



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für **I^{DS}**
Dynamik und Schwingungen



Der Geothermie Kongress 2018, Haus der Technik, Essen, 29.11.2018

Das Potential von HIL-Simulationen zur Optimierung von Geothermiebohrungen

Georg-Peter Ostermeyer, Frank Schiefer, Mohamed Ichaoui,
Dennis Schulz, Tarin Srisupattarawanit, Christoph Hanne

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

OBS
FKZ: 0324115B

Agenda

- Motivation und Einleitung
- Stick-Slip in HIL-Simulationen
- Einfluss von Gesteinsinhomogenitäten/Störungszonen
- Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

Reales System

Herausforderungen Tiefe Geothermie:
HPHT, Hartgestein, Störungszonen,...

- Verminderung Bohrvorschub
- Ausfall Bohrwerkzeug
- Schlechtere Bohrlochqualität
- Erhöhte Bohrkosten
-

Vergleich

Bohrstrang:

$$d_{ds} = 5'', l_{ds} = 5000m$$

$$d_{ds}:l_{ds} \approx 1:40000$$

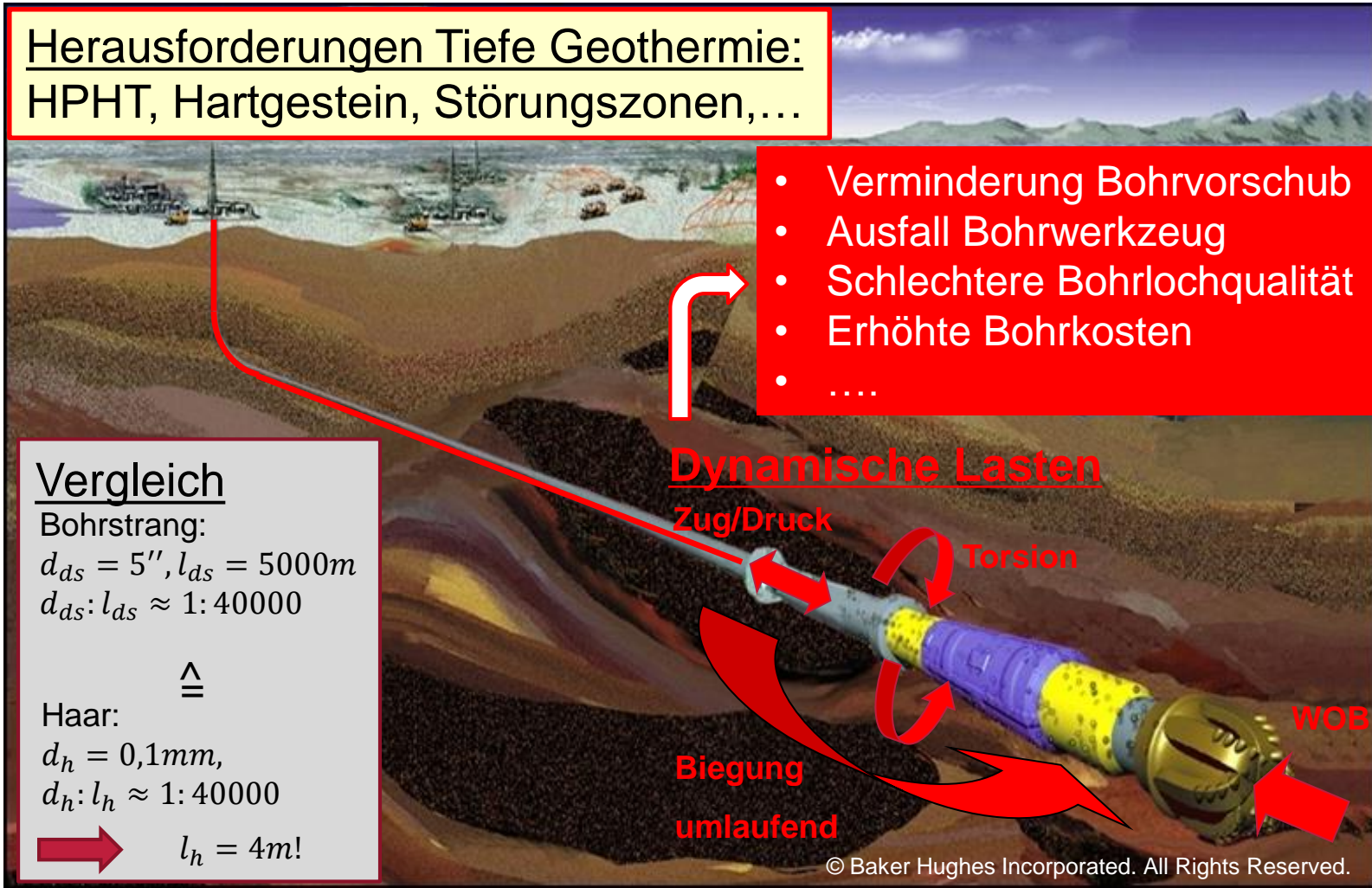
$\hat{=}$

Haar:

$$d_h = 0,1mm,$$

$$d_h:l_h \approx 1:40000$$

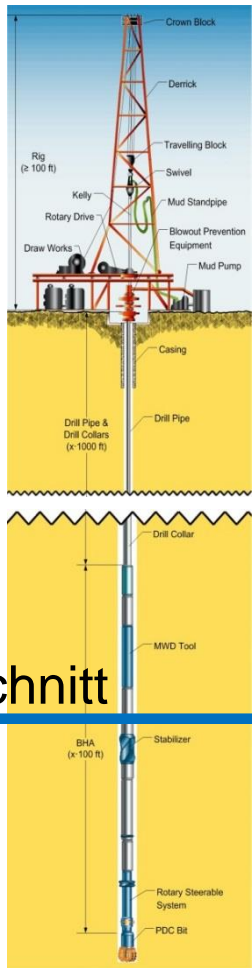
➔ $l_h = 4m!$



© Baker Hughes Incorporated. All Rights Reserved.

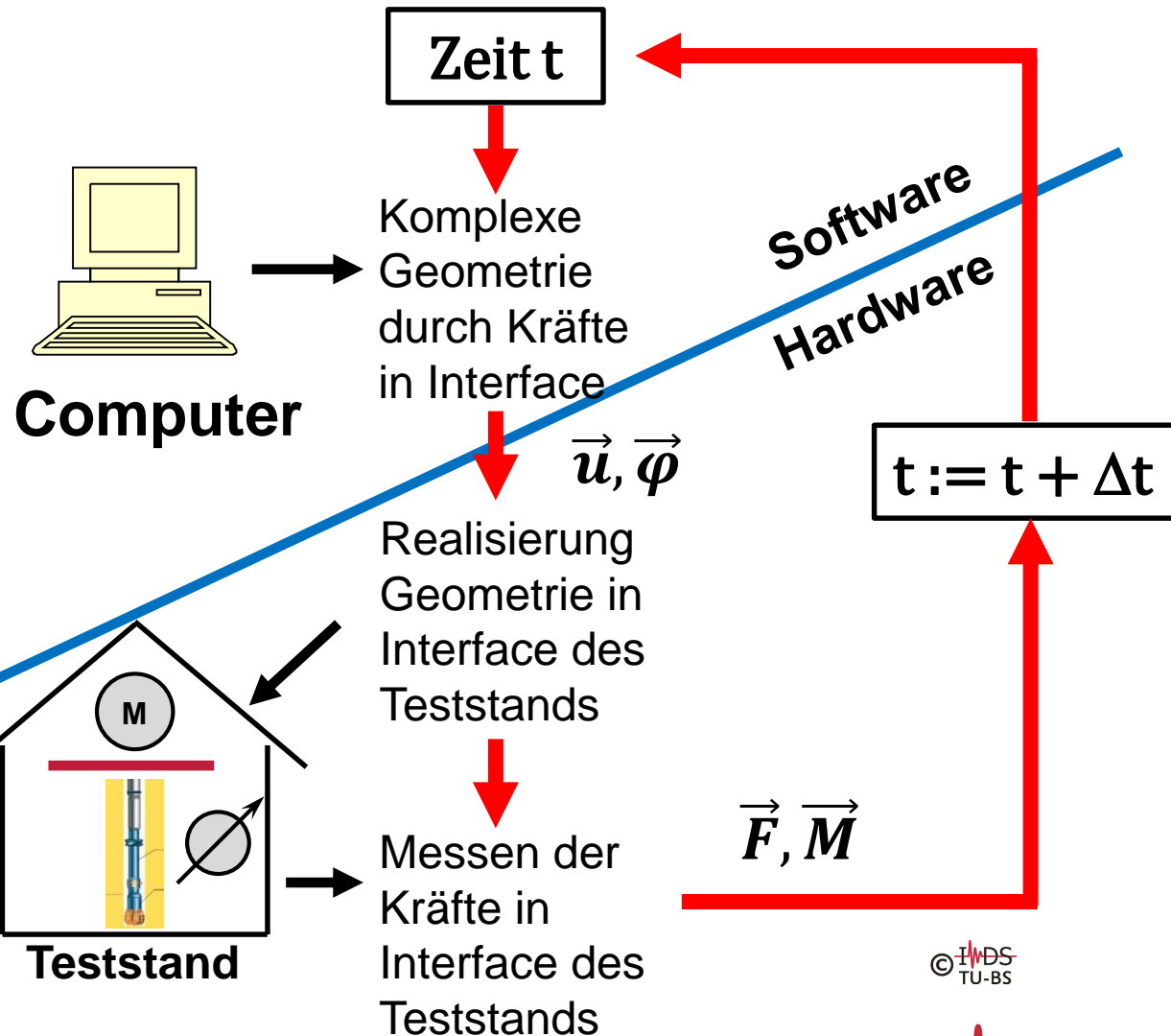
HIL-Simulation – Ausgangsidee / Konzept

[OST, Celle Drilling 2013]



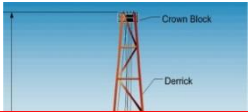
Schnitt

Interface



© I+DS TU-BS

Tiefbohrsystem



Zeit t



→ Forschungsverbundprojekt

“OBS – Optimierung des Bohrfortschritts durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch”

Förderkennzeichen: 0324115

Förderperiode: 08/2016 – 01/2020

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Tiefbohrsystem

Teststand

Kräfte in
Interface des
Teststands



Modellbildung - Strategie

Reales System

- Dynamik quasi nicht beobachtbar
- punktuell Messdaten in BHA

→ geeignetes Modell notwendig



© Baker Hughes Incorporated. All Rights Reserved.

Modellbildung – Strategie

Reales System

Bohrung

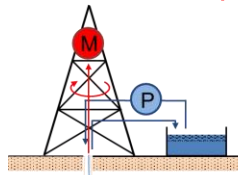
- Prozess
- Bohrlochgeometrie
- Strangaufbau
- BHA-Aufbau
- Spülung

Formation

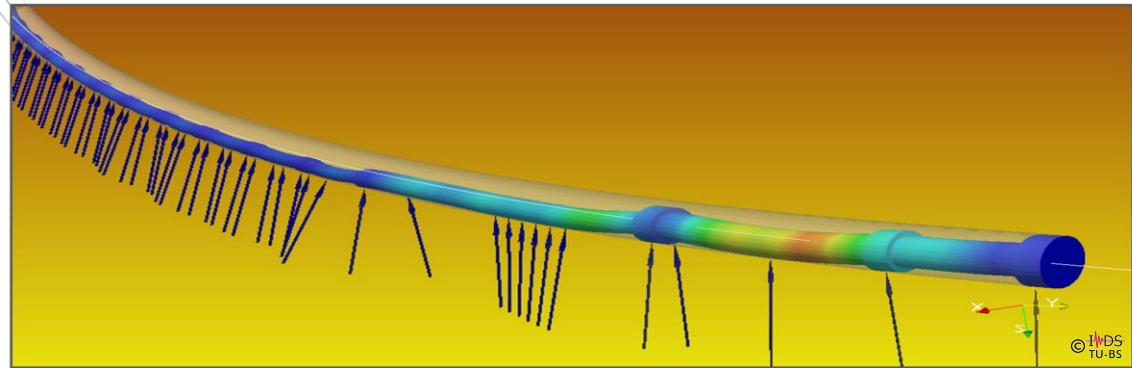
- E-Modul, Festigkeit
- Störungen
- Druck
- Temperatur

Komplexes Modell des Gesamtsystems

(Approximation des realen Systems!)



