



INSIDE

Stadtwerke München GmbH
Innovative Energie Pullach
Karlsruher Institut für Technologie



Karlsruhe Institute of Technology

Verbundvorhaben: Induzierte Seismizität &
Bodendeformation als Interferenzaspekte beim Betrieb
von Geothermieranlagen in der süddeutschen Molasse –
Untersuchungen zu einem verbesserten
Prozessverständnis im tiefen Untergrund und
Maßnahmen zur Risikominimierung

STATISCHES GEOMECHANISCHES MODELL: SCHÄFTLARNSTRASSE, PULLACH, BAIERBRUNN

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Grant agreement number

Karlsruher Institut für Technologie:	03EE4008A
SWM Services GmbH:	03EE4008B
Innovative Energie für Pullach GmbH:	03EE4008C

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Titel:	Statisches Geomechanisches Modell: Schäftlarnstraße, Pullach, Baierbrunn
Arbeitspaket:	AP4: Reservoirmodellierung
Meilenstein:	M4.3.1 Teil 1
Fälligkeitsdatum:	05.2020
Tatsächliches Datum:	06.09.2022
Partner:	Zuständig: KIT beteiligte Partner: IEP, SWM
Ansprechpartner:	Emmanuel Gaucher Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Geowissenschaften Abteilung Geothermie Adenauerring 20b, Geb. 50.40 76131 Karlsruhe, Germany Email: emmanuel.gaucher@kit.edu Phone: +49 721 608 45223
Autoren:	KIT : E. Gaucher, R. Egert
Version:	1.0

Version	Datum	Beschreibung der Ergänzungen, Änderungen, Überprüfungen
1.0	06.09.2022	Erste Version

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	7
2	NORMIERTE „SLIP-TENDENCY“ UND „DILATION-TENDENCY“	8
	2.1 Normierte „Slip-Tendency“	8
	2.2 „Dilation-Tendency“	8
3	EINGABEN UND BERECHNUNG.....	9
	3.1 Spannungsfeld	9
	3.1.1 KIT Annahmen	9
	3.1.2 Erdwerk Annahmen	9
	3.1.3 Diskussion	10
	3.2 Strukturgeologisches Modell	11
	3.3 Versagenskriterium.....	11
	3.3.1 Erdwerk Annahmen	11
	3.3.2 KIT Annahmen	11
	3.4 Berechnung.....	12
4	ERGEBNISSE	12
	4.1 Schäftlarnstraße	13
	4.1.1 Normierte „Slip-Tendency“	13
	4.1.2 „Dilation-Tendency“: Ergebnisse des KIT-Ansatzes	21
	4.2 Pullach	24
	4.2.1 Normierte „Slip-Tendency“	24
	4.2.2 „Dilation-Tendency“: Ergebnisse des KIT-Ansatzes	25
	4.3 Baierbrunn	27
	4.3.1 Normierte „Slip-Tendency“	27
	4.3.2 „Dilation-Tendency“: Ergebnisse des KIT-Ansatzes	35
5	DISKUSSION UND ZUSAMMENFASSUNG	38
6	LITERATURVERZEICHNIS.....	39

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Lageplan der drei in diesem Bericht betrachteten geothermischen Standorte und der im Untergrund identifizierten Störungen. Die Störungen sind entsprechend der Höhe eingefärbt und die Bohrungen sind als schwarze Linien dargestellt.	7
Abbildung 2: Vertikales Profilbeispiel des Spannungsfeldes in der Nähe der Bohrlochköpfe der Geothermieranlage Schäftlarnstrasse (Osten: 690369 m UTM32, Norden: 5332710 m UTM32). Shmax, Shmin, Sv und Porendruck nach Ziegler und Heidbach (2020) sind als volle Linien (plus/minus eine Standardabweichung als gepunktete Linien) sowie die von Erdwerk aufgenommenen Profile als gestrichelte Linien dargestellt. Der Top-Purbeck und der Top-Kristallin sind durch graue bzw. braune gepunktete Linien hervorgehoben.	10
Abbildung 3: Schäftlarnstraße. 3D-Ansicht der mit dem KIT-Ansatz ermittelten normierte "Slip-Tendency" der Störungen um die Bohrungen. Konfidenzniveau von 50 %. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.	14
Abbildung 4: Wie Abbildung 3, jedoch aus einem anderen Blickwinkel.	14
Abbildung 5: Schäftlarnstraße. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Produktionsbohrungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).	15
Abbildung 6: Schäftlarnstraße. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Injektionsbohrungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).	16
Abbildung 7: Schäftlarnstraße. Verteilung der normierten „Slip-Tendency“ auf den gesamten Störungsflächen, die die offenen Bohrsektionen umgeben: a) Th1 Produktionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 250 m; b) Th2a und Th2aM Produktionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 1000 m; c) Th3 Injektionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 750 m; d) Th4 Produktionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 250 m; e) Th5 Injektionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 750 m und f) Th6 Injektionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 1000 m. Jede Farbe steht für ein Konfidenzniveau: 10% - blau, 50% - orange und 90% - gelb.	17
Abbildung 8: Schäftlarnstraße. Normierte „Slip-Tendency“ von Erdwerk (farbige Konturen) und von KIT auf 50% Konfidenzniveau (transparente Flächen).	18
Abbildung 9: Schäftlarnstraße. Boxplots der normierten „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 1000 m um die offenen Bohrsektionen der Produktionsbohrungen (Zeilen) nach dem KIT-Ansatz (linke Spalte) und nach dem Erdwerk-Ansatz (rechte Spalte). Für KIT sind die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) dargestellt.	19
Abbildung 10: Schäftlarnstraße. Boxplots der normierten „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 1000 m um die offenen Bohrsektionen der Injektionsbohrungen (Zeilen) nach dem KIT-Ansatz (linke Spalte) und nach dem Erdwerk-Ansatz (rechte Spalte). Für KIT sind die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) dargestellt.	20

Abbildung 11: Schäftlarnstraße. Mit KIT-Ansatz ermittelte „Dilation-Tendency“ auf 50% confidence level Konfidenzniveau (transparente Flächen). Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.	21
Abbildung 12: Schäftlarnstraße. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Produktionsbohrungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).	22
Abbildung 13: Schäftlarnstraße. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Injektionsbohrungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).	23
Abbildung 14: Pullach. 3D-Ansicht der mit dem KIT-Ansatz (links, Konfidenzniveau von 50%) oder mit dem Erdwerk-Ansatz (rechts) ermittelten normierte "Slip-Tendency" der Störung um Th2 und Th3 Bohrungen. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.	24
Abbildung 15: Pullach. Boxplots der normierten „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 750 m und 1000 m (Spalten) vom offenen Bohrsektionen der Bohrungen (Zeilen); links: nach dem KIT-Ansatz, für 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) Konfidenzniveaus; rechts: nach dem Erdwerk-Ansatz.	25
Abbildung 16: Pullach. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 750 m und 1000 m (Spalten) vor offenen Bohrsektionen der Bohrungen (Zeilen) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb). Die ersten drei Zeilen entsprechen den Produktionsbohrungen, die letzten drei Zeilen den Injektionsbohrungen.	26
Abbildung 17: Baierbrunn. 3D-Ansicht der mit dem KIT-Ansatz ermittelten normierte "Slip-Tendency" der Störungen um die Bohrungen. Konfidenzniveau von 50 %. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.	28
Abbildung 18: Wie Abbildung 17, jedoch aus einem anderen Blickwinkel.	28
Abbildung 19: Baierbrunn. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Th1, Th2 und Th3 Borungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).	29
Abbildung 20: Baierbrunn. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Th4, Th5 und Th6 Borungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).	30
Abbildung 21: Baierbrunn. Verteilung der normierten „Slip-Tendency“ auf den gesamten Störungsflächen, die die offenen Bohrsektionen umgeben: a) Th1, Störungsfläche im Radius von 250 m; b) Th2, Störungsfläche im Radius von 250 m; c) Th3, Störungsfläche im Radius von 500 m; d) Th4, Störungsfläche im Radius von 750 m; e) Th5, Störungsfläche im Radius von 750 m und f) Th6, Störungsfläche im Radius von 250 m. Jede Farbe steht für ein Konfidenzniveau: 10% - blau, 50% - orange und 90% - gelb.	31

Abbildung 22: Baierbrunn. Normierte „Slip-Tendency“ der mit KIT-Ansatz (links, Konfidenzniveau 50%) und mit Erdwerk-Ansatz (rechts) erhaltenen Störungen. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.32

Abbildung 23: Baierbrunn. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 1000 m vor offenen Bohrsektionen der Bohrungen (Zeilen) nach dem KIT-Ansatz (linke Spalte) und nach dem Erdwerk-Ansatz (rechte Spalte). Für KIT sind die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) dargestellt.33

Abbildung 24: Baierbrunn. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 1000 m vor offenen Bohrsektionen der Bohrungen (Zeilen) nach dem KIT-Ansatz (linke Spalte) und nach dem Erdwerk-Ansatz (rechte Spalte). Für KIT sind die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) dargestellt.34

Abbildung 25: Baierbrunn. Mit KIT-Ansatz ermittelte „Dilation-Tendency“ auf 50% confidence level Konfidenzniveau (transparente Flächen). Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.35

Abbildung 26: Baierbrunn. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Th1, Th2 und Th3 Borungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).36

Abbildung 27: Baierbrunn. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Th4, Th5 und Th6 Borungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).37

1 EINLEITUNG

Dieser Bericht ist Teil des „Arbeitspakets 4: Reservoirmodellierung – Geomechanische Modellierung (AP4.2)“ des INSIDE-Projekts und gehört zum „Meilenstein 4.3.1“. Die Ergebnisse der statischen geomechanischen Modellierung werden für die Geothermiestandorte Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn, alle in München bzw. im Großraum München gelegen, dargestellt (Abbildung 1). In dieser Studie werden die normierte „Slip-Tendency“ und die „Dilation-Tendency“ der an diesen Standorten identifizierten Störungen im Bereich des Malm Reservoirs untersucht und anschließend diskutiert.

