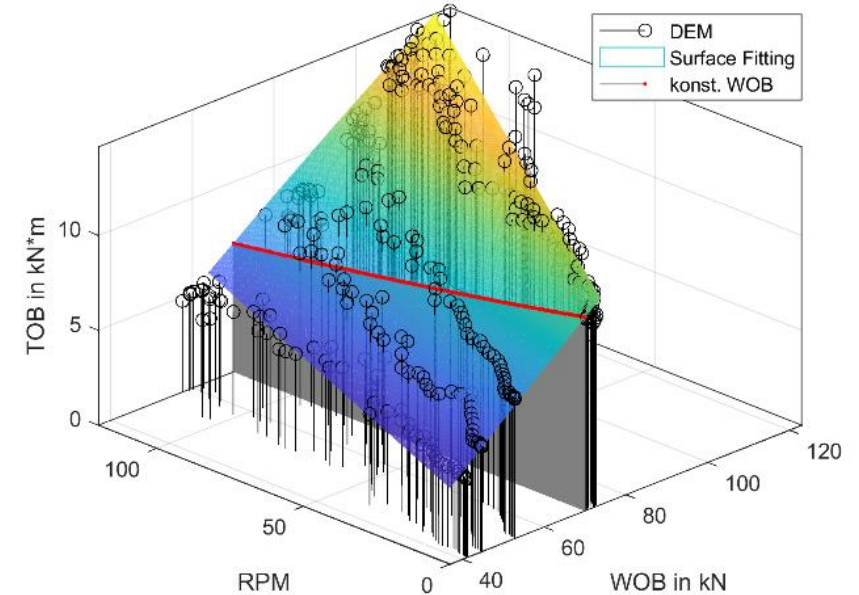
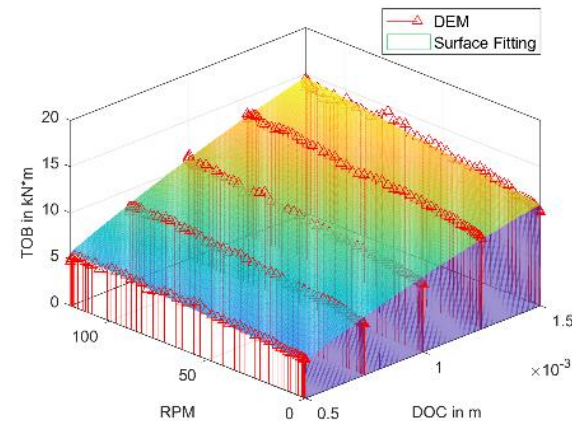
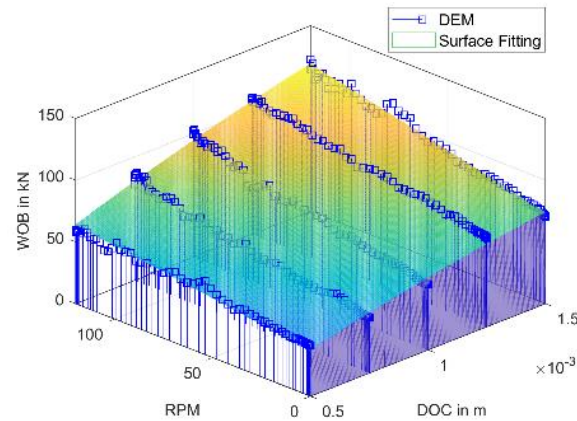
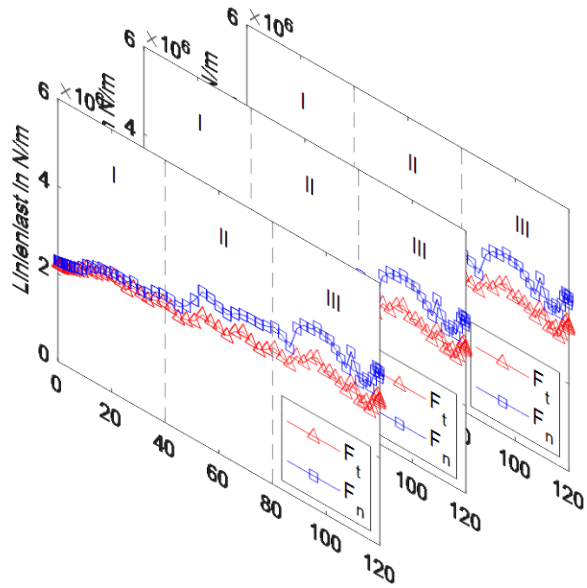
Schnittkräfte mit verschiedenen Schnitttiefen