- Validierung mit Bohrturmparametern und punktuellen Messdaten in BHA
- Beschreibung der Bohrstrangdynamik, Problemangepasste Modellbildung
- Abbildung beliebiger Bohrungen auf Geothermie



Modellbildung – Strategie

Reales System

Bohrung

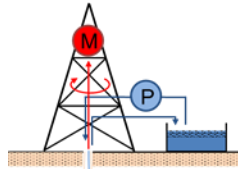
- Prozess
- Bohrloch-geometrie
- Strangaufbau
- BHA-Aufbau
- Spülung

Formation

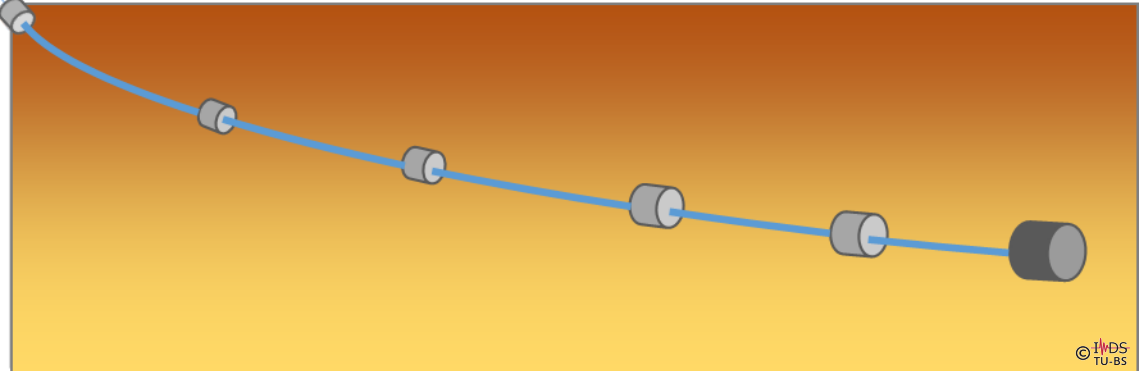
- E-Modul, Festigkeit
- Störungen
- Druck
- Temperatur

Komplexes Modell des Gesamtsystems

Realtimefähiges Modell des Gesamtsystems



- Ziel: HIL-fähige Bohrstrangmodelle
- Reduktionstechniken
- Validierung am komplexen Modell



© IIDS
TU-BS

Einleitung: Modellbildung – Strategie

Reales System

Bohrung

- Prozess
- Bohrloch-geometrie
- Strangaufbau
- BHA-Aufbau
- Spülung

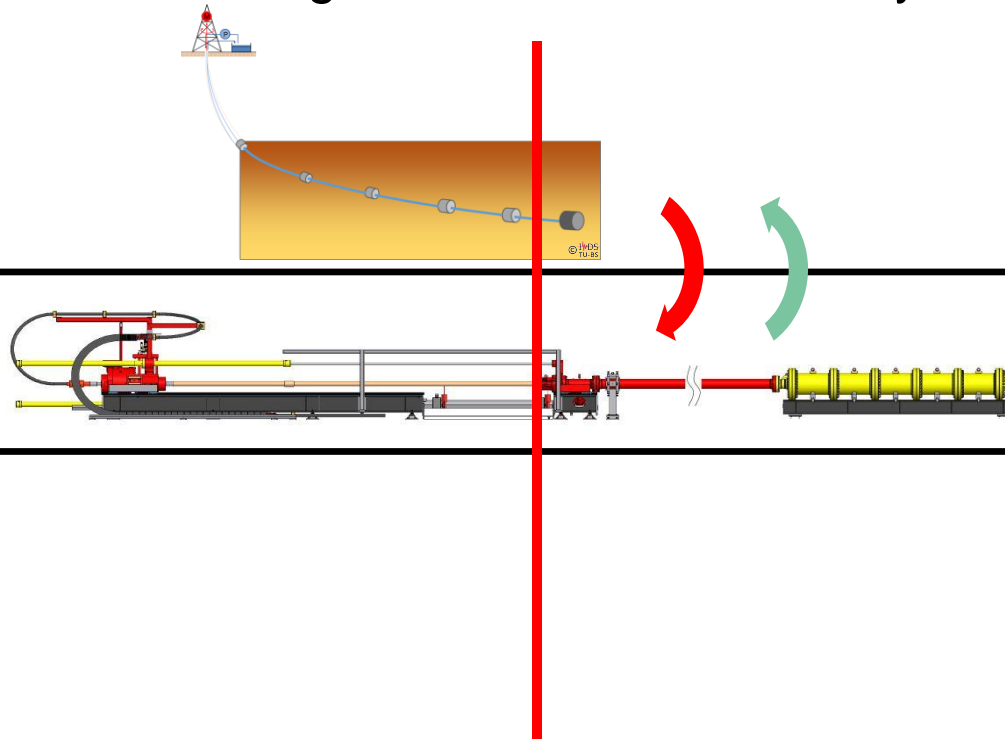
Teststand DSC

Formation

- E-Modul, Festigkeit
- Störungen
- Druck
- Temperatur

Komplexes Modell des Gesamtsystems

Realtimefähiges Modell des Gesamtsystems



Teststand

- Mechanik
- Aktuatoren
- Sensoren
- Elektr./Inf. Infrastruktur
- Messungen
- Realtime Daten Management

Einleitung: Modellbildung – Strategie

Reales System

Bohrung

- Prozess
- Bohrloch-geometrie
- Strangaufbau
- BHA-Aufbau
- Spülung

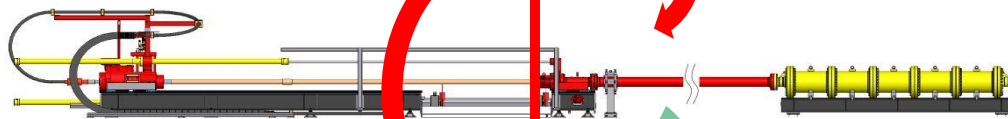
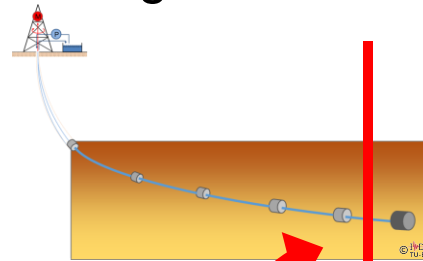
Teststand DSC

Formation

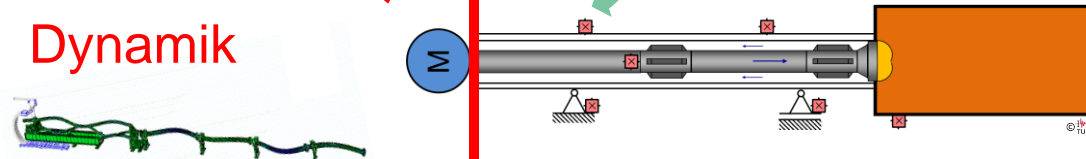
- E-Modul, Festigkeit
- Störungen
- Druck
- Temperatur

Komplexes Modell des Gesamtsystems

Realtimingfähiges Modell des Gesamtsystems



Parasitäre
Dynamik



Realtimingfähiges Modell des Teststands/BHA

Teststand

- Aktuatoren
- Sensoren
- Elektr./Inf. Infrastruktur
- Messungen
- Realtime Daten Management

Einleitung: Modellbildung – Strategie

Reales System  **Approximation durch OBS**

Bohrung

- Prozess
- Bohrloch-geometrie
- Strangaufbau
- BHA-Aufbau
- Spülung

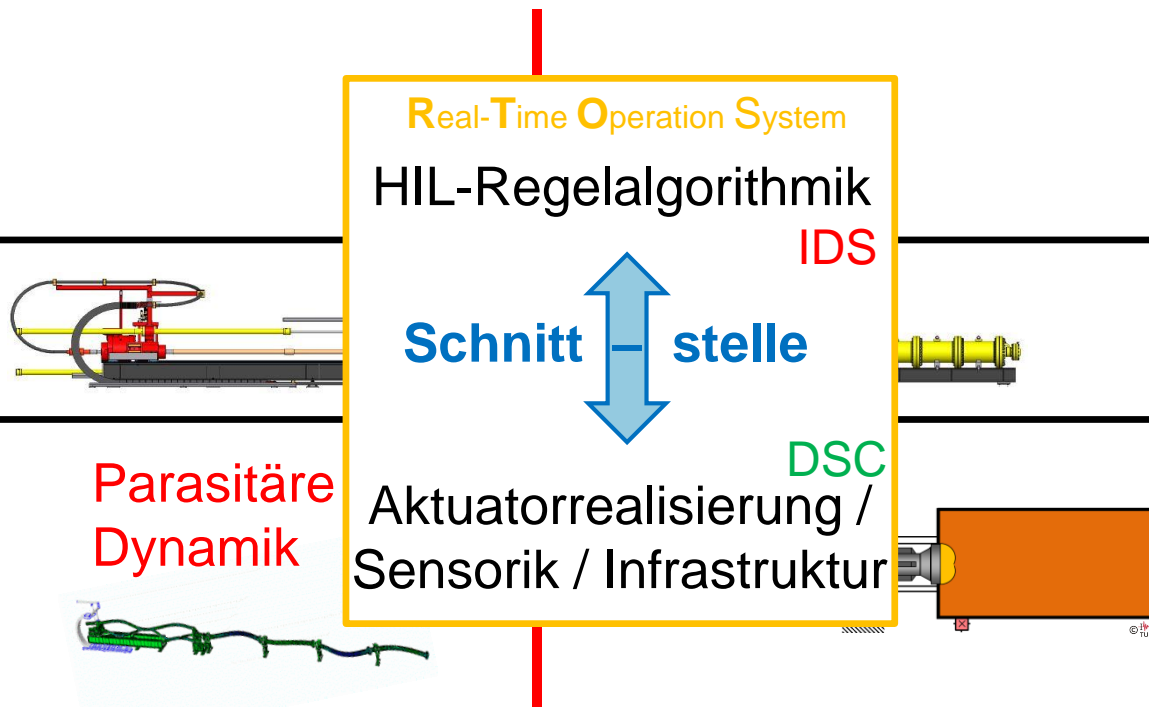
Teststand DSC

Formation

- E-Modul, Festigkeit
- Störungen
- Druck
- Temperatur

Komplexes Modell des Gesamtsystems

Realtimefähiges Modell des Gesamtsystems



Teststand

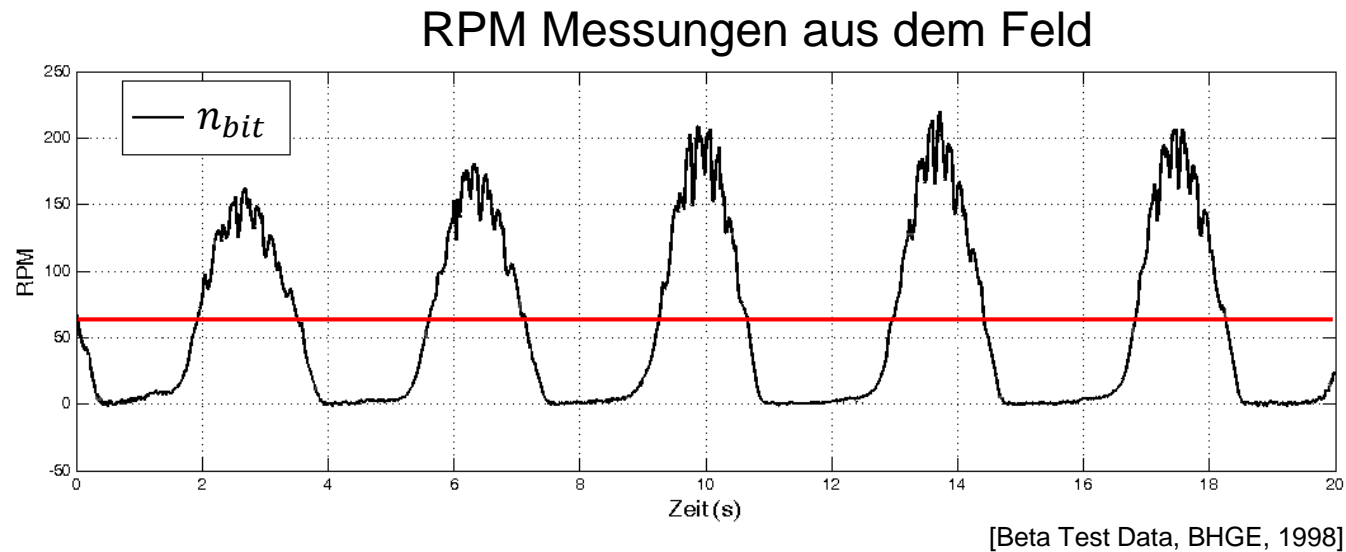
- Aktuatoren
- Sensoren
- Elektr./Inf. Infrastruktur
- Messungen
- Realtime Daten Management