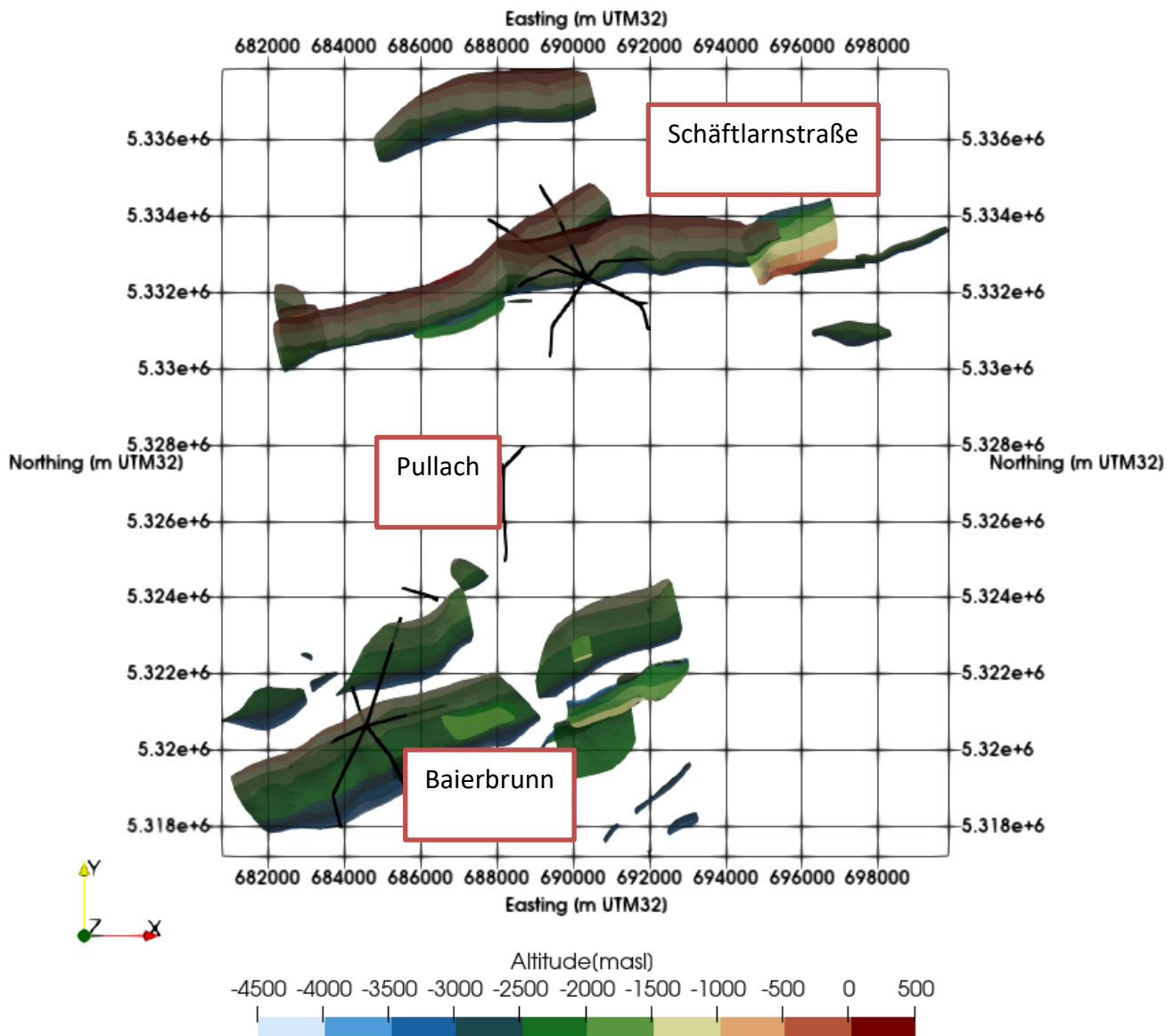


Abbildung 1: Lageplan der drei in diesem Bericht betrachteten geothermischen Standorte und der im Untergrund identifizierten Störungen. Die Störungen sind entsprechend der Höhe eingefärbt und die Bohrungen sind als schwarze Linien dargestellt.

Die normierte „Slip-Tendency“ ist ein wichtiger Indikator erster Ordnung, der angibt, wie nahe eine Verwerfungszone angesichts des angenommenen regionalen Spannungsfeldes an einer Verschiebung ist. Daraus können bevorzugte Störungsbereiche identifiziert werden, die im Falle einer Spannungsfeldveränderung Seismizität induzieren können. Die „Dilation-Tendency“ zeigt die

wahrscheinlich „offenen“ Störungszonen an, in denen das geothermische Fluid zirkulieren kann. Dennoch ist die statische geomechanische Modellierung aus zwei Hauptgründen begrenzt: Erstens unterscheidet sich das lokale Spannungsfeld in der Nähe von Störungen bekanntermaßen von dem genutzten regionalen Spannungsfeld. Zweitens berücksichtigt es nicht die thermisch-hydraulisch-mechanisch(-chemische) Prozesse, die aus dem Betrieb des geothermischen Reservoirs resultieren (d. h. unterirdische Zirkulation des Fluids). Letztere Prozesse werden in der numerischen Reservoirmodellierung berücksichtigt und bilden die weiteren Aufgaben des „AP4: Reservoirmodellierung“ (AP4.3, AP4.4 und AP4.5).

Unter Verwendung des gleichen strukturgeologischen Modells (d. h. gleiche Geometrien und gleiche Positionierung der Störungen) haben KIT und Erdwerk die normierte „Slip-Tendency“ und die „Dilation-Tendency“ unabhängig voneinander, nach unterschiedlichen Ansätzen, abgeschätzt. Erdwerk verfolgte einen Worst-Case-Szenario-Ansatz, das KIT dagegen einen probabilistischen Ansatz. Beide Ansätze werden vorgestellt und die Ergebnisse verglichen.

2 NORMIERTE „SLIP-TENDENCY“ UND „DILATION-TENDENCY“

2.1 NORMIERTE „SLIP-TENDENCY“

Die normierte „Slip-Tendency“ einer Störung (Element) entspricht der „Slip-Tendency“ nach Morris et al. (1996) dividiert durch den Reibungskoeffizient. Sie ist also gleich der Scherspannung (τ) minus der Kohäsion (C) dividiert durch die effektive Normalspannung (σ_n) und den Reibungskoeffizient (μ):

$$ST = \frac{\tau - C}{\sigma_n \cdot \mu} \quad (\text{Eq. 1})$$

ST sollte zwischen 0 und 1 liegen. Ein Wert von 1 bedeutet, dass die Störung kritisch gespannt ist und wahrscheinlich versagen wird. Werte über 1 sind physikalisch unrealistisch und betonen, dass es Unsicherheiten und Ungenauigkeiten in den Parametern gibt, die zu seiner Berechnung verwendet werden. Dies kann passieren, wenn das Spannungsfeld an der Störung nicht gut definiert ist oder/und wenn Kohäsion und Reibungskoeffizient nicht korrekt sind.

2.2 „DILATION-TENDENCY“

Die „Dilation-Tendency“ quantifiziert die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Störung (Element) im Spannungsfeld extensiv ausdehnen und dadurch eine Fluidwegsamkeit darstellt. Sie ist das Verhältnis der Maximalspannung (σ_1) minus der Normalspannung (σ_n) zur Differenzspannung ($\sigma_1 - \sigma_3$) (Ferrill et al., 1999):

$$DT = \frac{\sigma_1 - \sigma_n}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (\text{Eq. 2})$$

DT liegt zwischen 0 und 1. DT gleich 0 bedeutet, dass die Störung orthogonal zur maximalen Spannung, also „geschlossen“, ist, während DT gleich 1 bedeutet, dass die Störung parallel zur minimalen Hauptspannung ausgerichtet ist, also möglicherweise „geöffnet“ für Fluidfluss ist.

Zur Berechnung der normierten „Slip-Tendency“ und der „Dilation-Tendency“ ist die Kenntnis des auf Störungen wirkenden effektiven Spannungsfeldes sowie der Kohäsion und des Reibungskoeffizienten erforderlich.

3 EINGABEN UND BERECHNUNG

3.1 SPANNUNGSFELD

3.1.1 KIT ANNAHMEN

In der Modellierung wird das regionale Spannungsfeld nach Ziegler und Heidbach (2020) genutzt, welches durch geomechanische Modellierung unter Verwendung offengelegter Spannungsmessungen und geomechanischer Parameter für den Großraum München quantifiziert wurde. Neben der durchschnittlichen Amplitude der sechs Spannungsfeldkomponenten werden auch Unsicherheiten bereitgestellt. Dies ermöglicht die Berücksichtigung alternativer regionaler Spannungsfeldszenarien, wodurch, bei unveränderter Störungsgeometrie, Unsicherheiten für die „Slip-Tendency“ und für die „Dilation-Tendency“ evaluiert werden können.

Abbildung 2 zeigt ein vertikales Profil des Spannungsfeldes im Bereich der Bohrungen des Geothermiekraftwerks Schäftlarnstraße (Ost: 690369 m UTM32, Nord: 5332710 m UTM32). SH_{max} , SH_{min} , S_v sind extrahiert aus Ziegler und Heidbach (2020) und als volle Linien plus oder minus einer Standardabweichung (als gepunkteten Linien) dargestellt. Ebenfalls dargestellt ist der Porendruck nach Seithel et al. (2015) (blaue Linie).

Wie man sieht, ist das Spannungsfeld in dem Malm Reservoirs heterogen, mit einer starken Zunahme der maximalen Horizontalspannung und einer Abnahme der minimalen Horizontalspannung. Weitere Details zur Spannungsfeldverteilung im Großraum München finden sich in Ziegler und Heidbach (2020). Die maximale horizontale Spannungsrichtung beträgt $1,7^\circ NE$ und das Regime ist ein Blattverschiebungsregime.