Ratenabhängige Meißelkraftkennfelder



TOB-Kennlinie unter konstantem WOB



Skalierung von Einzelschneide zu Vollmeißel ohne Berücksichtigung der Meißelgeometrie

Ratenabhängige Meißelkraftkennfelder und abfallende Widerstandskennlinien

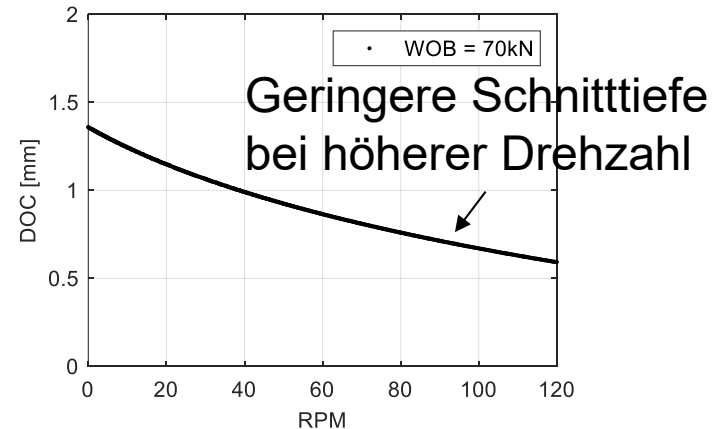
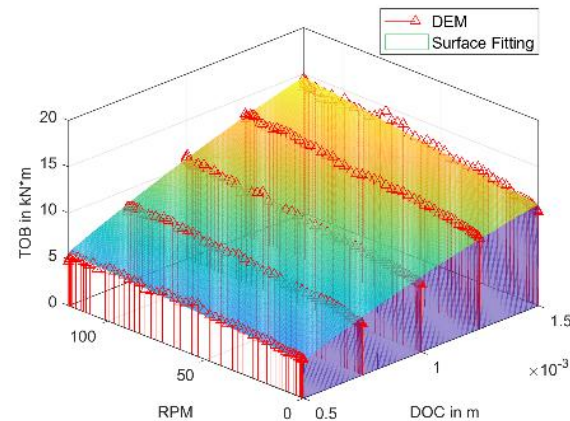
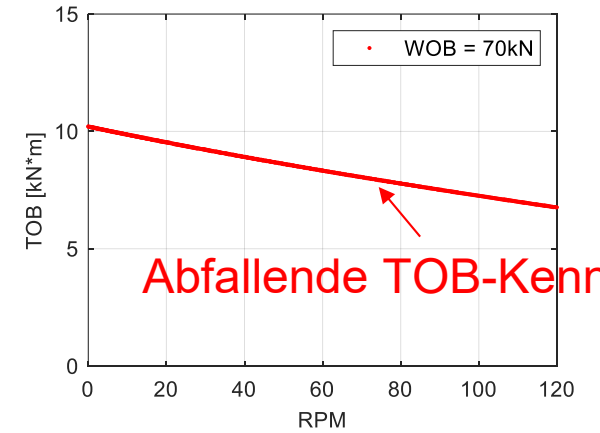
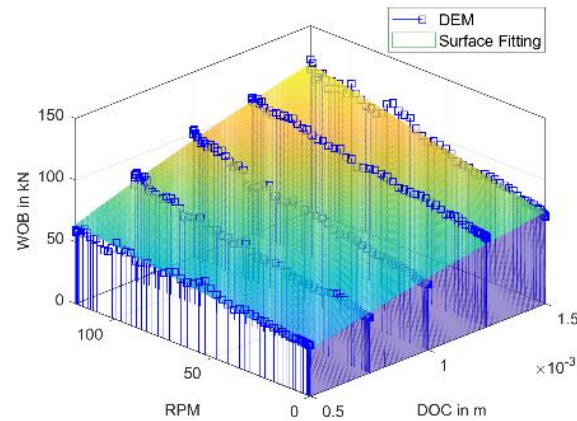
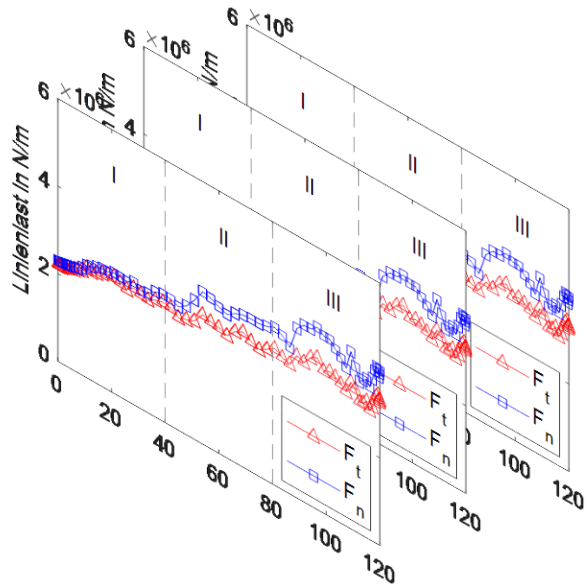
Schnittkräfte mit verschiedenen Schnitttiefen