Realtimefähiges Modell des Teststands/BHA

Agenda

- Motivation und Einleitung
- Stick-Slip in HIL-Simulationen
- Einfluss von Gesteinsinhomogenitäten/Störungszonen
- Zusammenfassung und Ausblick

Stick-Slip - Messungen aus dem Feld



$$\frac{n_{bit,slip}}{n_{rig}} = 2.6 \dots 3.6$$

Stick-Slip in Demonstrator / OSTRator



Aufbau

- Bohrloch: Plexiglasrohr, gerade – gekrümmt – geneigt (0° - 90°)
- Bohrstrang: ummantelte Stahlfeder sowie Stabilisatoren
- Meißel: diverse Reibpaarungen

Aktuatorik und Sensorik

- Topdrive: konstante oder langsam veränderliche Drehzahlen
Messung von Drehzahl und Drehmoment
- WOB-Einheit: einstellbare konstante Andruckkraft am Meißel
- Positionssensor: Position und Drehzahl des Bohrstrangs im Bohrloch bestimmbar

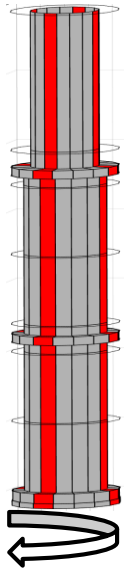
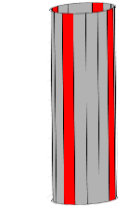
Ansteuerung und Elektronik

- Ansteuerung über Raspberry PI
- Leistungselektronik / Messelektronik, Stromversorgung über Netzkabel

Simulation und Dynamische Effekte

- Eigenmoden, Buckling, Snaking
- Stick-Slip, Whirl (Forward, Backward, Chaotic)
- Stabilitätskarten

Stick-Slip Simulation



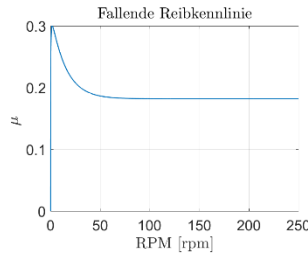
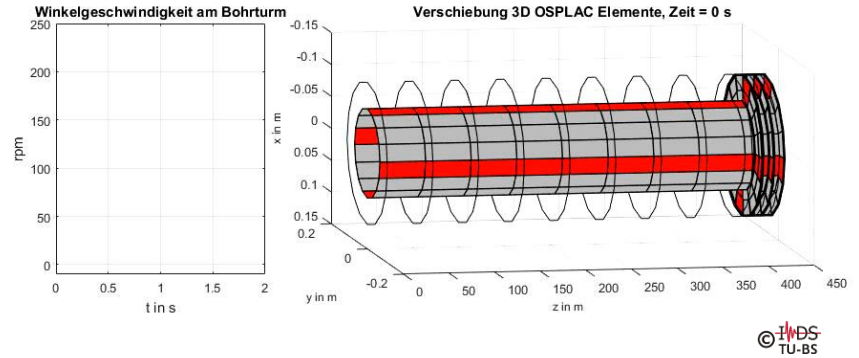
Beispiel:

$$\dot{\phi}_{rig} = 120rpm$$

WOB = const.

$$L_{ds} = 440m$$

➔ beliebige Parameter-
variationen möglich



abhängig von
Meißel-/Gesteinstyp

$\dot{\phi}_{bit}$ ➔

Stick-Slip Simulation

Arbeitspunkt zur Validierung des Meißelmodells,
Approximation durch fallende Reibcharakteristik

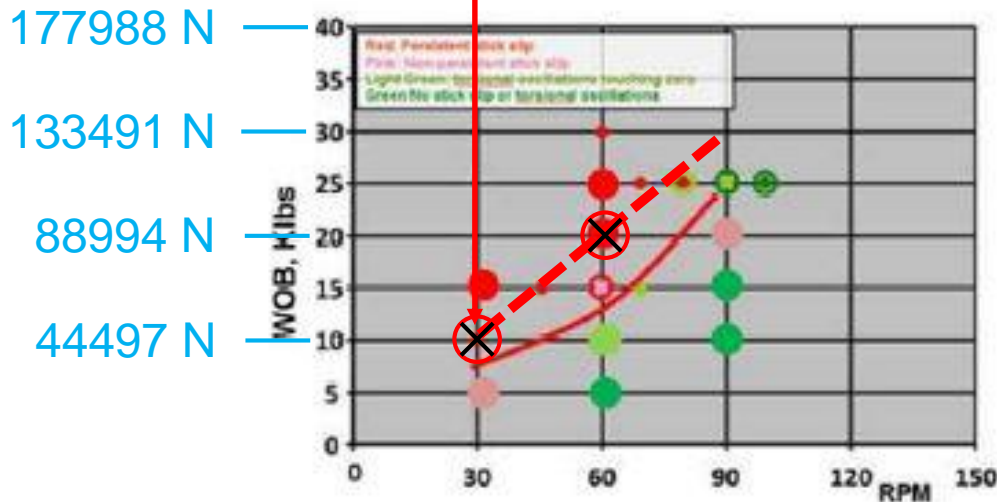


Fig. 8: Bit A without DOC control

[aus IADC/SPE 168026: Development and Testing of Stick/Slip-Resistant PDC-Bits, Schwefe et al. (BHI)]

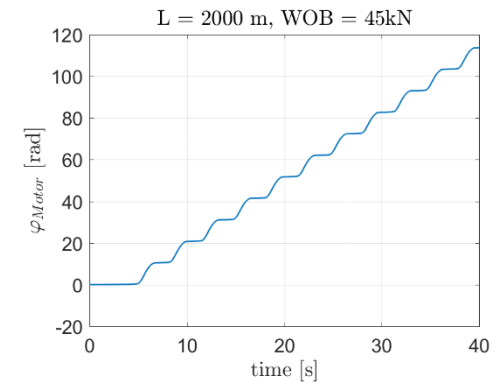
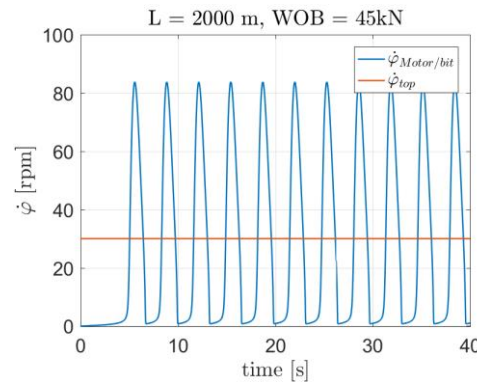
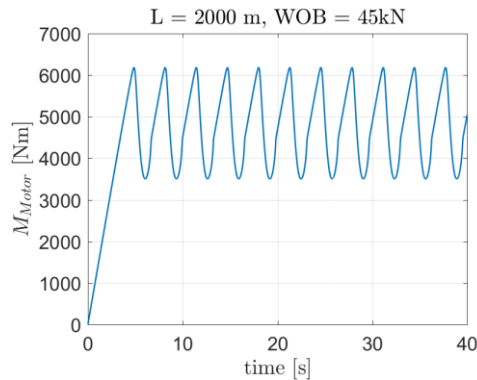
| Variante | RPM in U/min | WOB in kN | L_{BST} in m |
|----------|-----------------|--------------|-------------------|
| A1 | 30 | 45 | 1000 |
| A2 | 30 | 45 | 2000 |
| A3 | 30 | 45 | 4000 |
| A4 | 60 | 90 | 1000 |
| A5 | 60 | 90 | 2000 |
| A6 | 60 | 90 | 4000 |

Stick-Slip Simulation, exemplarische Ergebnisse

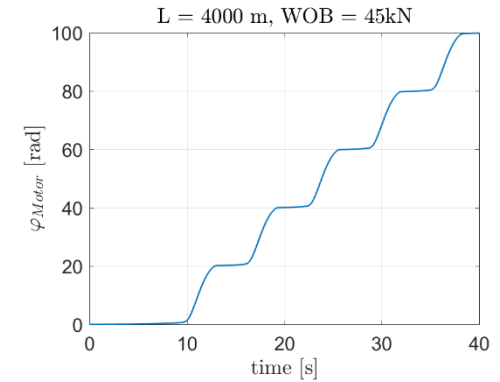
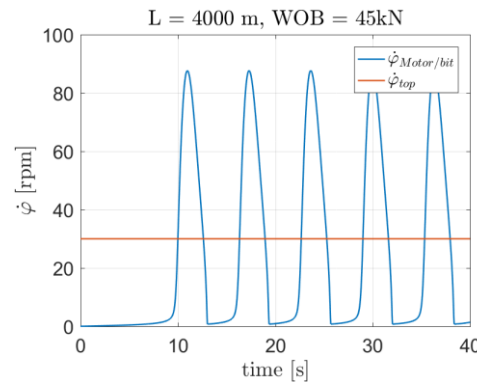
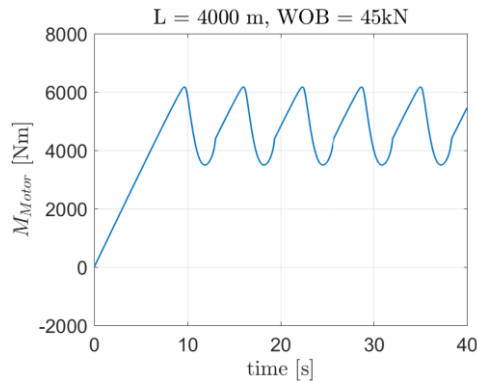
— BHA/Meißel

— Top drive

A2



A3



© IWS
TU-BS



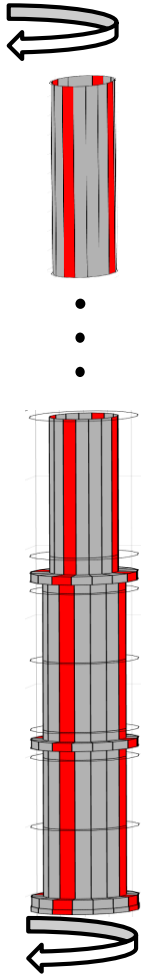
Technische
Universität
Braunschweig

29.11.2018 | Ostermeyer et al. | Folie 17 |

Das Potential von HIL-Simulationen zur Optimierung von Geothermiebohrungen

Institut für **IWS**
Dynamik und Schwingungen

Stick-Slip Simulation



Beispiel:

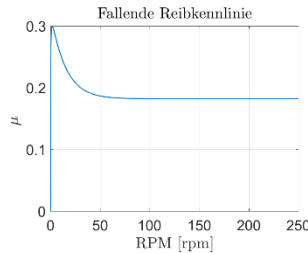
$$\dot{\phi}_{rig} = 120rpm$$

WOB = const.