3.1.2 ERDWERK ANNAHMEN

Für das Geothermiefeld Schäftlarnstraße wurden von Erdwerk die folgenden Spannungsfeldeigenschaften verwendet:

- Porendruck = 0,08807 bar/m
- SH_{max} = 0,37483 bar/m (Worst-Case-Annahme: kritische vorgespannte Störungen)
- S_v = 0,2536 bar/m
- SH_{min} = 0,18 bar/m
- Azimut der maximalen horizontalen Spannung: $0^\circ NE$

Für das Geothermiefeld Pullach und den Standort des zukünftigen Geothermiefeldes Baierbrunn wurden von Erdwerk folgende Spannungsfeldparameter verwendet:

- Porendruck = 0,089258 bar/m
- SH_{max} = 0,37232 bar/m (Worst-Case-Annahme: kritische vorgespannte Störungen)
- S_v = 0,2536 bar/m
- SH_{min} = 0,18 bar/m
- Azimut der maximalen horizontalen Spannung: $0^\circ NE$

Zwischen beiden Modellen ändern sich nur der Porendruckgradient und der maximale horizontale Spannungsgradient. Für beide Modelle gelten die angegebenen Werte nur für das Malm-Reservoir; für die anderen Formationen sind sie nicht genau oder sogar falsch (insbesondere der Porendruck und die horizontalen Spannungen).

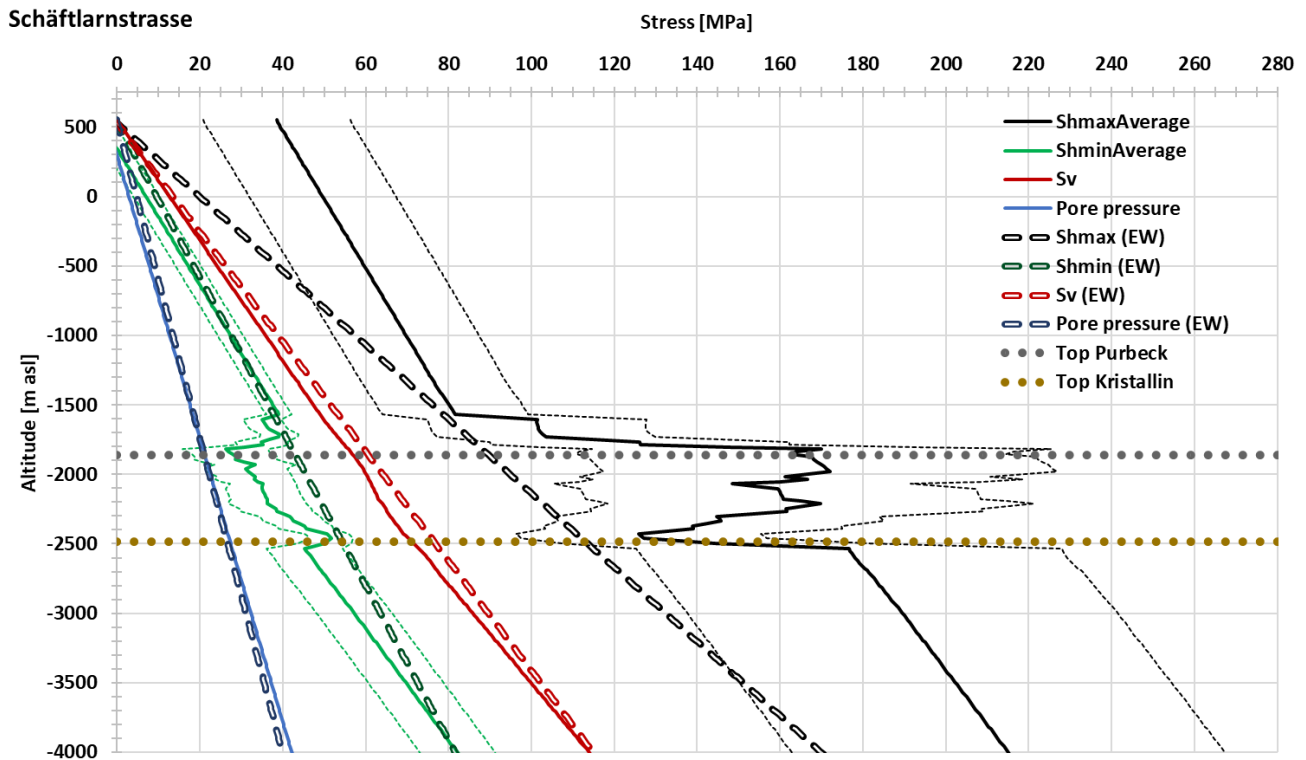


Abbildung 2: Vertikales Profilbeispiel des Spannungsfeldes in der Nähe der Bohrlochköpfe der Geothermieranlage Schäftlarnstraße (Osten: 690369 m UTM32, Norden: 5332710 m UTM32). Shmax, Shmin, Sv und Porendruck nach Ziegler und Heidbach (2020) sind als volle Linien (plus/minus eine Standardabweichung als gepunktete Linien) sowie die von Erdwerk aufgenommenen Profile als gestrichelte Linien dargestellt. Der Top-Purbeck und der Top-Kristallin sind durch graue bzw. braune gepunktete Linien hervorgehoben.

3.1.3 DISKUSSION

Abbildung 2 zeigt das Spannungsmodell von Erdwerk im Geothermiefeld Schäftlarnstraße mit gestrichelten Linien. Es kann mit dem Modell nach Ziegler und Heidbach (2020) verglichen werden. Wie im Reservoir ersichtlich, sind der Porendruck und die Vertikalspannungen vergleichbar, jedoch gibt es Unterschiede bezüglich Horizontalspannungen. Um in beiden Fällen ähnliche Werte für Shmin zu erhalten und die ~15 MPa Unterschied zu kompensieren, ist es notwendig, das durchschnittliche Shmin-Modell nach Ziegler und Heidbach (2020) plus eine Standardabweichung zu berücksichtigen. Hierbei zeigt sich auch, dass die Variabilität der geomechanischen Parameter der Schichten, die das Reservoir bilden (hier dargestellt zwischen dem Top-Purbeck und dem Top-Kristallin), zu einer Variation von Shmin über die Tiefe nach Ziegler und Heidbach (2020) führt. Diese Variabilität besteht auch für SHmax. Allerdings ist das durchschnittliche SHmax-Modell nach Ziegler und Heidbach (2020) um ~50 MPa größer als das Modell von Erdwerk. Selbst eine Verringerung des Modells nach Ziegler und Heidbach (2020) um eine Standardabweichung führt zu einer Differenz von ~20 MPa. Es ist bekannt, dass eine SHmax-Abschätzung komplex ist (was durch die größeren Unsicherheiten bei SHmax als bei SHmin in Ziegler und Heidbach (2020) veranschaulicht wird). Einzige Ausnahme stellen spezifische Messungen dar, was in diesem Gebiet nie der Fall war. Infolgedessen ist die

Differentialspannung im Modell Ziegler und Heidbach (2020) im Durchschnitt deutlich größer als unter den Erdwerk-Annahmen, was bedeutet, dass der Untergrund als kritischer gespannt angenommen wird (siehe unten).

Durch die unterschiedlichen Spannungsfeldannahmen zwischen dem KIT-Ansatz und dem Erdwerk-Ansatz wird auch der Vergleich der normierten „Slip-Tendency“ und „Dilation-Tendency“ interessanter.

3.2 STRUKTURGEOLOGISCHES MODELL

Das Strukturmodell für die Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn wurde von Erdwerk zur Verfügung gestellt (Abbildung 1). Es wurde unter Verwendung von 3D-seismischen Ergebnissen aus dem GRAME-Projekt für den Standort Schäftlarnstraße und aus der relativ neuen 3D-seismischen Untersuchung um Baierbrunn erstellt. In Pullach werden 2D-seismische Linien verwendet. Somit werden für das numerische Strukturmodell dieselben Störungen, Störungsflächen und Schichtgrenzen zwischen KIT und Erdwerk verwendet.

Die Bohrlochtrajektorien der Schäftlarnstraße wurden von den SWM, die von Pullach von IEP und die von Baierbrunn von Erdwerk zur Verfügung gestellt.

3.3 VERSAGENSKRITERIUM

Das in diesem Bericht verwendete Versagenskriterium ist Mohr-Coulomb.

3.3.1 ERDWERK ANNAHMEN

In den Modellen von Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn werden die folgenden Parameter verwendet:

- Kohäsion = 0 MPa
- Statischer Reibungskoeffizient = 0,6

3.3.2 KIT ANNAHMEN

Aufgrund des vom KIT angewandten heterogenen Spannungsmodells wurden die Kohäsion und der statische Reibungskoeffizient unabhängig voneinander für die Störungen in der Schäftlarnstraße und die Störungen in Pullach und Baierbrunn geschätzt. Dies ist notwendig, um zu gewährleisten, dass die Störungen im aktuellen Spannungszustand nicht bereits überkritisch beansprucht werden (d.h. normierte „Slip-Tendency“ größer als 1). Das Verfahren bestand darin, den Spannungsfeldtensor 10 000 Mal zufällig um seinen Mittelwert gemäß den Normalverteilungen mit den Standardabweichungen nach Ziegler und Heidbach (2020) zu variieren. Anschließend wurde eine Rastersuche für die Kohäsion zwischen 0 und 10 MPa und den statischen Reibungskoeffizienten zwischen 0,6 und 1,0, durchgeführt. Das erste Wertepaar mit dem statischen Reibungskoeffizienten, dass bei mehr als 90 % aller Störungselemente zu einer normierten „Slip-Tendency“ kleiner als eins führte, wurde als Referenz beibehalten.

Daraus ergibt sich für die Schäftlarnstraße:

- Kohäsion = 3 MPa
- Statischer Reibungskoeffizient = 0,85

Für Pullach und Baierbrunn:

- Kohäsion = 6 MPa
- Statischer Reibungskoeffizient = 0,85

Diese beiden Werte, die das Mohr-Coulomb-Versagenskriterium beschreiben, sind größer als die von Erdwerk angenommenen. Dies ist ein erwarteter Unterschied, da die Differentialspannung im KIT-Ansatz viel größer ist als die von Erdwerk. Sie sind jedoch immer noch realistisch.

3.4 BERECHNUNG

Zur Berechnung der normierten „Slip-Tendency“ und der „Dilation-Tendency“ werden die Gleichungen 1 und 2 für jedes Element der Störungsflächen angewendet. Dies impliziert insbesondere die Abschätzung des Porendrucks in Abhängigkeit von der Tiefe und die Berechnung der Normal- und Scherspannung in Abhängigkeit von der Lage und Orientierung der einzelnen Elemente der Störung.