Ratenabhängige Meißelkraftkennfelder

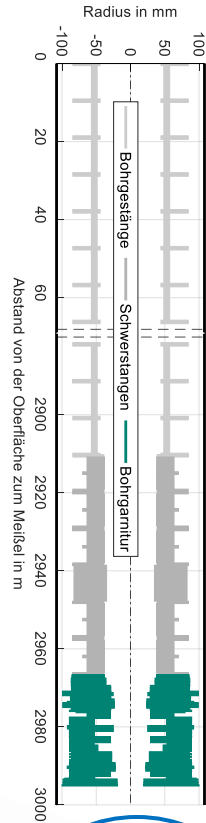
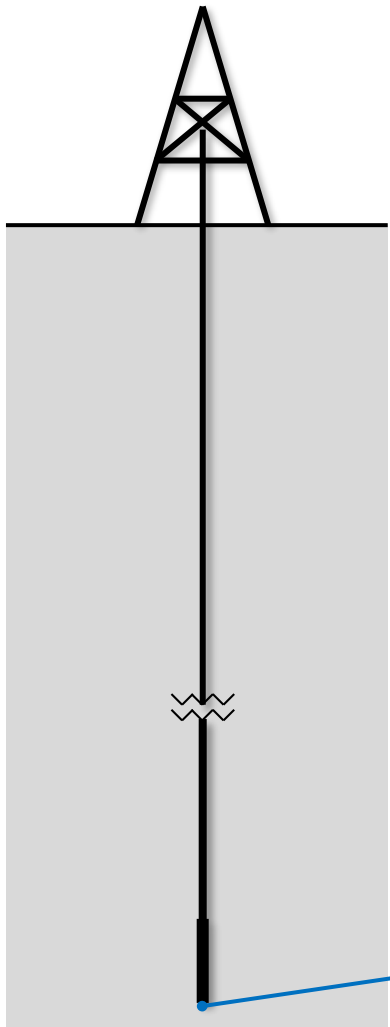