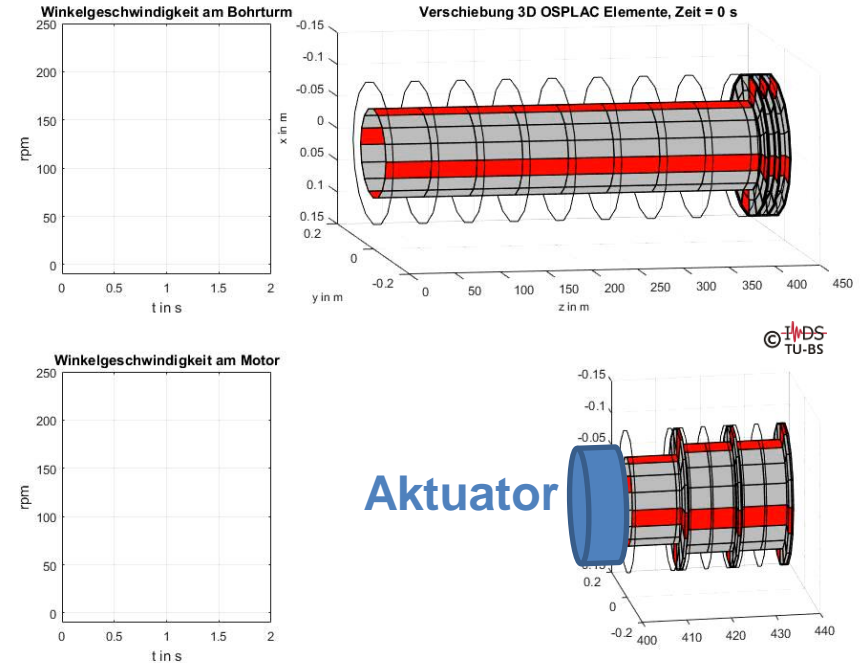
$$L_{ds} = 440m$$

➔ beliebige Parameter-
variationen möglich

$\dot{\phi}_{bit}$ ➔



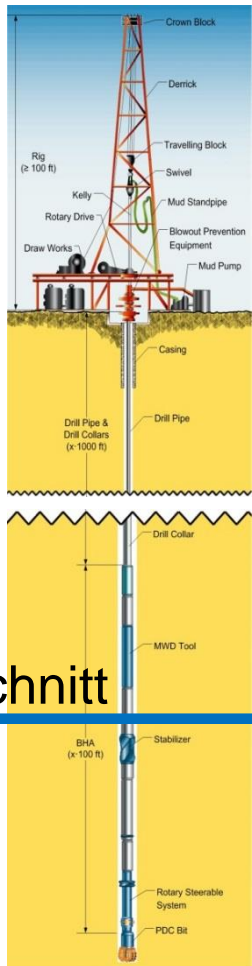
abhängig von
Meißel-/Gesteinstyp



➔ **HIL-Simulation**

HIL-Simulation – Ausgangsidee / Konzept

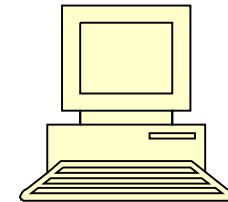
[OST, Celle Drilling 2013]



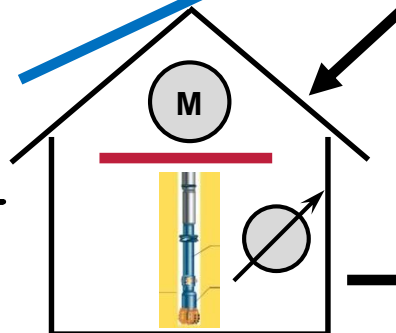
Schnitt

Interface

Computer



Teststand



Zeit t

Komplexe Geometrie durch Kräfte in Interface

$\vec{u}, \vec{\varphi}$

Realisierung Geometrie in Interface des Teststands

Messen der Kräfte in Interface des Teststands

Software
Hardware

$t := t + \Delta t$

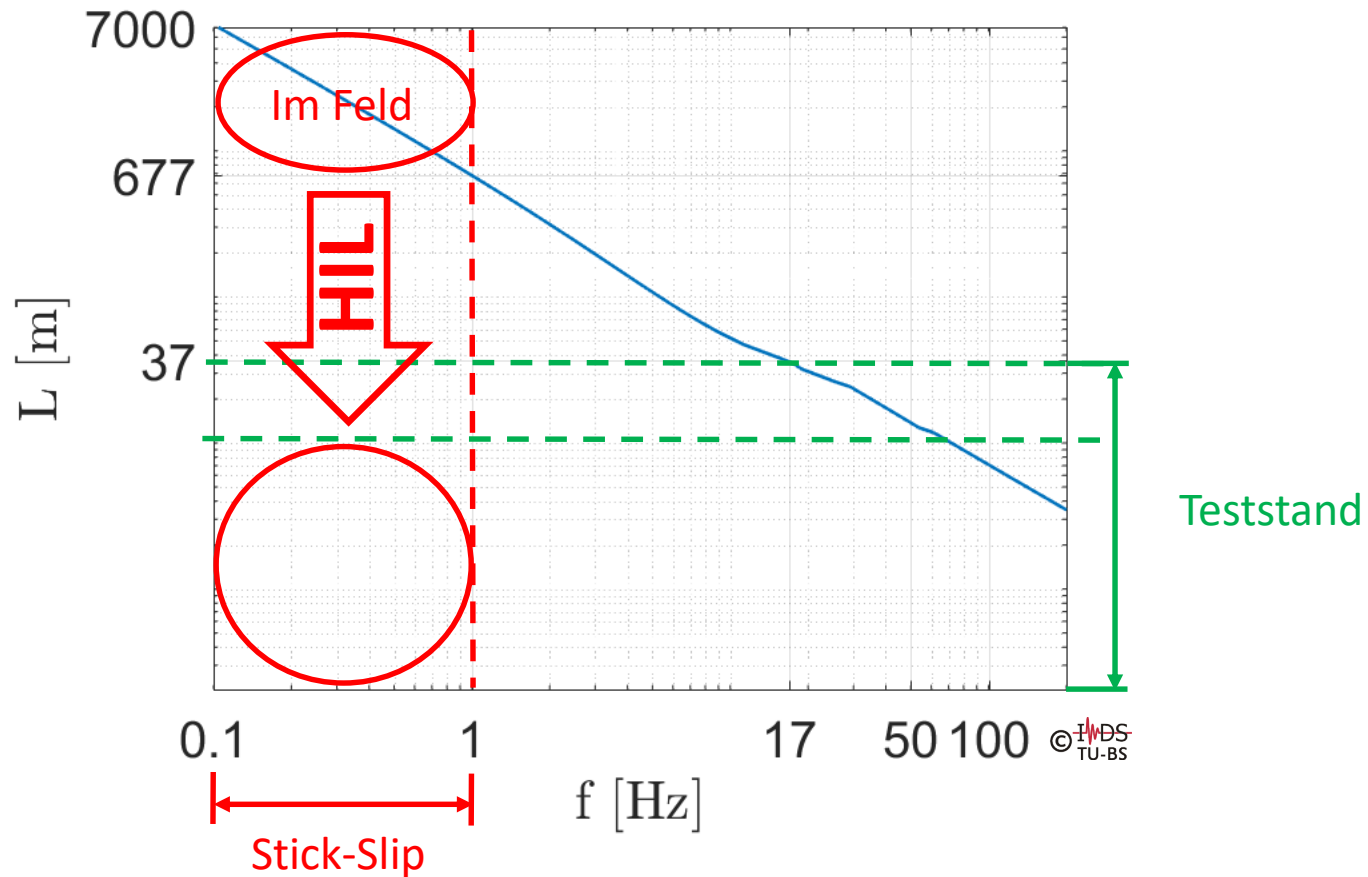
\vec{F}, \vec{M}

© I+DS TU-BS

Tiefbohrsystem

Stick-Slip in HIL-Simulationen – Umsetzung im Teststand

Bohrstranglänge über 1. Torsionseigenfrequenz



Stick-Slip in HIL-Simulationen

HIL-Simulation



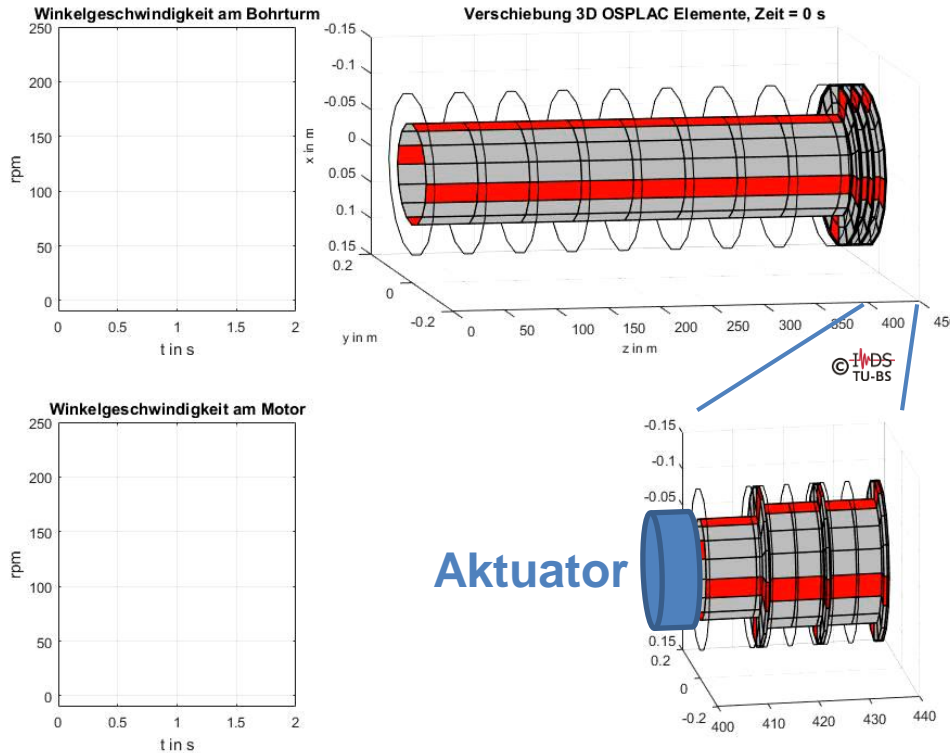
Δt_1 : Sensoren messen den Zustand $\underline{z}_{\Delta t_1}$



Δt_2 : Modelle bestimmen den nächsten Zustand $\underline{z}_{\Delta t_2}$



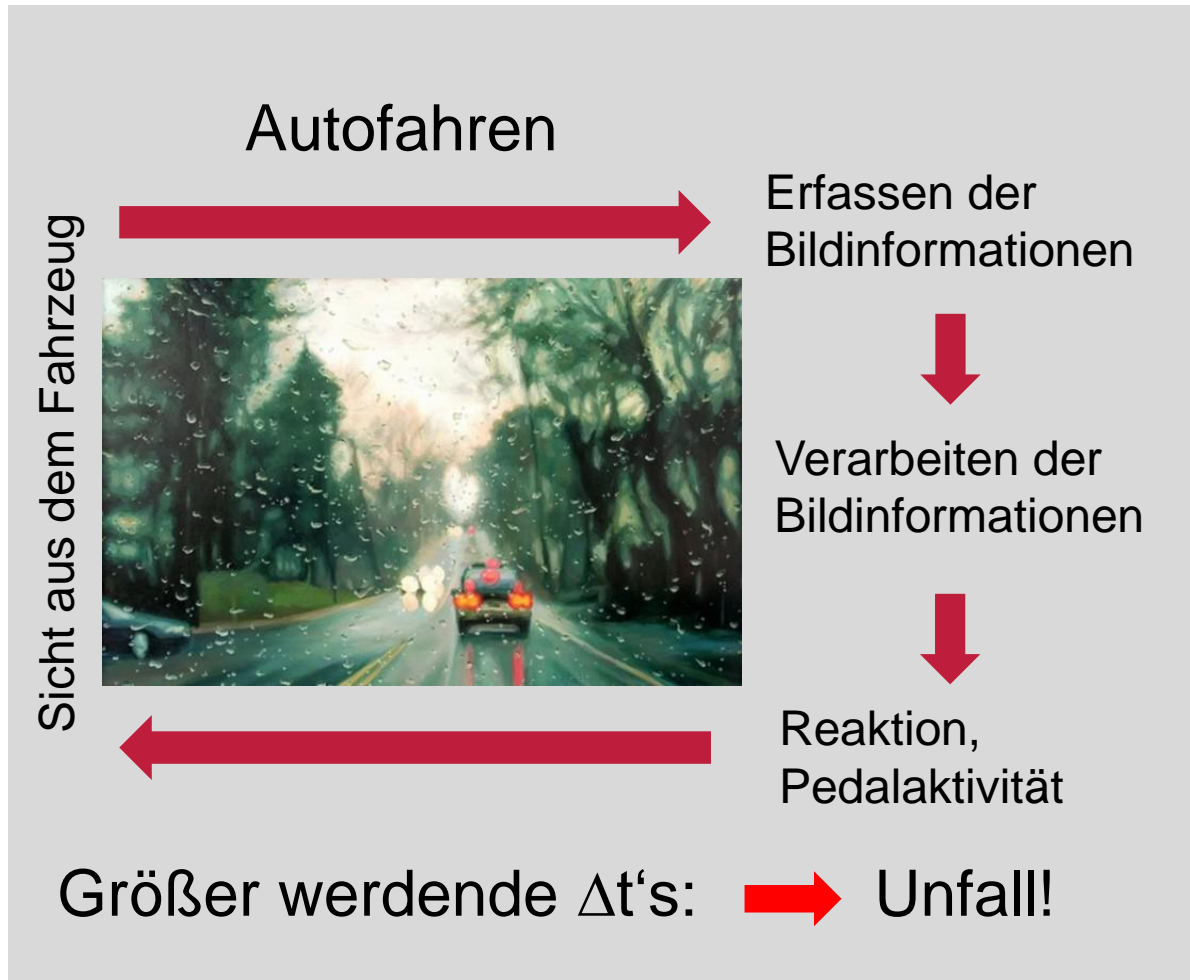
Δt_3 : Aktuatoren realisieren den nächsten Zustand $\underline{z}_{\Delta t_3}$



HIL hier am Beispiel des Torsionsfreiheitsgrades gezeigt, gilt auch für alle weiteren Freiheitsgrade!