Bei dem von KIT verfolgten Ansatz wird das mit Unsicherheiten versehene Spannungsfeld verwendet, um die mögliche normierte „Slip-Tendency“ (ST) und „Dilation-Tendency“ (DT) zu ermitteln. Dazu werden 10 000 Zufallsziehungen des Spannungsfeldes nach einer Normalverteilung mit den vorgegebenen mittleren Spannungen und zugehörigen Standardabweichungen (siehe Unterabschnitt 3.1.1 „KIT Annahmen“) vorgenommen. Eine Einschränkung bei der zufälligen Ziehung besteht darin, dass das angenommene Blattverschiebungsregime verifiziert werden muss. Dieser Ansatz führt zu einer probabilistischen Verteilung von ST und DT in Abhängigkeit von der lokalen 3D-Spannungstensoramplitude.

4 ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Geothermiefelder Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn dargestellt.

Zuerst wird ein allgemeiner Überblick über die normierte „Slip-Tendency“ (ST) und die „Dilation-Tendency“ (DT) um die (erwarteten) Bohrungen der Felder für den Reservoirabschnitt gezeigt und beschrieben. Darüber hinaus wird der Zustand der Störungen in einem bestimmten Abstand von der offenen Bohrsektion betrachtet. Im Zusammenhang mit der Geothermie ist auch relevant, den Einflussradius der Ausbeutung zu berücksichtigen, anstatt alle Störungen in ihrer Gesamtheit zu betrachten. Natürlich ersetzt dies nicht eine vollständige dynamische Reservoirsimulation, die den Einflussbereich thermohydraulisch-mechanischer (chemischer) Prozesse mit zunehmender Betriebszeit besser quantifizieren kann. Deshalb werden nur Störungselemente innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m jeder offenen Bohrsektion extrahiert und die entsprechenden ST- und DT-Verteilungen dargestellt.

Als Referenzkoordinatensystem wird in diesem Bericht die UTM-Zone 32N (EPSG: 25832) verwendet.

4.1 SCHÄFTLARNSTRASSE

4.1.1 NORMIERTE „SLIP-TENDENCY“

4.1.1.1 Ergebnisse des KIT-Ansatzes

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen in 3D die normierte „Slip-Tendency“ der Störungen der Schäftlarnstraße nach dem KIT-Ansatzes, mit einem Konfidenzniveau von 50%. Die sechs Bohrungen des Feldes sind mit ihren offenen Bohrsektionen dargestellt.

Wie zu beobachten ist, sind mehrere Teile der Störungen kritisch beansprucht, insbesondere diejenigen, die $\sim 30^\circ$ von der horizontalen Hauptspannungsrichtung, d.h. etwa 32°NO , ausgerichtet sind. ST ist auch in den stark neigenden Teilen der Störungen größer, was im Reservoir, aber auch bis zum Top-Lithotamienkalk (wo die Störung gebogen wird) und im Kristallin der Fall ist. Die Änderung der mechanischen Eigenschaften zwischen dem Malm und dem Kristallin (Ziegler und Heidbach, 2020) erklärt die Abnahme der ST an der Kontaktfläche. Abgesehen von dieser lokalen Veränderung gibt es keinen großen Unterschied in der ST zwischen dem Malm und dem Kristallin.

Um die Ergebnisse besser quantifizieren zu können, wird die Verteilung der ST für Störungsflächen in einem bestimmten Abstand zum offenen Bohrsektion evaluiert.

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen Boxplots (gewichtet nach der Fläche des Störelements) von ST für Radien von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m und für die drei Konfidenzniveaus: 10 %, 50 % und 90 %. Der Median der ST ist als horizontales Segment im Kasten dargestellt, dessen Grenzen dem ersten und dritten Quartil entsprechen. Die Förderbohrungen Th1 und Th4 sind weniger als 250 m von Störungen entfernt, bei allen anderen Bohrungen sind die Störungen mindestens 500 m (Injektionsbohrungen Th3 und Th5) oder 750 m (Förderbohrung Th2a(M) und Injektionsbohrung Th6) entfernt. Die Förderbohrung Th1 liegt am nächsten an den Störungsflächen von Störungen mit großer ST (innerhalb von 250 m), ebenso wie Th4 (innerhalb von 500 m). Im Gegensatz dazu gibt es im Umkreis von 1 km um Th2a(M) oder Th6 und im Umkreis von 750 m um Th3 und Th5 keine kritisch vorgespannte Störungsfläche. Wie dargestellt, sind die ST-Werte umso größer, je größer das Konfidenzniveau ist, und in geringerem Maße, je größer der Interquartilsbereich der ST ist.

Abbildung 7 zeigt die Störungsfläche (in km^2 und in Prozent der Gesamtfläche), die einer gegebenen ST ausgesetzt ist, innerhalb des kürzesten Radius um jede der sechs Bohrungen für die Konfidenzniveaus 10, 50 und 90%.

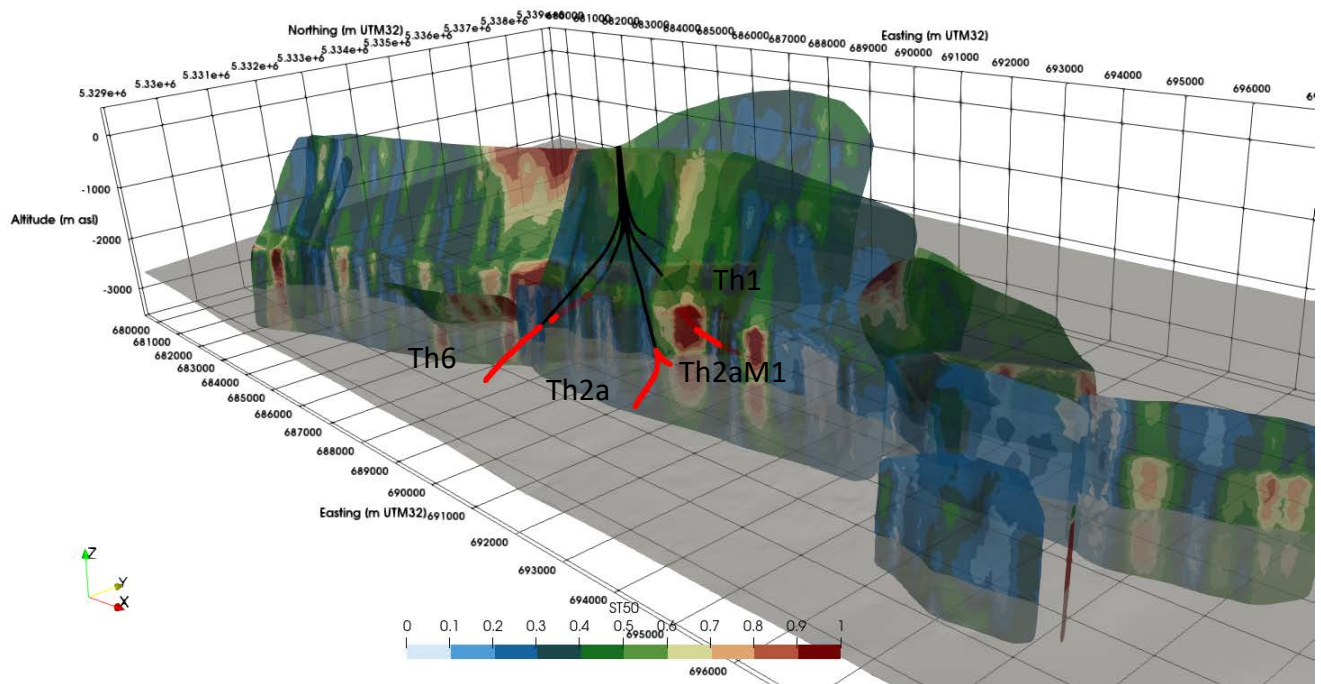


Abbildung 3: Schäftlarnstraße. 3D-Ansicht der mit dem KIT-Ansatz ermittelten normierte "Slip-Tendency" der Störungen um die Bohrungen. Konfidenzniveau von 50 %. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.

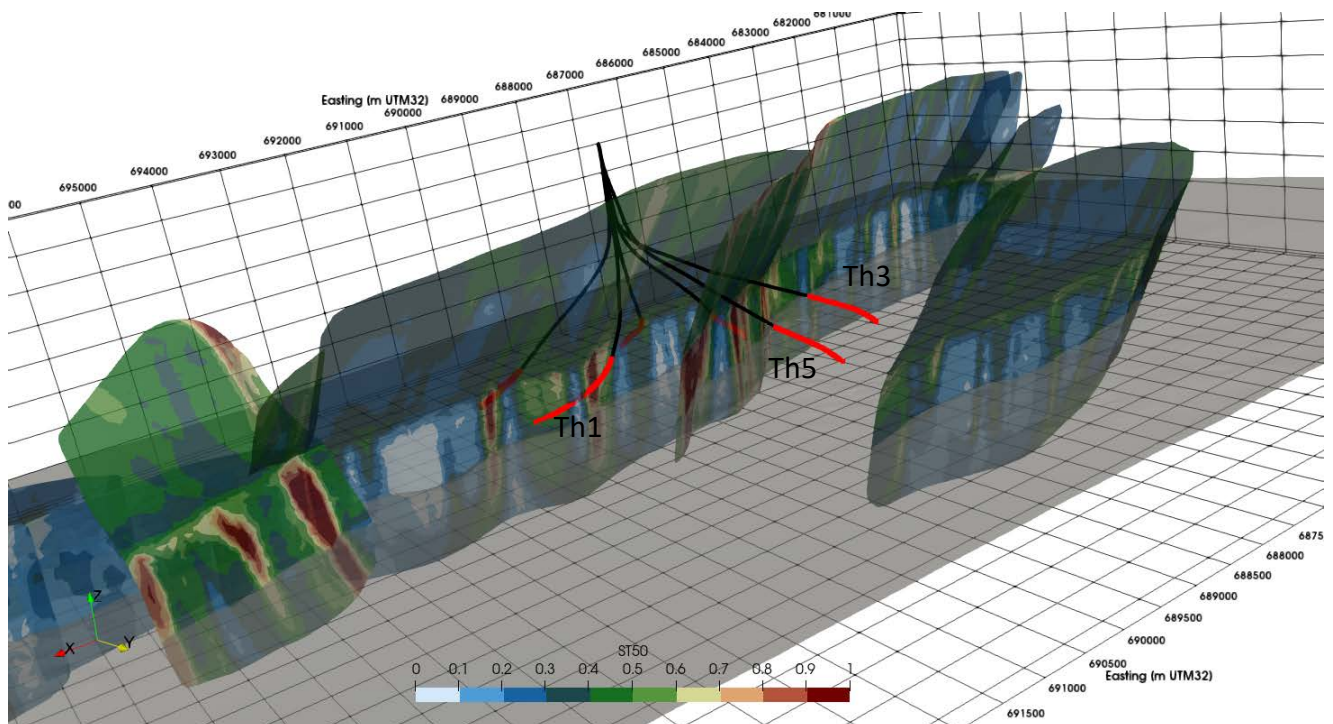


Abbildung 4: Wie Abbildung 3, jedoch aus einem anderen Blickwinkel.