TOB-Kennlinie unter konstantem WOB

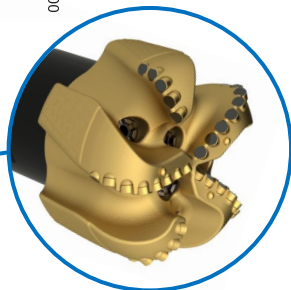
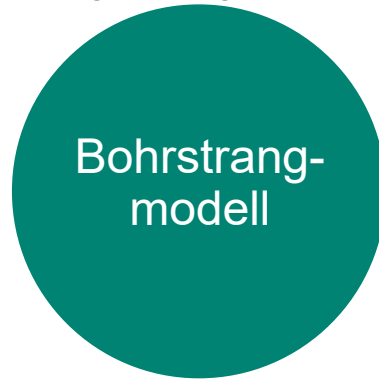


Skalierung von Einzelschneide zu Vollmeißel ohne Berücksichtigung der Meißelgeometrie

Dynamische Kopplung mit Bohrstrangmodell



3000 m Gesamtlänge
mit BHA und sich
wiederholenden
Bohrgestängen



- FEM-Modell mit 6052 physikalischen axialen und torsionalen Freiheitsgraden

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{z}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{z}_2 \\ \vdots \\ \ddot{\varphi}_n \\ \ddot{z}_n \end{bmatrix} + \mathbf{C} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{z}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dot{z}_2 \\ \vdots \\ \dot{\varphi}_n \\ \dot{z}_n \end{bmatrix} + \mathbf{K} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ z_1 \\ \varphi_2 \\ z_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \text{TOB} \\ \text{WOB} \end{bmatrix}$$

- Modale Transformation und Reduktion auf 1 HFTO-Mode und mehrere axial benachbarte Moden

$$\begin{cases} \ddot{q}_{to} + 2\xi_{to}\omega_{to}\dot{q}_{to} + \omega_{to}^2 q_{to} = v_{to}^{\text{bit}} \cdot \text{TOB} \\ \ddot{q}_{ax,i} + 2\xi_{ax,i}\omega_{ax,i}\dot{q}_{ax,i} + \omega_{ax,i}^2 q_{ax,i} = v_{ax,i}^{\text{bit}} \cdot \text{WOB} \end{cases}$$