Beispiel HIL-Simulation

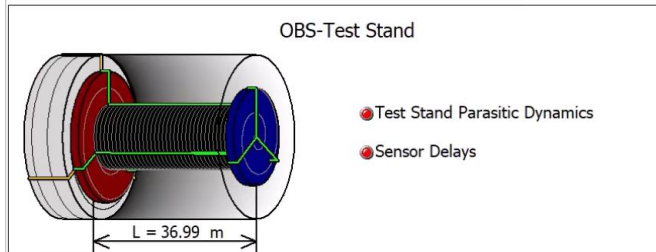
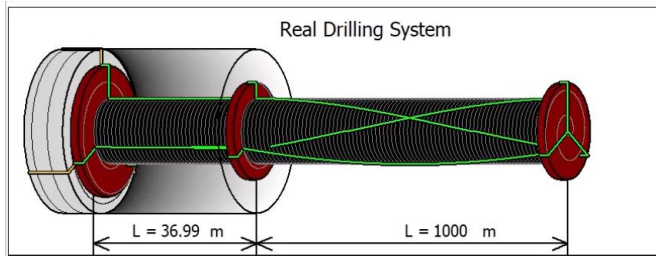


Δt_1 : Sensoren messen den Zustand $\underline{z}_{\Delta t_1}$

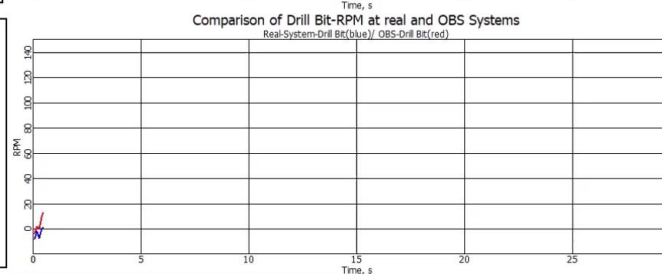
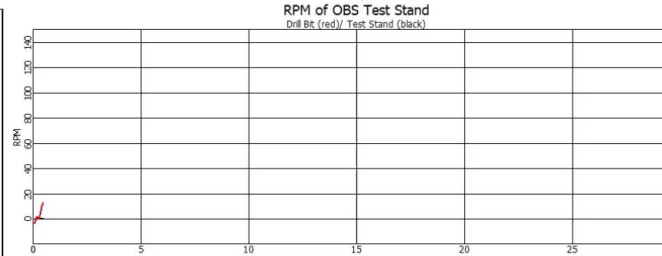
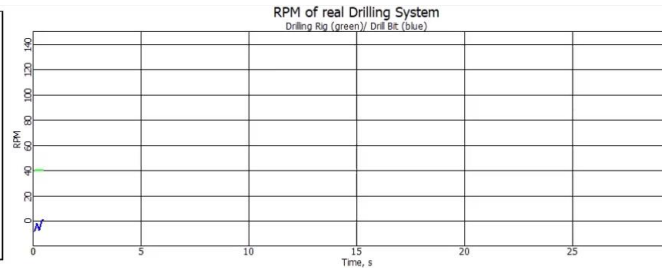
Δt_2 : Modelle bestimmen den nächsten Zustand $\underline{z}_{\Delta t_2}$

Δt_3 : Aktuatoren realisieren den nächsten Zustand $\underline{z}_{\Delta t_3}$

HIL-Simulation Stick-Slip im Bohrstrang



| | | | |
|------------------------|---|---------|----------------------|
| BHA + Drill Bit | | | |
| Length | = | 36.99 | [m] |
| Moment of inertia | = | 16.0245 | [kg*m ²] |
| Motor | | | |
| Moment of inertia | = | 20 | [kg*m ²] |
| Drill Bit | | | |
| Length | = | 1000 | [m] |
| Stiffness | = | 1424.68 | [Nm] |



PA
Numerische Integration

Ausführen

Int/berü Info Rst

Auswerten

Clear BMP-File Zoom Print

Test Stand ON Sensor Delays ON

RPM TOB
TOB = f(RPM) Data ON

Run Int Exit

Reales System (RS)

RPM_RIG_{RS}
RPM_BIT_{RS}

Teststand (TS)

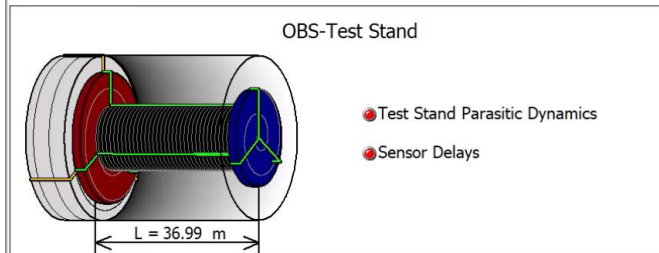
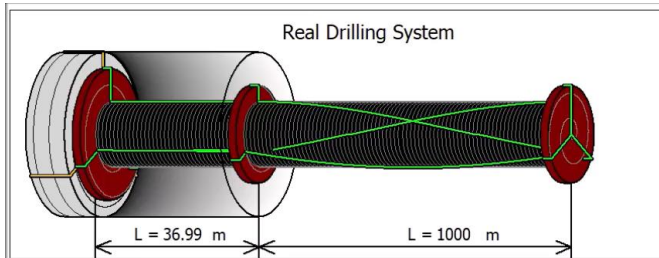
RPM_ROCK_{TS}
RPM_BIT_{TS}

Vergleich

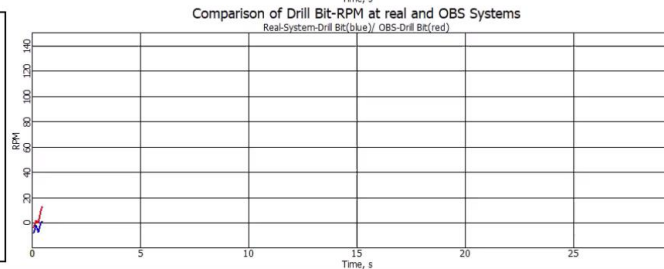
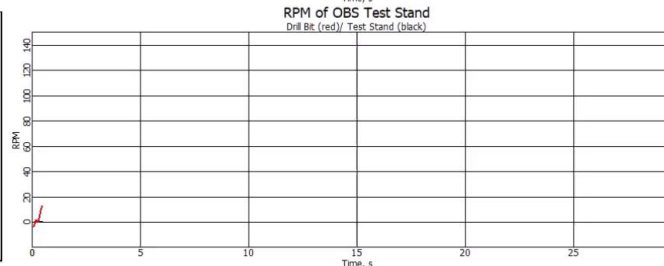
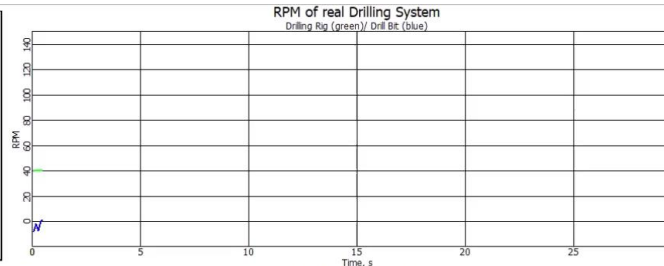
RPM_BIT_{RS}
RPM_BIT_{TS}

Problem: Nicht kompensierte Totzeiten!

HIL-Simulation Stick-Slip im Bohrstrang



| BHA + Drill Bit | | | |
|-------------------|---|---------|----------------------|
| Length | = | 36.99 | [m] |
| Moment of inertia | = | 16.0245 | [kg*m ²] |
| Motor | | | |
| Moment of inertia | = | 20 | [kg*m ²] |
| Drill Bit | | | |
| Length | = | 1000 | [m] |
| Stiffness | = | 1424.68 | [Nm] |



PA

Numerische Integration

Ausführen

Int/Menu Halt

Info Reset

Auswerten

Clear BMP-File

Zoom Print

Test Stand ON Sensor Delays ON

RPM TOB

TOB = (RPM) Data ON

Run Int Exit

Reales System (RS)

RPM_RIG_{RS}

RPM_BIT_{RS}

Teststand (TS)

RPM_ROCK_{TS}

RPM_BIT_{TS}

Vergleich

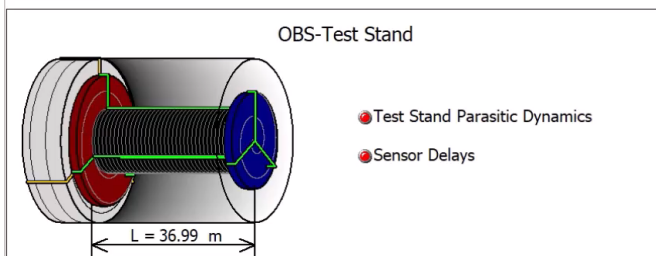
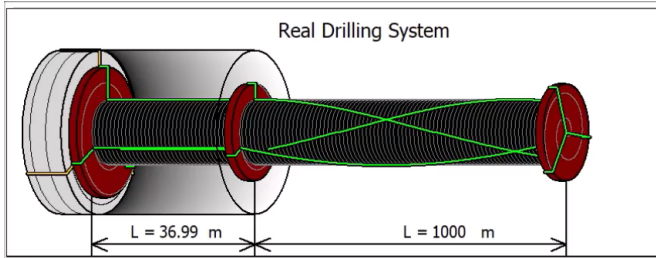
RPM_BIT_{RS}

RPM_BIT_{TS}

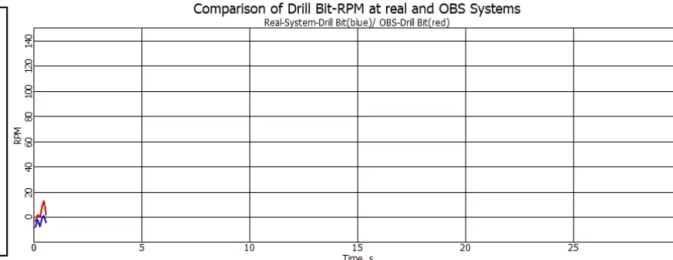
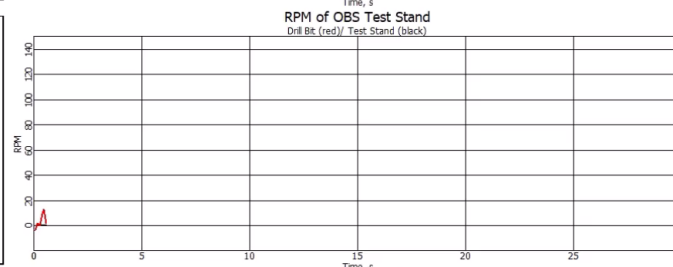
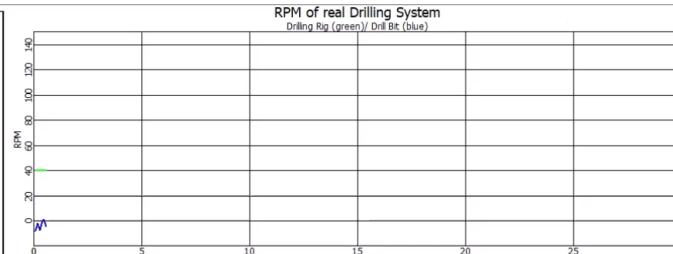
Totzeiten im System müssen durch prädiktive HIL Regelalgorithmen (e.g. Kalmanfilter) kompensiert werden!