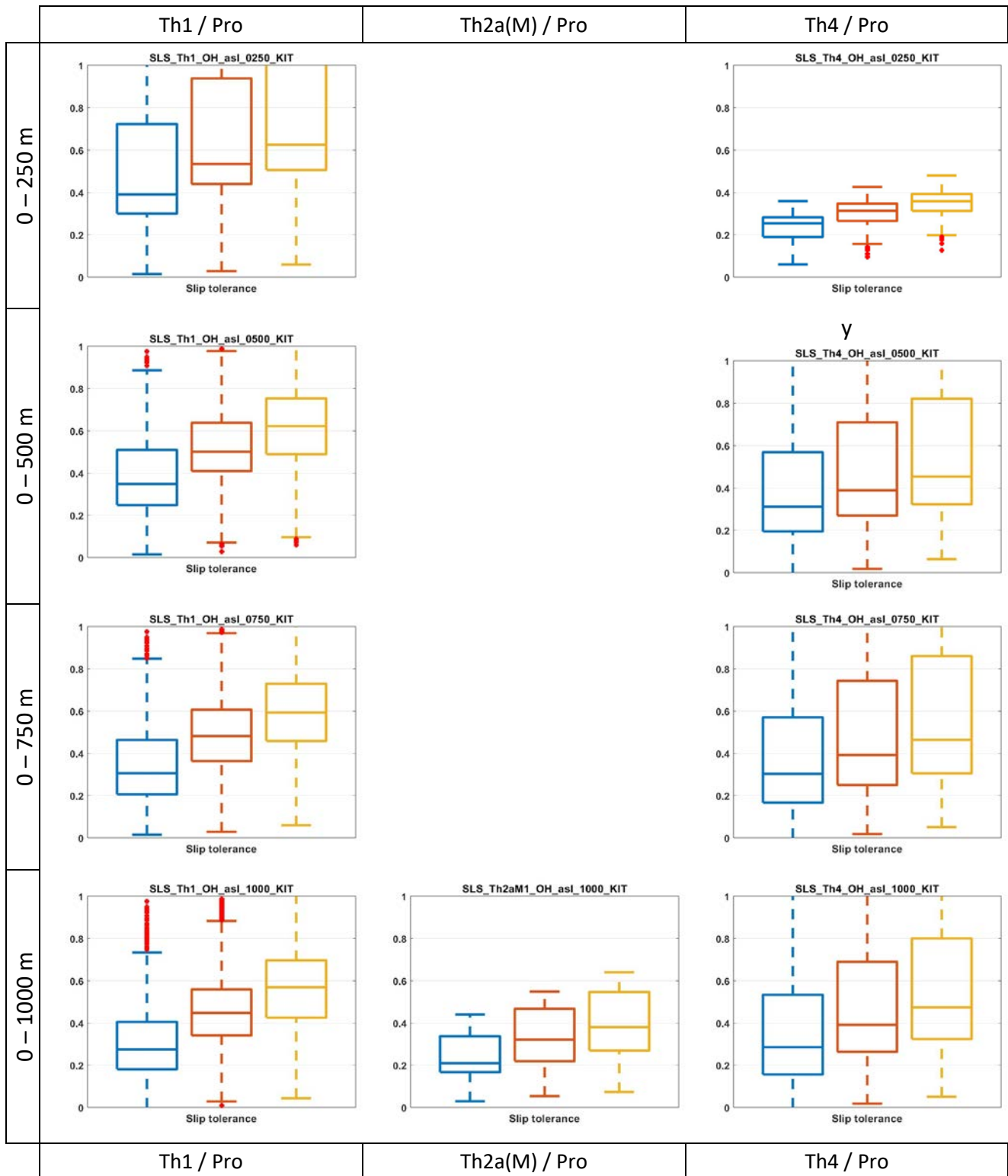


Abbildung 5: Schäftlarnstraße. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Produktionsbohrungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).

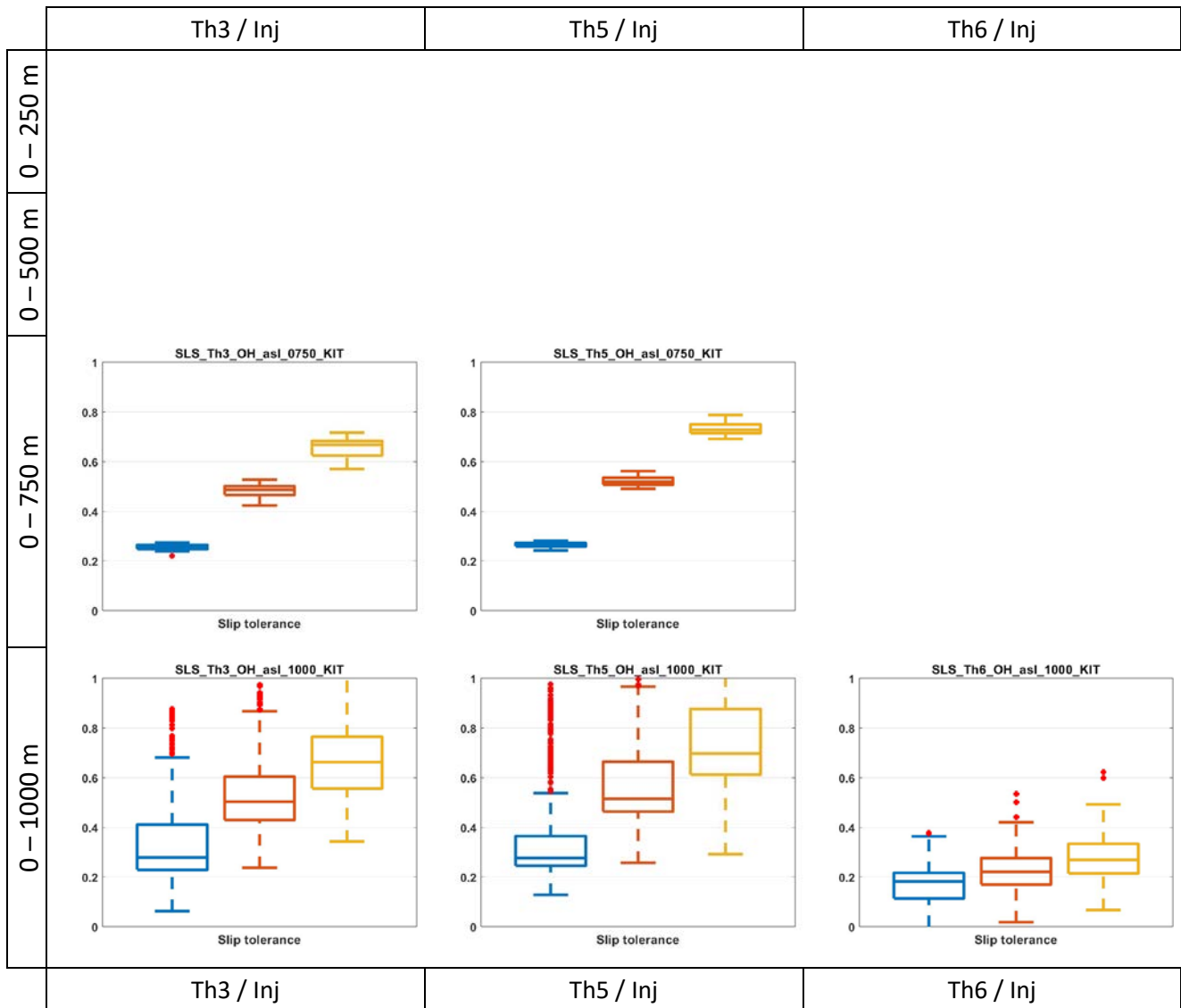
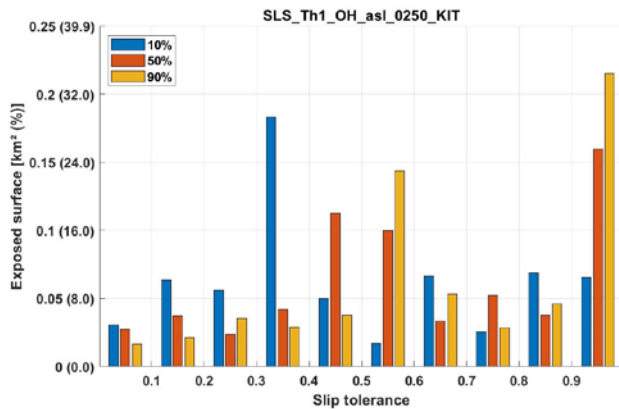
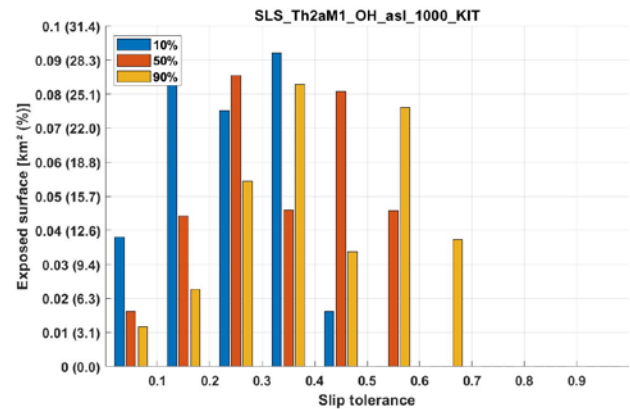


Abbildung 6: Schäftlarnstraße. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Injektionsbohrungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).