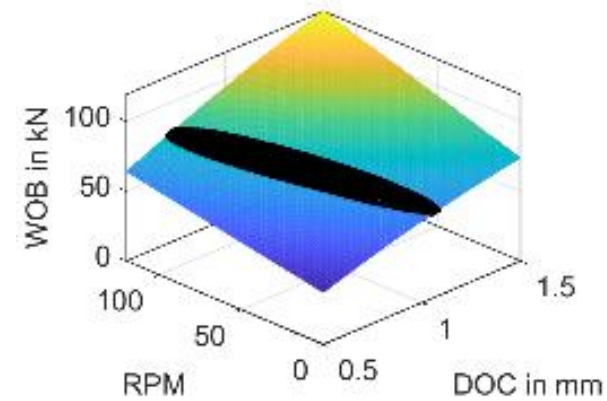
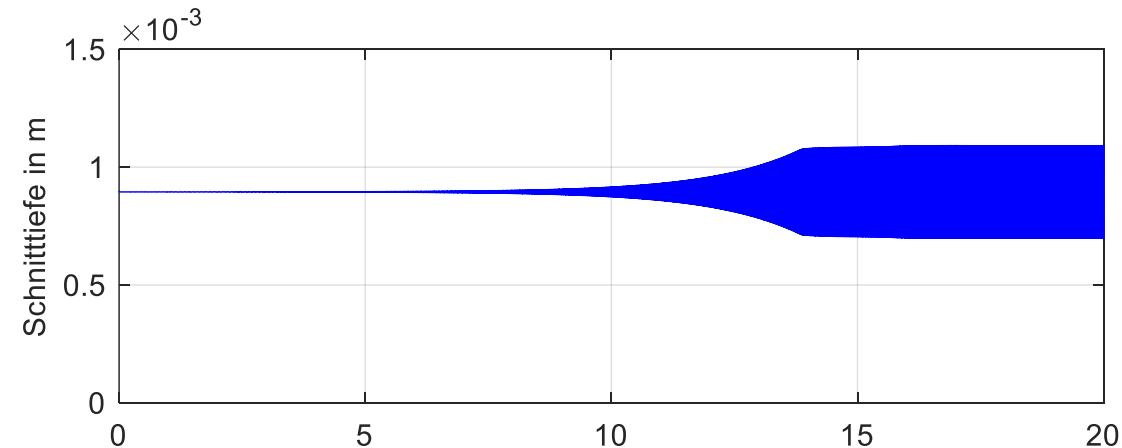
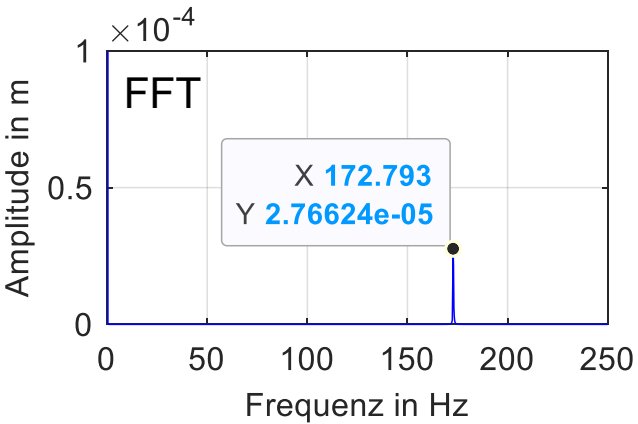
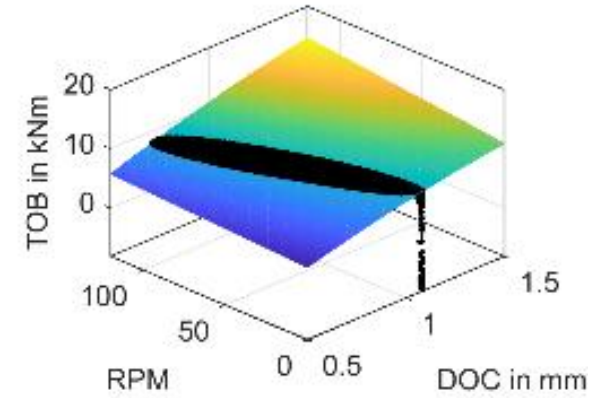
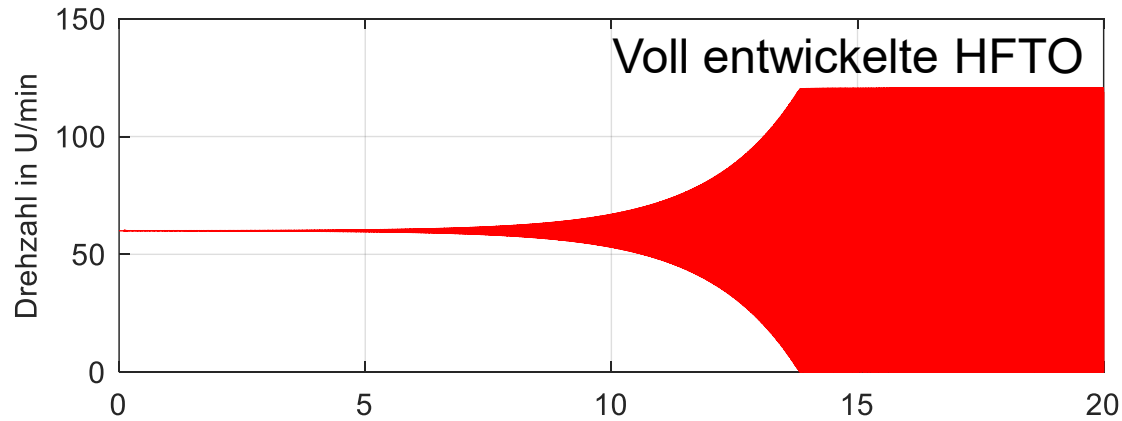
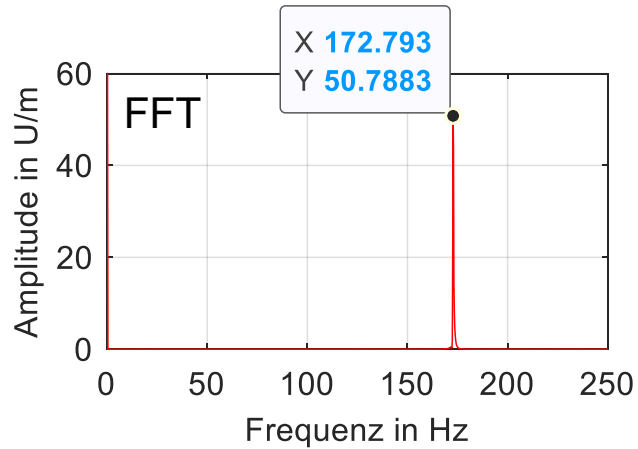
Zeitbereichsanalyse