HIL-Simulation Stick-Slip im Bohrstrang

Gesteinskammer



| | | | |
|------------------------|---|---------|----------------------|
| BHA + Drill Bit | | | |
| Length | = | 36.99 | [m] |
| Moment of inertia | = | 16.0245 | [kg*m ²] |
| Motor | | | |
| Moment of inertia | = | 20 | [kg*m ²] |
| Drill Bit | | | |
| Length | = | 1000 | [m] |
| Stiffness | = | 1424.68 | [Nm] |



Reales System (RS)

RPM_RIG_{RS}
RPM_BIT_{RS}

Teststand (TS)

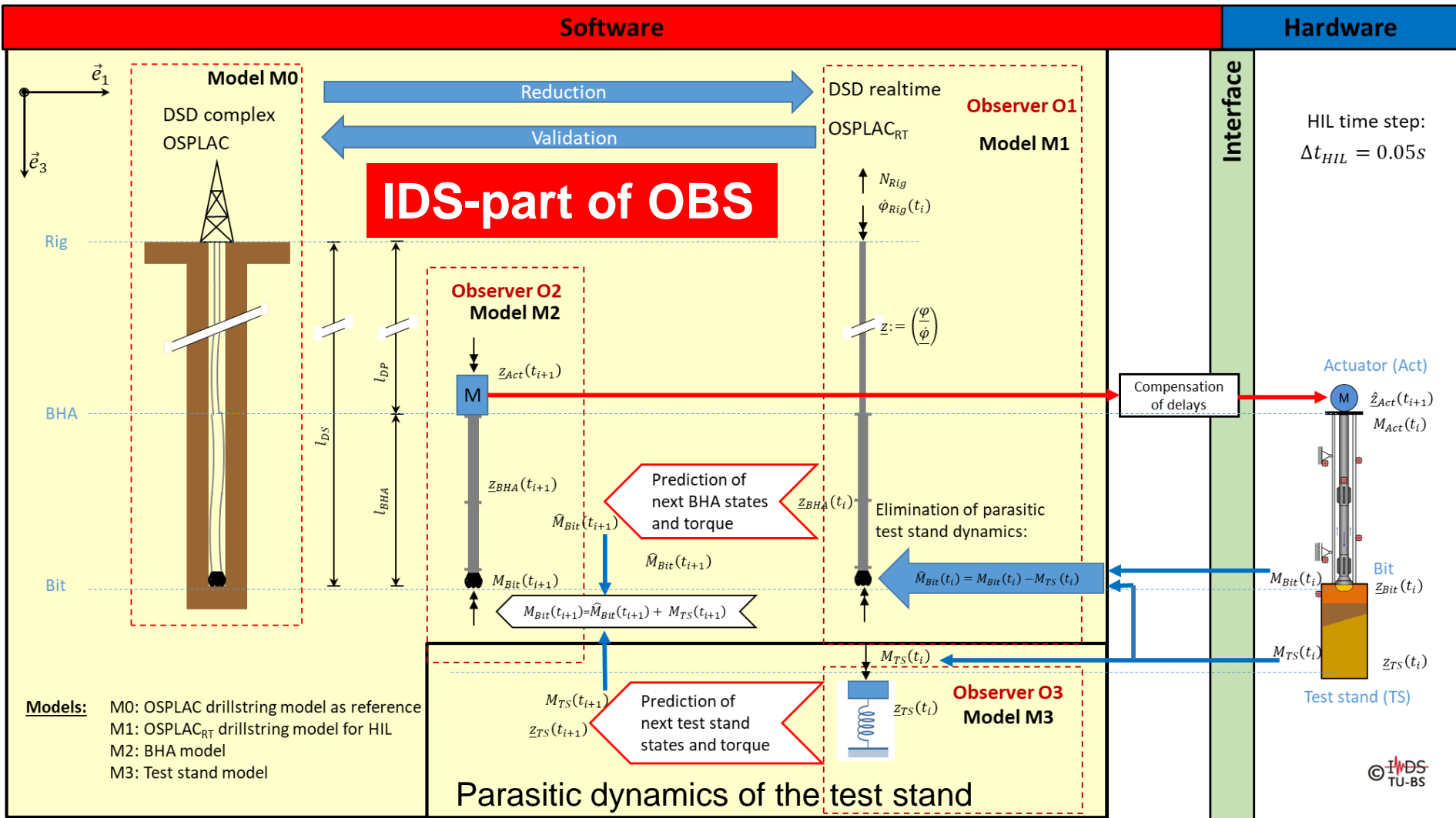
RPM_ROCK_{TS}
RPM_BIT_{TS}

Vergleich

RPM_BIT_{RS}
RPM_BIT_{TS}

Problem: Parasitäre Teststandsdynamik!

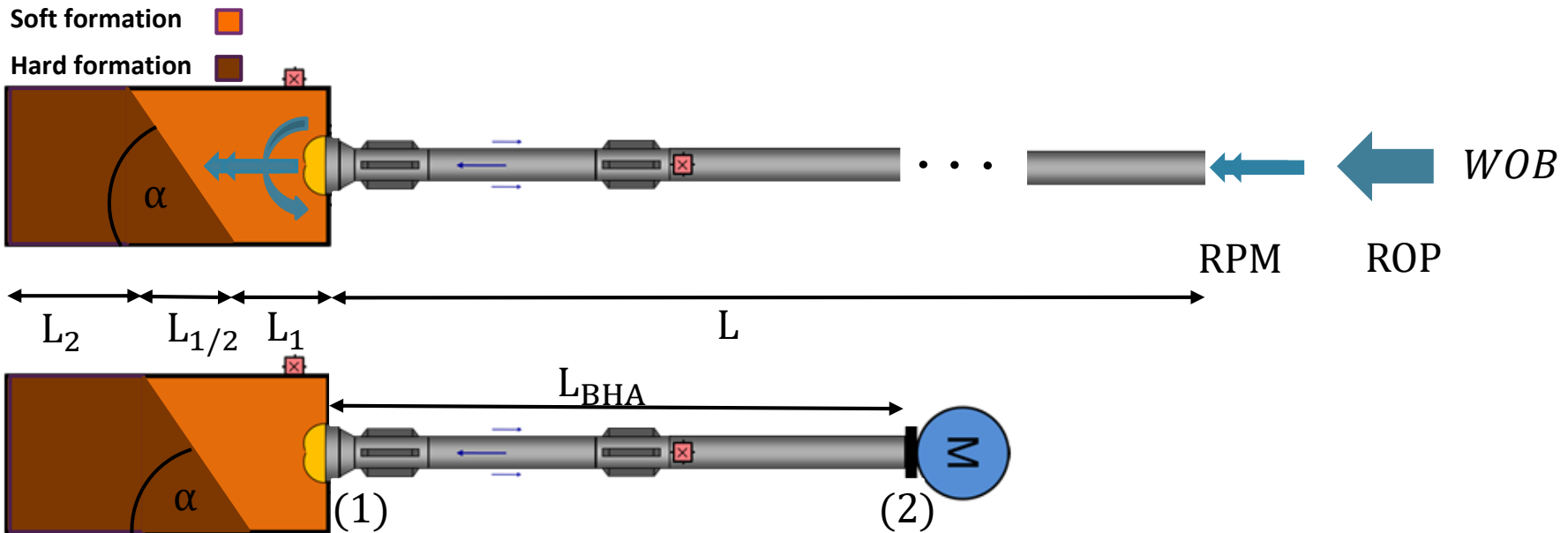
HIL-Simulation: Modelle, Datenaustausch, Kommunikation, Regelung



Agenda

- Motivation und Einleitung
- Stick-Slip in HIL-Simulationen
- Einfluss von Gesteinsinhomogenitäten/Störungszonen
- Zusammenfassung und Ausblick

Testszzenarien

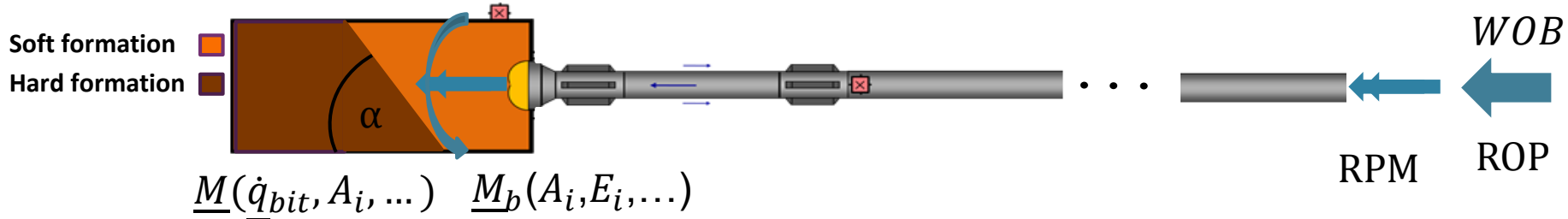


➔ Beobachtung der Dynamik am Meißel (1) und Aktuator (2)

Parameters:

- L : Länge des Bohrstranges (1000 to 4000m)
- L_1 : Länge Formation 1 (<2m)
- $L_{1/2}$: Länge der Übergangsphase ($\sim \alpha, D_{bit}$)
- L_2 : Länge Formation 2 (<2m)
- α : Inklination am Übergang (45, 89°)
- RPM: Drehzahl (30 bis 90rpm)
- ROP: Konstanter Bohrvorschub (10 bis 40m/h)
- WOB: Andruckkraft am Meißel

Modellbildung

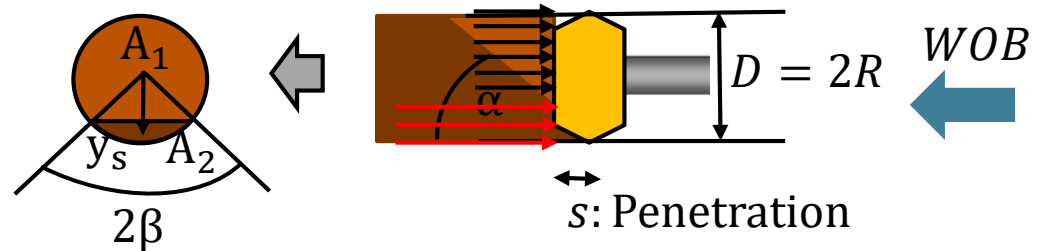


OSPLAC-Bewegungsgleichungen: $\underline{M} \underline{\ddot{q}} = \underline{F}(t, \underline{q}, \underline{\dot{q}}) + \underline{M}(\underline{\dot{q}}_{bit}, A_i, \dots) + \underline{M}_b(A_i, E_i, \dots)$

Torsionsmoment am Meißel: $\underline{M}(\underline{\dot{q}}_{bit}, A_i, \dots)$



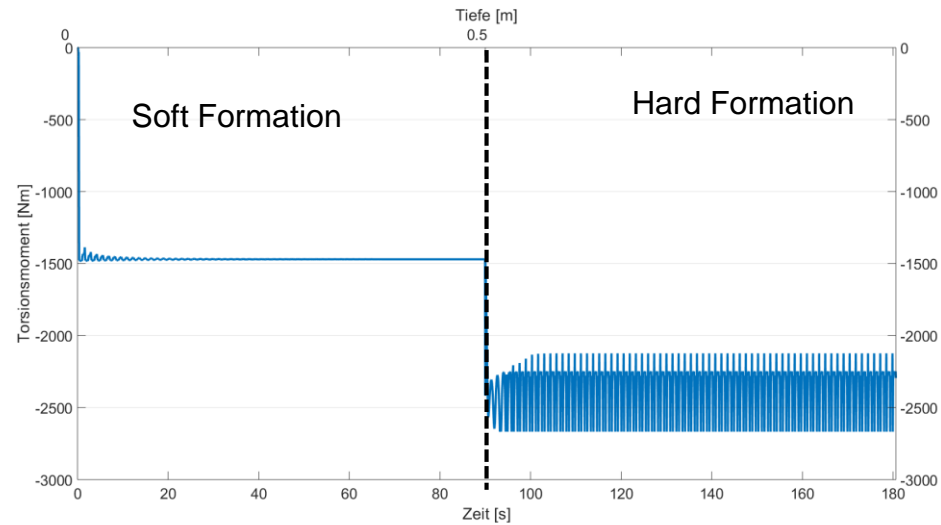
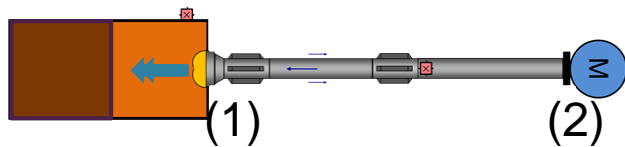
Biegemoment am Meißel: $\underline{M}_b(A_i, E_i, \dots)$



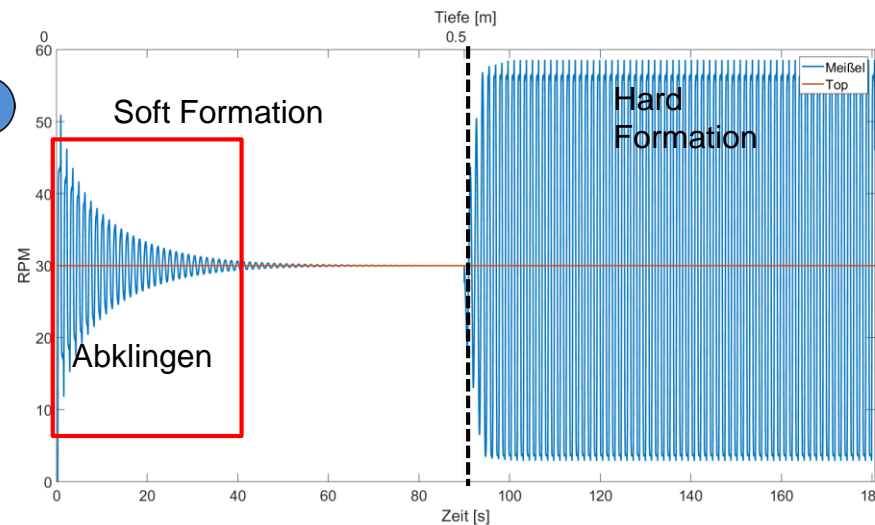
Simulationsergebnisse - Torsionsdynamik

Parameters:

- $L_1 = L_2 = 0.5\text{m}$
- $\alpha = 89^\circ$
- $L_{1/2} \cong 0.00\text{m}$
- RPM = 30rpm
- ROP = 20m/h
- WOB = 20kN



Torsionsmoment bei (2)

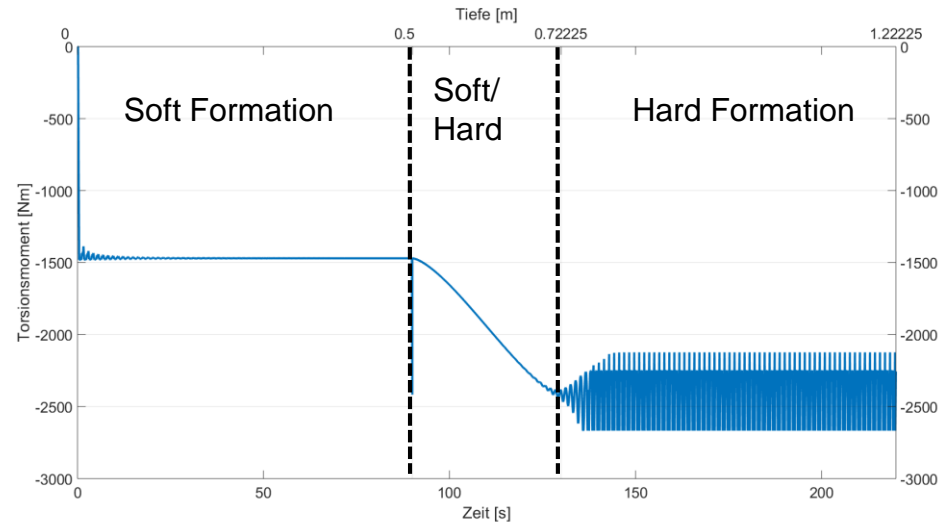
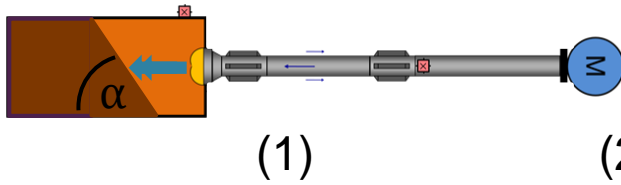


RPM bei (2)

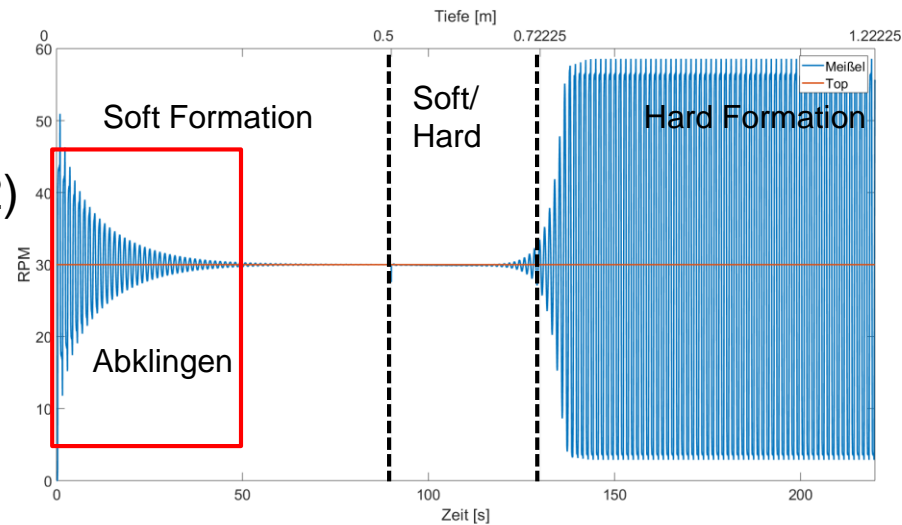
Simulationsergebnisse - Torsionsdynamik

Parameters:

- $L_1 = L_2 = 0.5\text{m}$
- $\alpha = 45^\circ$
- $L_{1/2} = 0.22\text{m}$
- RPM = 30rpm
- ROP = 20m/h
- WOB = 20kN



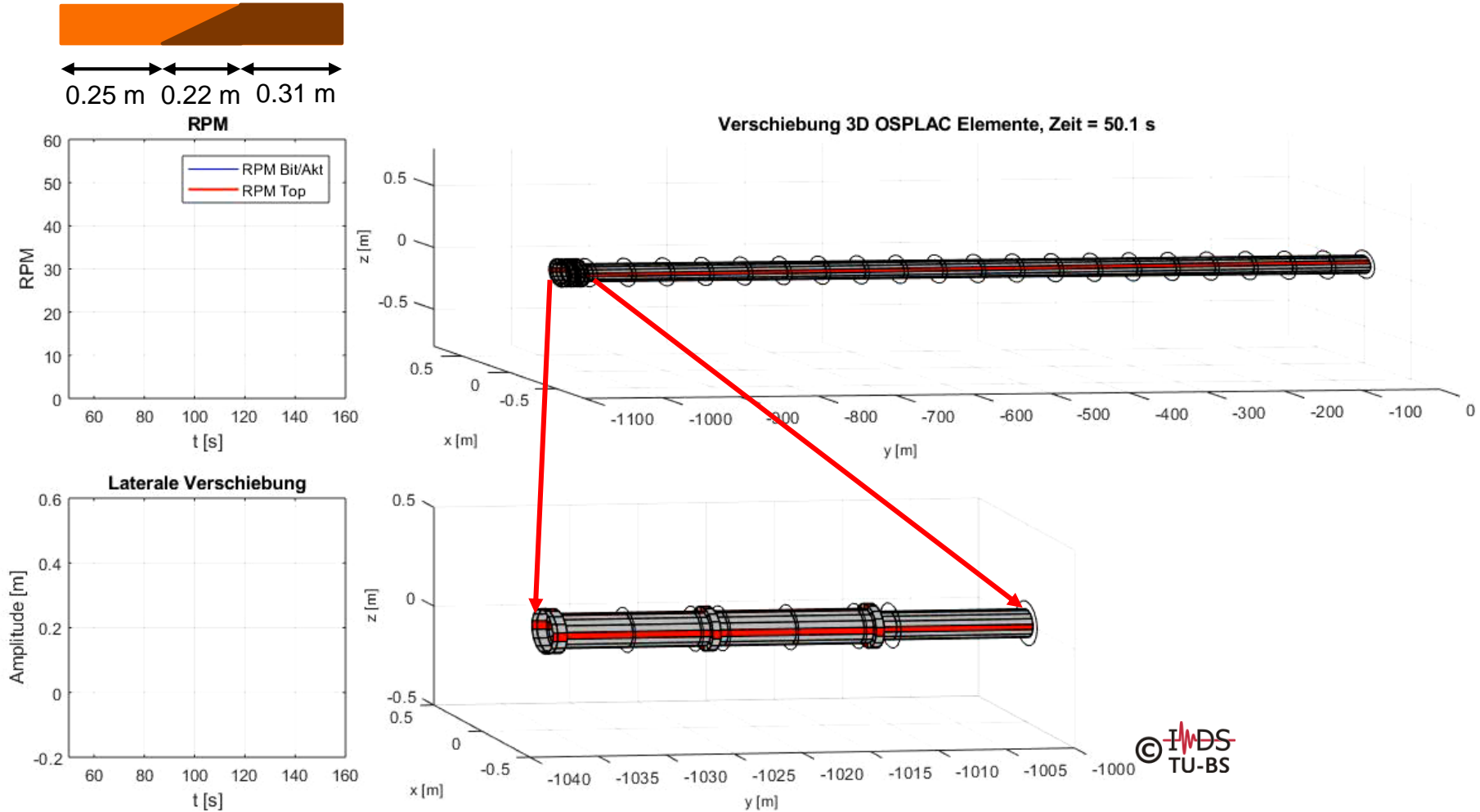
Torsionsmoment bei (2)



RPM bei (2)

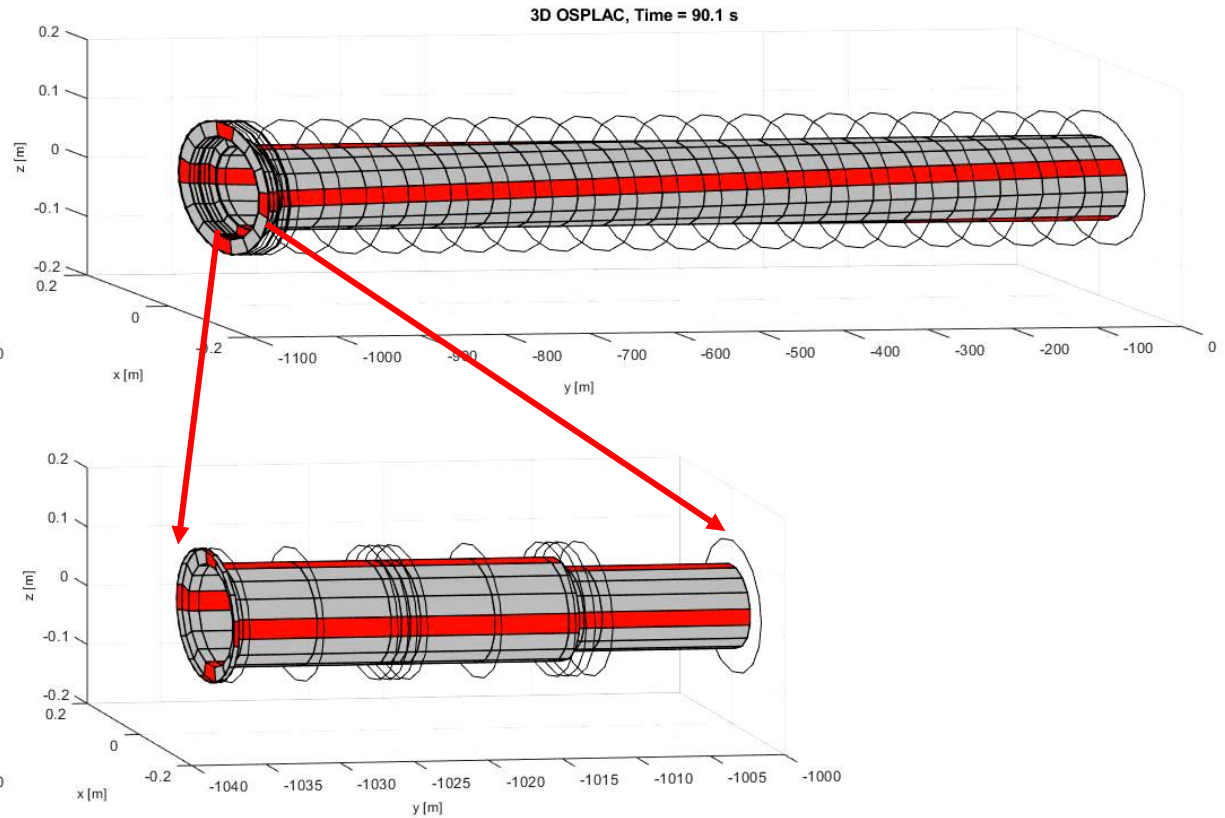
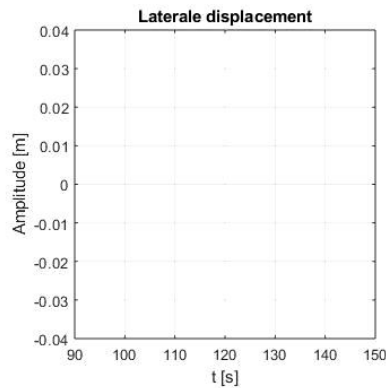
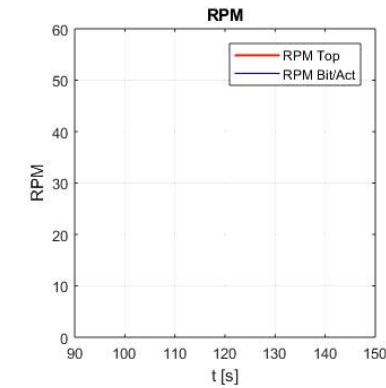
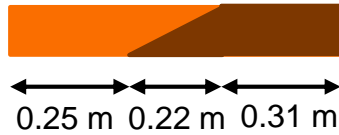
Simulationsergebnisse - Lateraldynamik

OSPLAC-Simulation: vertikale Bohrung „ohne Wandkontakte“ (nur zur Visualisierung!)