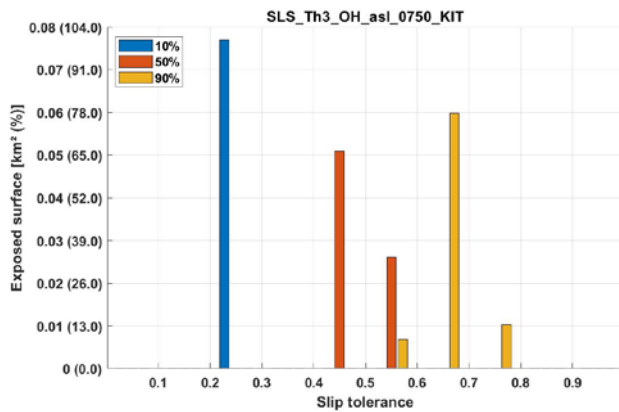
a)



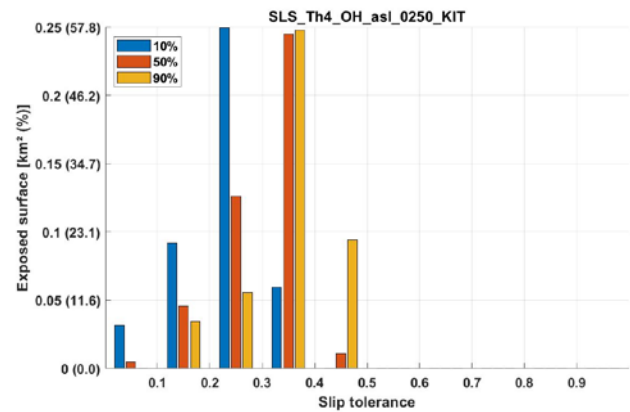
b)



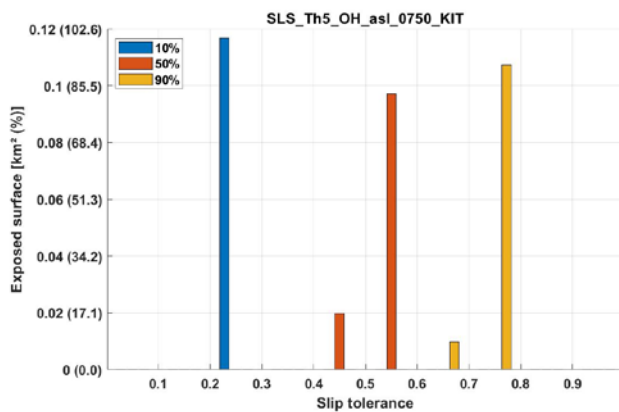
c)



d)



e)



f)

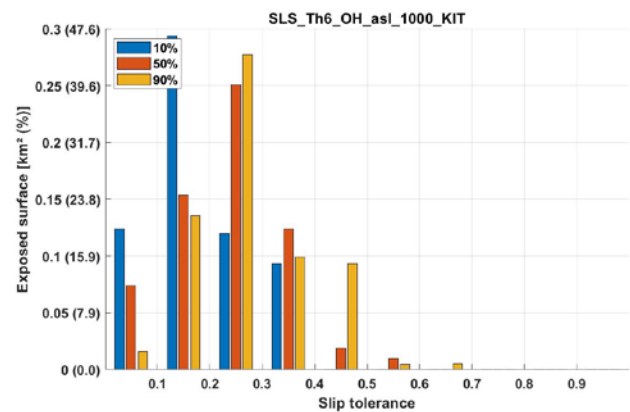


Abbildung 7: Schäftlarnstraße. Verteilung der normierten „Slip-Tendency“ auf den gesamten Störungsflächen, die die offenen Bohrsektionen umgeben: a) Th1 Produktionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 250 m; b) Th2a und Th2aM Produktionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 1000 m; c) Th3 Injektionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 750 m; d) Th4 Produktionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 250 m; e) Th5 Injektionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 750 m und f) Th6 Injektionsbohrung, Störungsfläche im Radius von 1000 m. Jede Farbe steht für ein Konfidenzniveau: 10% - blau, 50% - orange und 90% - gelb.

4.1.1.2 Vergleich mit den Ergebnissen des Erdwerk-Ansatzes

Abbildung 8 zeigt die ST-Ergebnisse von Erdwerk (farbige Konturen) und die des KIT (transparente Flächen). Die allgemeine Verteilung der ST-Werte auf den Störungen ist vergleichbar. Allerdings sind die ST-Werte von Erdwerk niedriger als die des KIT. Dies ist auf die unterschiedlichen Spannungsfeldhypothesen zurückzuführen und ist ein erwartetes Ergebnis (s. 3.1.3 Diskussion).

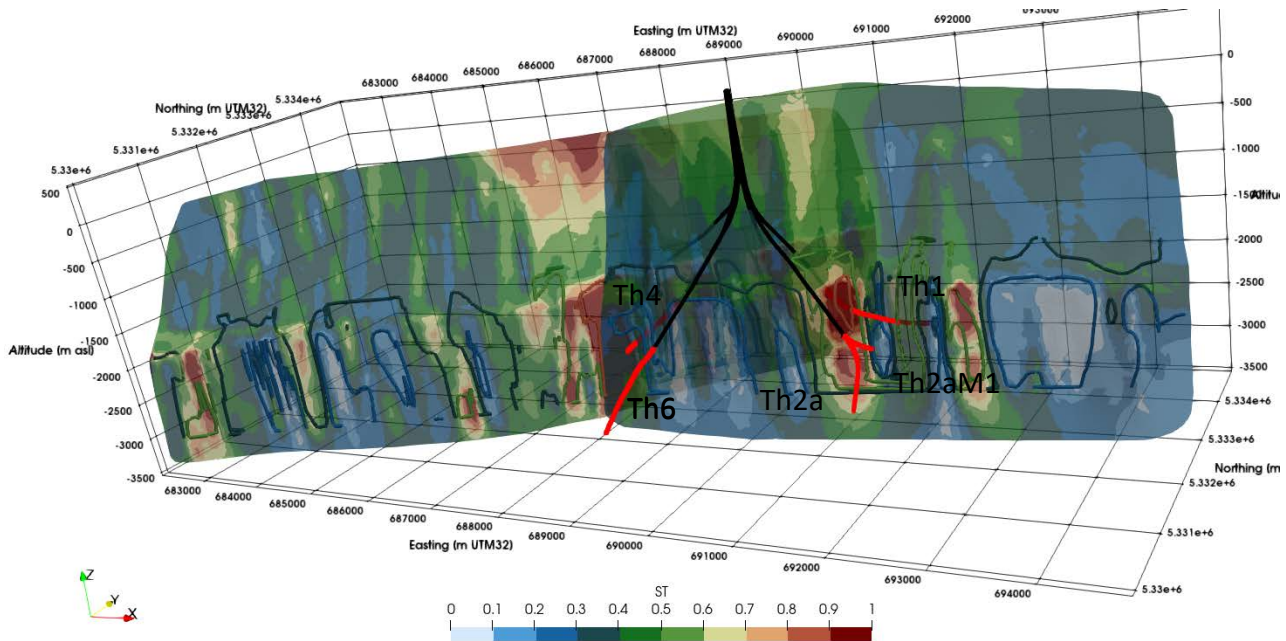


Abbildung 8: Schäftlarnstraße. Normierte „Slip-Tendency“ von Erdwerk (farbige Konturen) und von KIT auf 50% Konfidenzniveau (transparente Flächen).

Abbildung 9 und Abbildung 10 vergleichen die von KIT und Erdwerk ermittelten ST-Boxplots für die Störungsflächen im Umkreis von 1 km um jede Bohrung. Das 50%ige Konfidenzniveau des KIT (d.h. repräsentativ für das erwartete durchschnittliche Spannungsfeld) kann mit dem Ergebnis von Erdwerk verglichen werden. Wie zu sehen ist, sind die mittleren ST-Werte nach Erdwerk im Allgemeinen größer, außer für Th6. Die maximalen ST-Werte sind jedoch immer kleiner als die des KIT. Im Allgemeinen sind die Interquartilsbereiche vergleichbar. Die Gesamtvariabilität von ST ist also bei den Erdwerk-Ergebnissen geringer, und keine der Störungsflächen in diesem Radius ist kritisch gespannt, mit Ausnahme von Th4.

4.1.1.3 Diskussion

In der Schäftlarnstraße wurden die Förder- und Injektionsbohrungen bereits ausgewählt. Die ST-Ergebnisse bestätigen, dass Th1 und Th4 als Förderbohrungen die beste Wahl sind (unabhängig von zusätzlichen Informationen), da sie am nächsten zu den kritisch vorgespannten Zonen der umliegenden Störungen liegen. Durch die Förderung wird der Porendruck an der/den Bohrung(en) und in der Umgebung nicht ansteigen, sondern eher abnehmen, was eine Erhöhung der ST in der Umgebung verhindert.