$$\begin{cases} \ddot{q}_{to} + 2\xi_{to}\omega_{to}\dot{q}_{to} + \omega_{to}^2 q_{to} = v_{to}^{bit} \cdot TOB \\ \ddot{q}_{ax,i} + 2\xi_{ax,i}\omega_{ax,i}\dot{q}_{ax,i} + \omega_{ax,i}^2 q_{ax,i} = v_{ax,i}^{bit} \cdot WOB \end{cases}$$

mit $\omega_{to} = 172.5 \text{ Hz} \times 2\pi$
 $\omega_{ax,i} \in \omega_{to} \pm 5 \text{ Hz} \times 2\pi$



Meißelkraftkennfelder
aus Partikelsimulation



Zusammenfassung

- Wie kann der ratenabhängige Gesteinsschneidprozess in einer geeigneten Simulation nachgebildet werden?

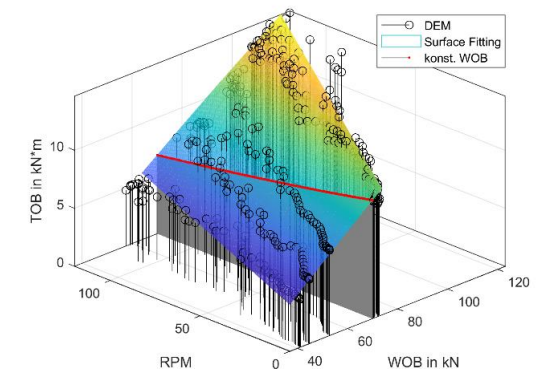
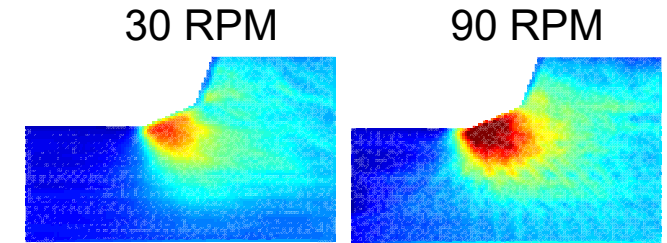
Qualitativ gute Reproduzierbarkeit der Ratenabhängigkeit mit der strategisch modifizierten Partikelsimulation

- Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Ratenabhängigkeit und der abfallenden TOB-Kennlinie?

Die Ratenabhängigkeit der Axialkraft führt zusammen mit der axial-torsionalen Kopplung zu der abfallenden TOB-Kennlinie.