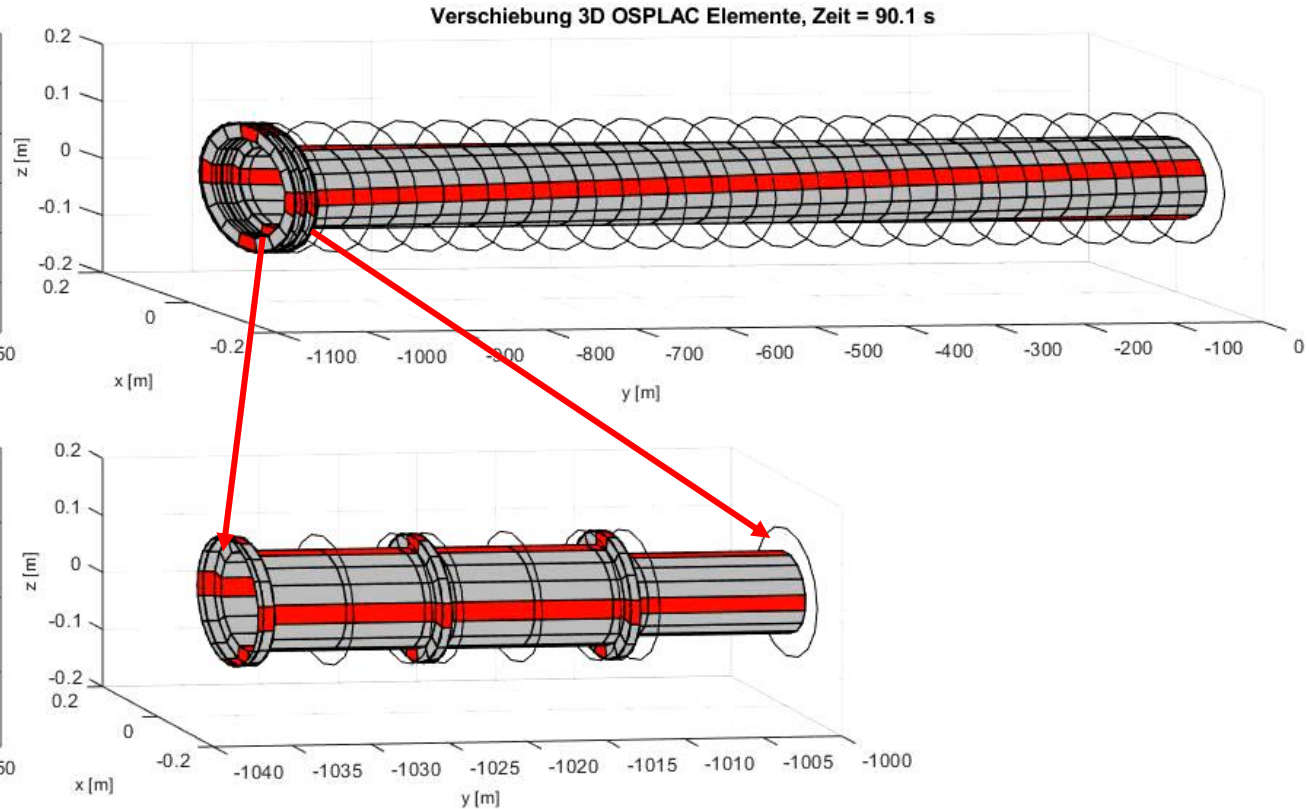
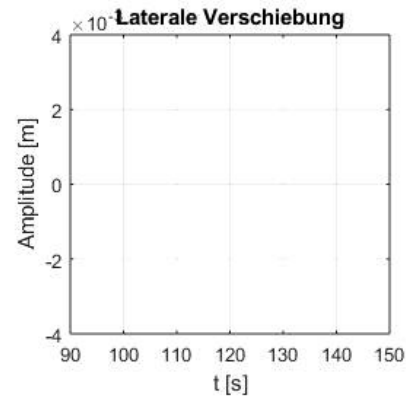
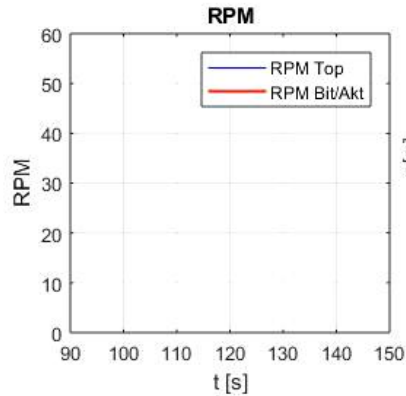
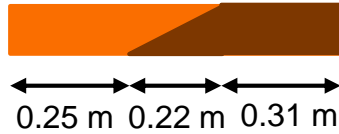
Simulationsergebnisse - Lateraldynamik

OSPLAC-Simulation: vertikale Bohrung „mit Wandkontakten, ohne Stabilisatoren“



Simulationsergebnisse - Lateraldynamik

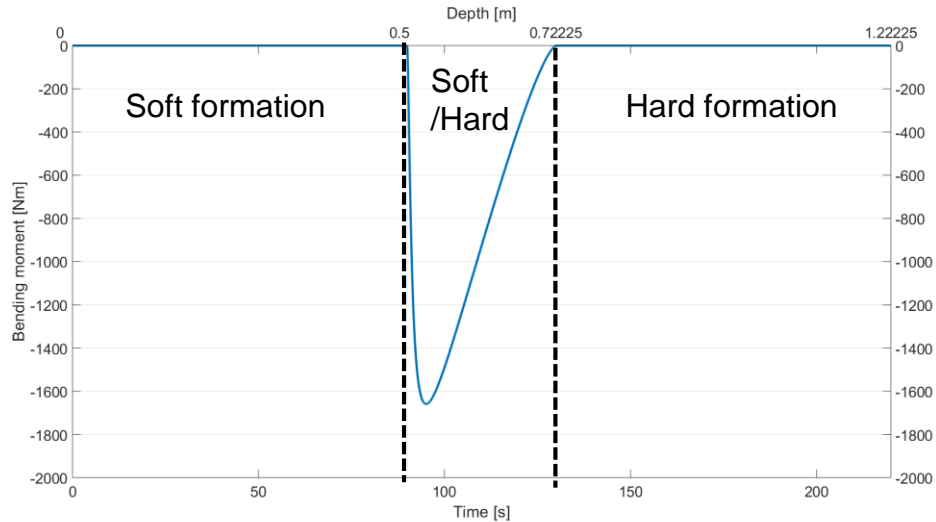
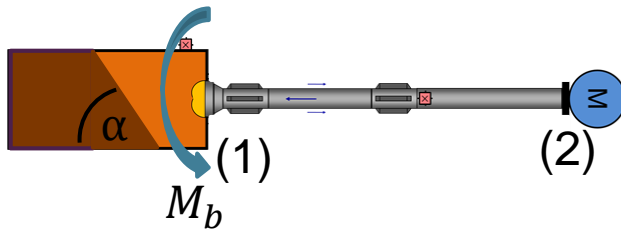
OSPLAC-Simulation: vertikale Bohrung „mit Wandkontakten“



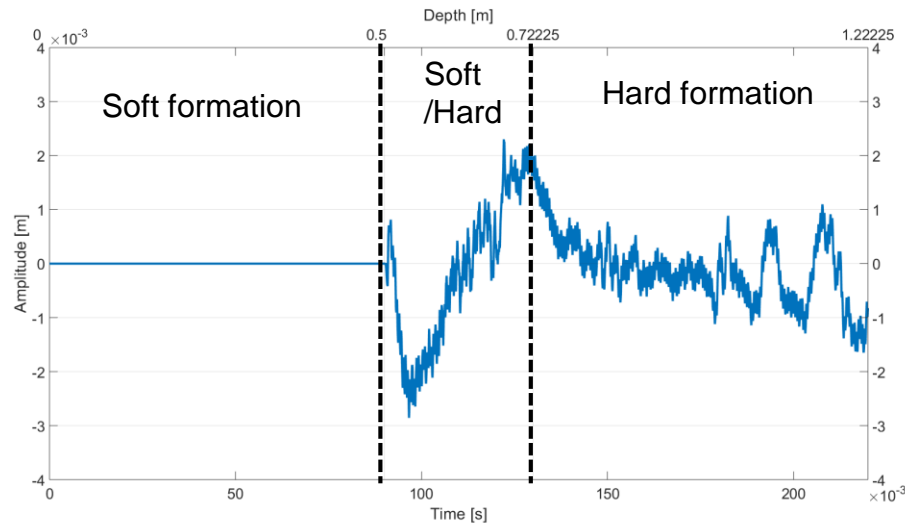
Simulationsergebnisse - Lateraldynamik

Parameters:

- $L_1 = L_2 = 0.5 \text{ m}$
- $\alpha = 45^\circ$
- $L_{1/2} = 0.22 \text{ m}$
- RPM = 30 rpm
- ROP = 20 m/h
- WOB = 20 kN



Biege-
moment
bei (1)



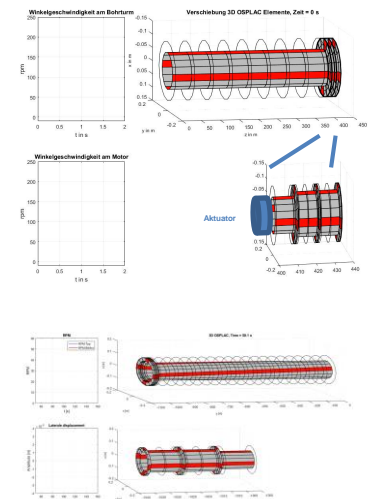
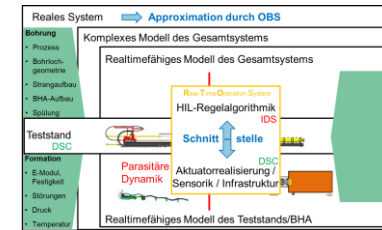
Amplitude
bei (2)

Agenda

- Motivation und Einleitung
- Stick-Slip in HIL-Simulationen
- Einfluss von Gesteinsinhomogenitäten/Störungszonen
- Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Kurze Einführung des Forschungsverbundprojektes OBS
- Darstellung der Modellbildungsstrategie zur Umsetzung von HIL-Simulationen in der Bohrtechnik
- HIL-Simulationen am Beispiel von Stick-Slip Schwingungen von Bohrsträngen
- Notwendigkeit der Berücksichtigung auch weiterer Freiheitsgrade, Simulationsbeispiel „Bohren durch Gesteinsinhomogenitäten“



➔ **Optimierung von tiefen Geothermiebohrungen durch geeignete HIL-Simulationen, deren Analysen und Erkenntnisgewinne**

Ausblick

- Problemspezifische / geothermiespezifische Modellerweiterungen
- Komplexe Simulationen instationären geothermiespezifischer Formationseinflüsse, Parameterstudien und Sensitivitätsstudien
- Weiterentwicklung der HIL-Simulationen, Ersetzen des virtuellen Teststandes durch realen Teststand
- Weiterentwicklung der HIL-Regelalgorithmik
- Skalierung der Software auf beliebige Teststände

HIL-Simulation am OStrator



Aufbau

- Bohrloch: Plexiglasrohr, gerade – gekrümmt – geneigt (0° - 90°)
- Bohrstrang: ummantelte Stahlfeder sowie Stabilisatoren
- Meißel: diverse Reibpaarungen

Aktuatorik und Sensorik

- Hochdynamischer elektrischer Torsionsantrieb
Messung von Drehzahl und Drehmoment
- WOB-Einheit: regelbare Andruckkraft am Meißel und Integration Drehmomentsensor
- Weiterentwicklung Positionssensor: jeder dynamische Zustand automatisiert erfassbar

Ansteuerung und Elektronik

- Ansteuerung und Regelung über NI cRIO
- Leistungselektronik / Messelektronik, Stromversorgung über Netzkabel

Simulation und dynamische Effekte

- Eigenmoden, Buckling, Snaking
- Stick-Slip, Whirl (Forward, Backward, Chaotic)
- Stabilitätskarten
- Durchführung HIL-Simulationen, Tests von Modellen, Kommunikation, Regelstrategien,....

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektträger: PTJ – Projektträger Jülich

Projektpartner: TU Clausthal, DSC – Drilling Simulator Celle