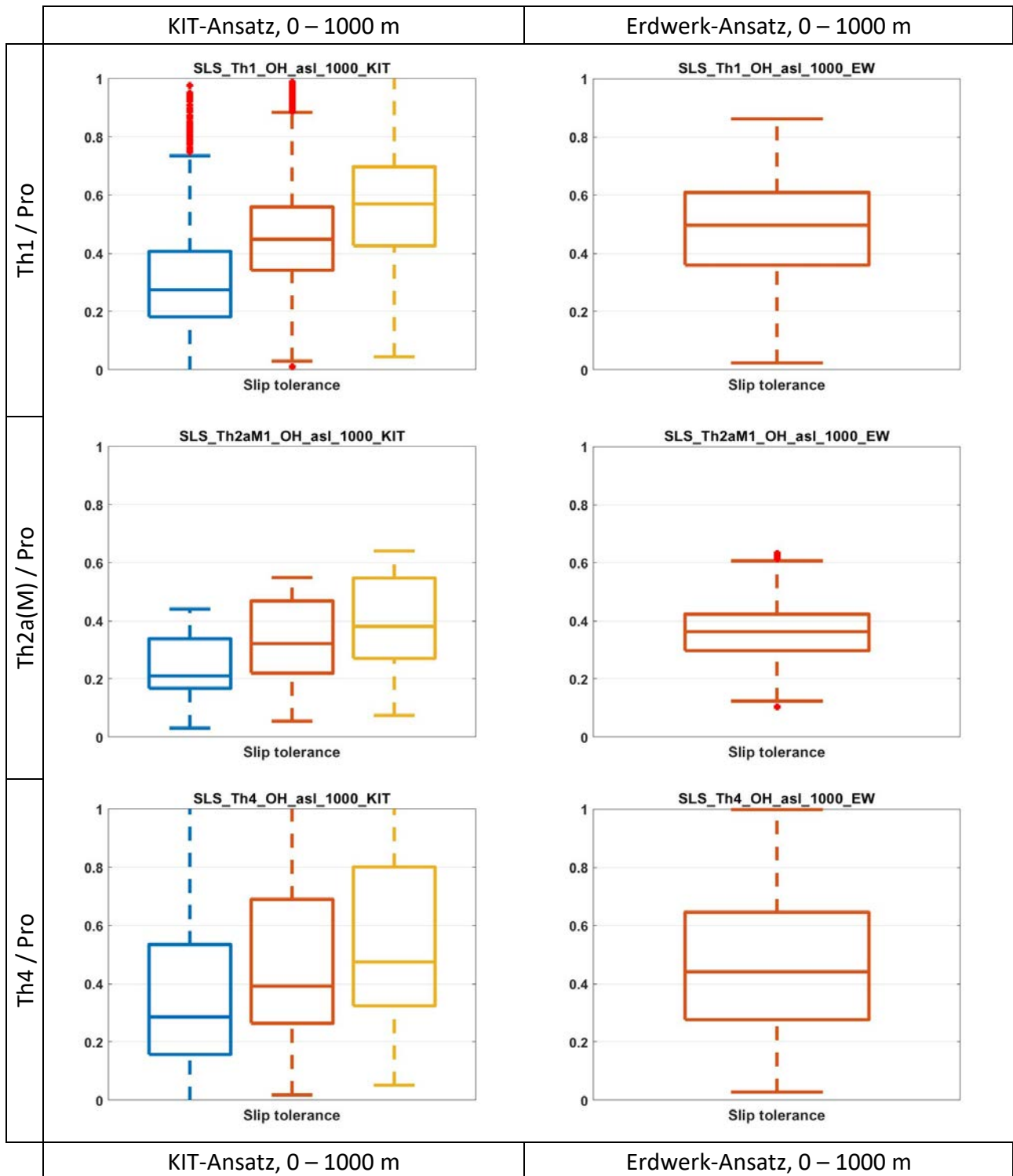


Abbildung 9: Schäftlarnstraße. Boxplots der normierten „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 1000 m um die offenen Bohrsektionen der Produktionsbohrungen (Zeilen) nach dem KIT-Ansatz (linke Spalte) und nach dem Erdwerk-Ansatz (rechte Spalte). Für KIT sind die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) dargestellt.

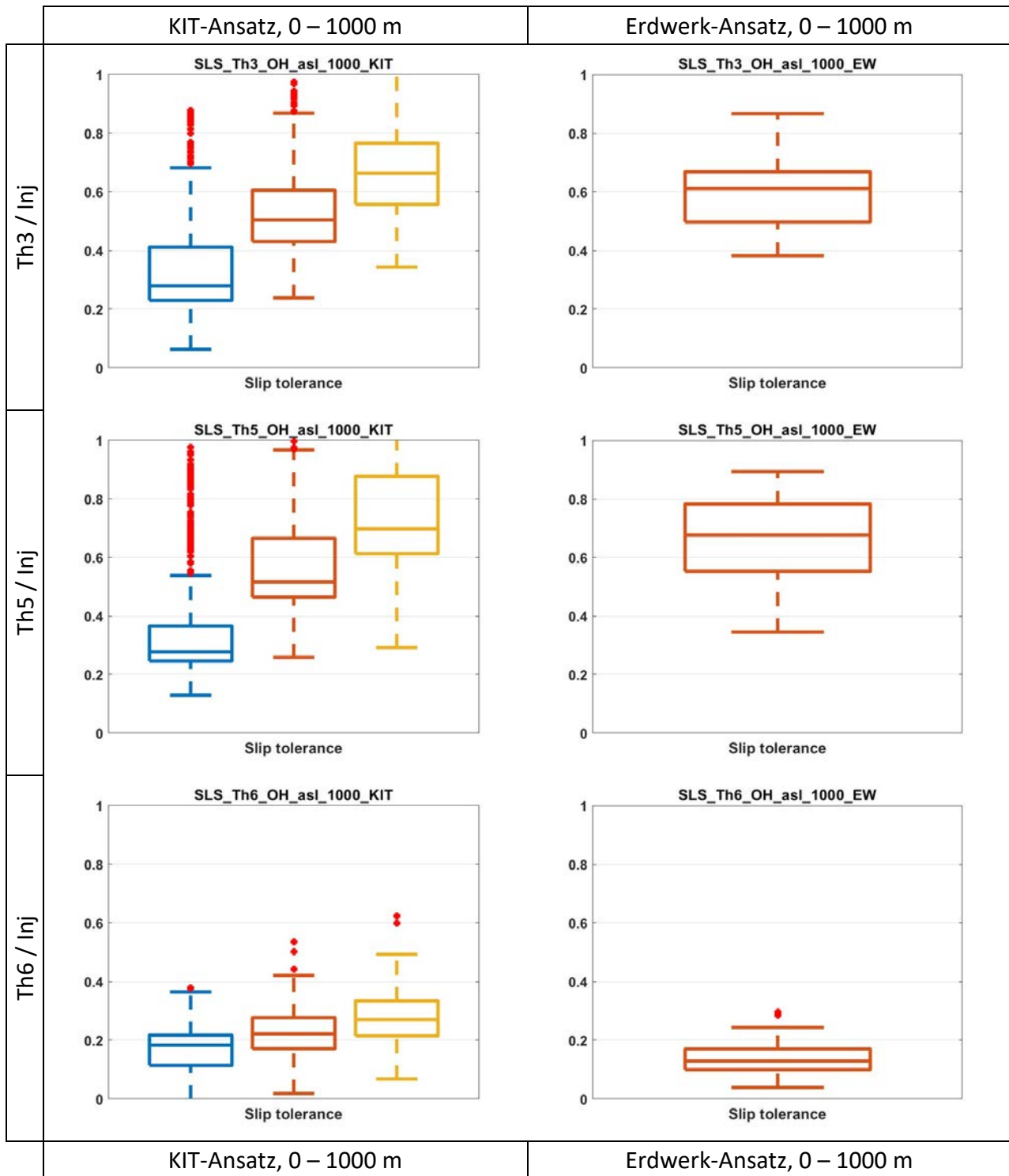


Abbildung 10: Schäftlarnstraße. Boxplots der normierten „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 1000 m um die offenen Bohrsektionen der Injektionsbohrungen (Zeilen) nach dem KIT-Ansatz (linke Spalte) und nach dem Erdwerk-Ansatz (rechte Spalte). Für KIT sind die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) dargestellt.

4.1.2 „DILATION-TENDENCY“: ERGEBNISSE DES KIT-ANSATZES

Wie in Abbildung 11 zu sehen ist, korrespondieren die Zonen mit hoher „Dilation-Tendency“ relativ gut mit den Zonen hoher normierter „Slip-Tendency“. Die Variabilität ist weniger stark von der Neigung der Störungen abhängig als die ST-Variabilität.