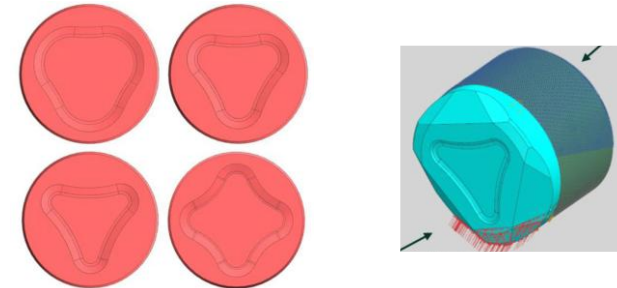
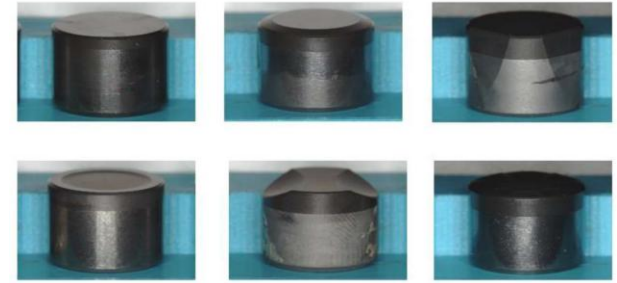
- Wie wirkt sich die Ratenabhängigkeit im Gesteinsschneidprozess auf selbsterregte HFTO aus?

Anfälliger für HFTO mit größerer Ratenabhängigkeit;
Veränderung der HFTO-Erregbarkeit durch Schneidengeometrie

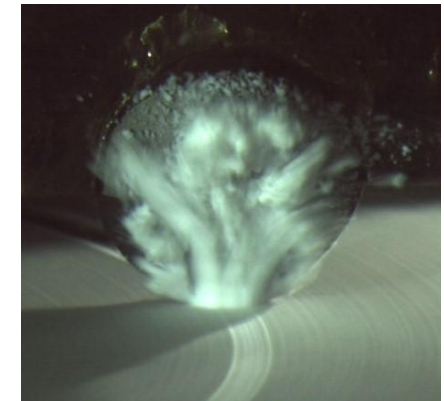


Ausblick

- Design-Guidelines für komplexere Schneidenformen, die HFTO im Feld systematisch unterdrücken.
- Physikalische Modellierung der Wechselwirkung zwischen Schneide, Gestein und Bohrflüssigkeit
- Beschleunigung durch Hochleistungsrechnen oder KI-gestützte Modellierung



[KUE24] [ROB25] [HAN26]



[Baker Hughes]

Baker Hughes 

Literaturverzeichnis

- [HOH16] Hohl, A., Tergeist, M., Oueslati, H., Herbig, C., Ichaoui, M., Ostermeyer, G. P., & Reckmann, H. (2016, March). Prediction and mitigation of torsional vibrations in drilling systems. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D021S017R005). SPE.
- [DET92] Detournay, E.; Defourny, P.: A phenomenological model for the drilling action of drag bits. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 1/29, S. 13–23, 1992.
- [LED07] Ledgerwood III, L. W. (2007, May). PFC modeling of rock cutting under high pressure conditions. In *ARMA Canada-US Rock Mechanics Symposium* (pp. ARMA-07). ARMA
- [POT04] Potyondy, D. O.; Cundall, P. A.: A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 8/41, S. 1329–1364, 2004.
- [TER19] Tergeist, M.: Partikelmethode zur Modellierung der Kontakte von Bohrstrang und Gestein beim Tiefbohren. Dissertation, Institut für Dynamik und Schwingungen, TU Braunschweig, 2019.
- [KUE24] Kueck, A., Goodman, A., Hayes, B., Huang, X., Rosero, P., Valbuena, F., ... & Bomidi, J. (2024, February). New Bit Optimization Method Proves Superior Drilling Performance and Reliability Showcased by Lab Data and Record ROP in North-America Land. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D011S006R004). SPE
- [ROB25] Robertson, A., Hanafy, A., Valbuena, F., Gomez, L., Moulton, H., Tilleman, D., ... & Bomidi, J. (2025, February). Drill Bit Performance Improvements in Challenging North America Land Drilling Applications Through Optimization of PDC Cutter Technologies. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D021S008R005). SPE.
- [HAN26] Hanafy, A., Robertson, A., Huang, X., & Bomidi, J. (2026, March). A Multiphysics FEA Model to Enhance PDC Cutter Design and Forensics for Drilling Hard and Abrasive Interbedded Lithologies. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D011S008R001). SPE.