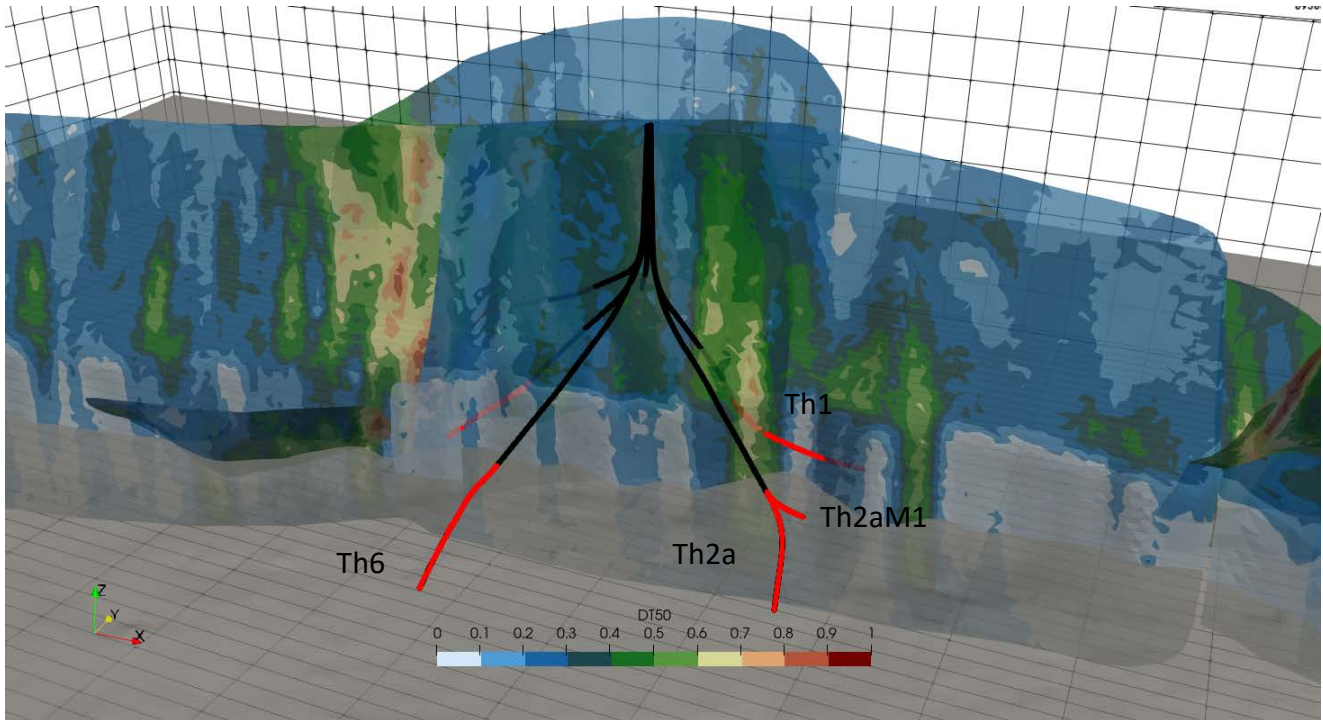


Abbildung 11: Schäftlarnstraße. Mit KIT-Ansatz ermittelte „Dilation-Tendency“ auf 50% confidence level Konfidenzniveau (transparente Flächen). Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen, dass die Dilatationstendenz bei einem gegebenen Abstand zu den Bohrungen unabhängig vom gewählten Konfidenzniveau stabil bleibt. Die meisten Bohrungen befinden sich in der Nähe von Störungen, bei denen 75% der Oberfläche eine DT von weniger als 0,5 aufweisen; eine Ausnahme bildet die Injektionsbohrung Th5, bei der die DT weniger als 0,6 beträgt.

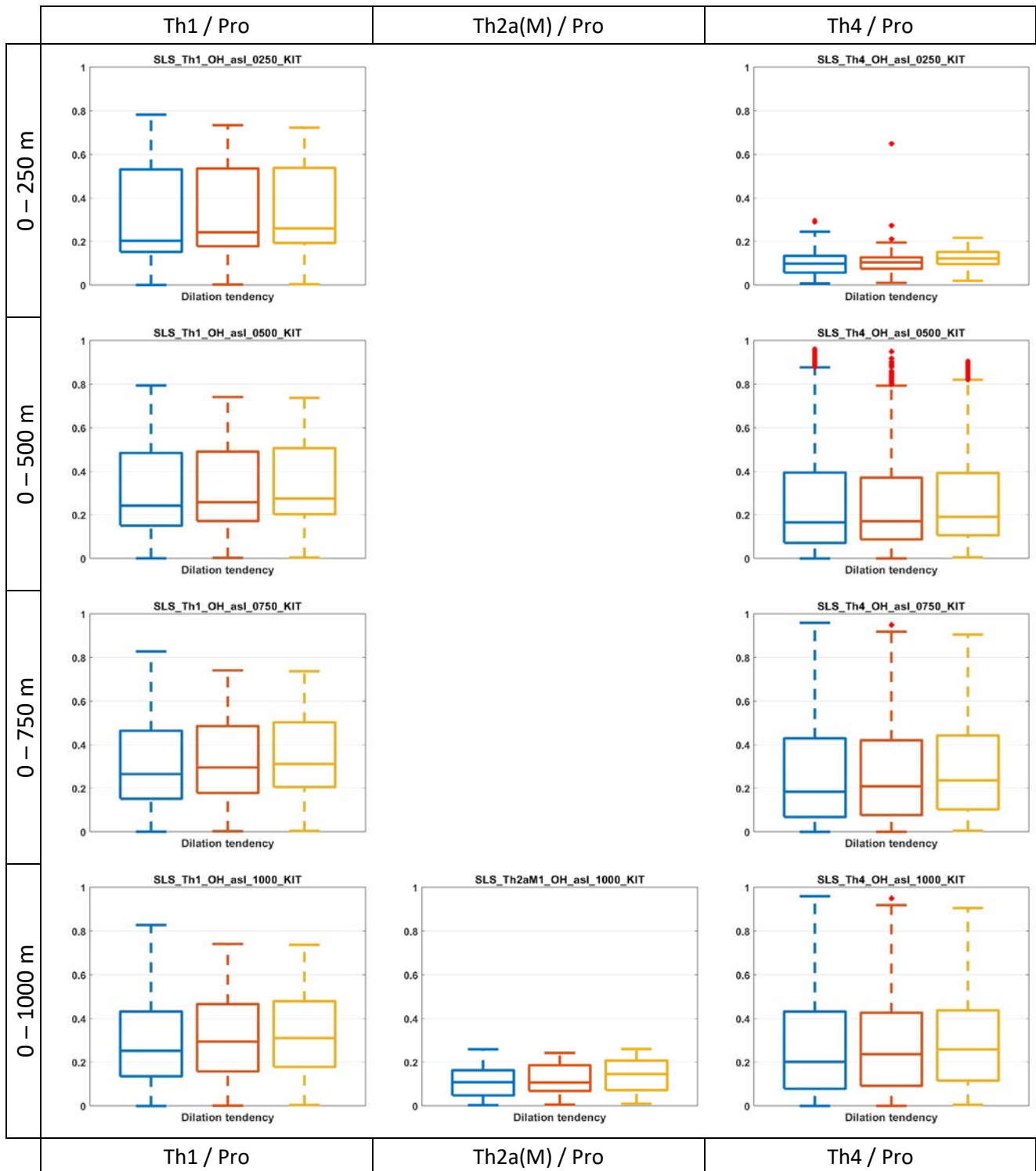


Abbildung 12: Schäftlarnstraße. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Produktionsbohrungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).

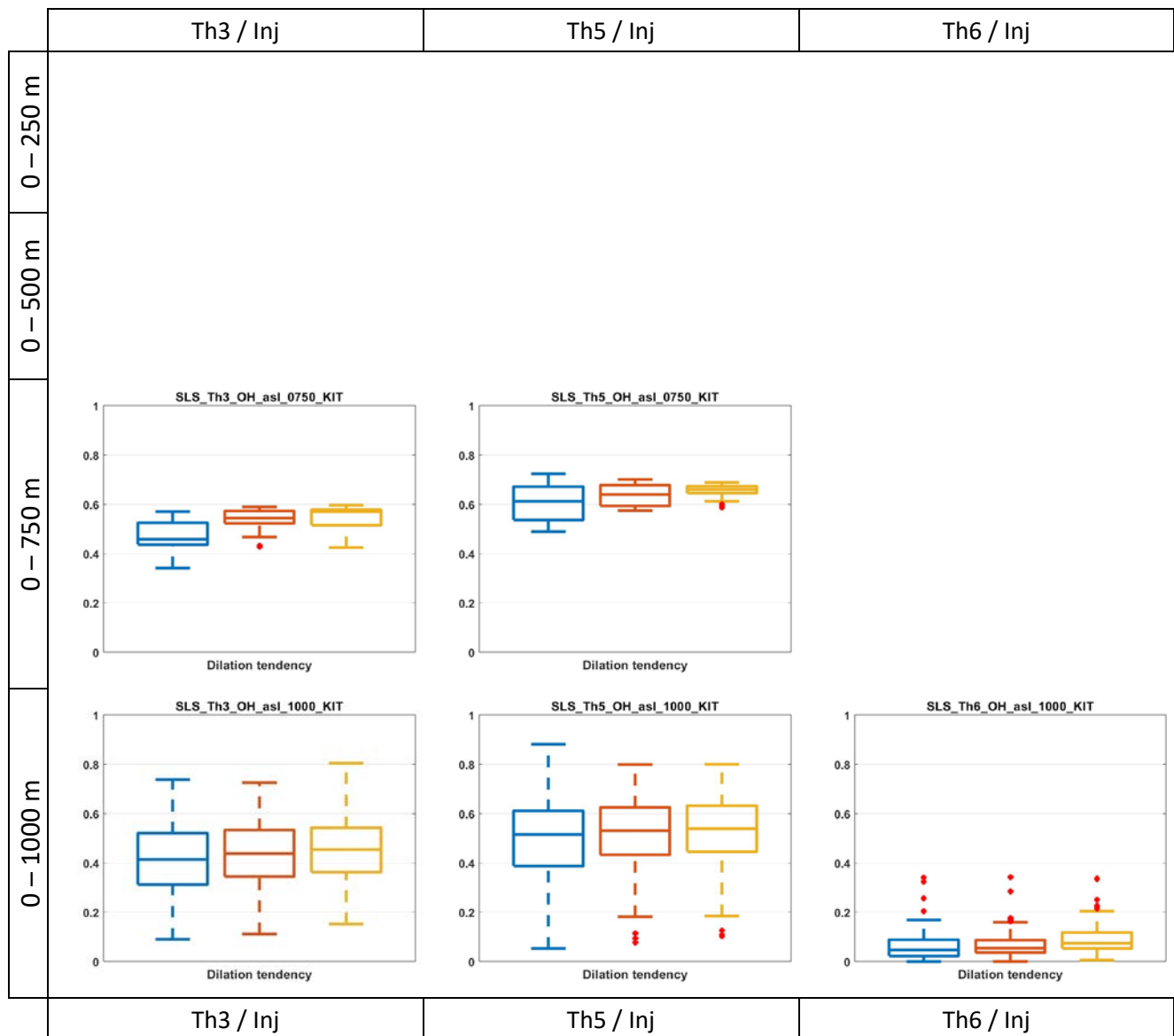


Abbildung 13: Schäftlarnstraße. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Injektionsbohrungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).

4.2 PULLACH

4.2.1 NORMIERTE „SLIP-TENDENCY“

Wie in Abbildung 14 zu sehen ist, ist nur eine relativ kleine Störung in der Nähe des Geothermiefeldes Pullach zu finden. Diese Störung ist relativ weit von den offenen Bohrsektionen der Bohrungen Th1, Th2 und Th3 entfernt. Die Störung ist mindestens 500 m von Th2, mehr als 750 m von Th3 und mehr als 1 km von Th1a entfernt. Die Abbildung zeigt, wie die ST auf der Störung "zwischen" Th2 und Th3 verteilt ist. Interessanterweise erklärt eine leichte Drehung der Oberfläche der Störung auf ihrem nördlichen Teil die höheren ST-Werte näher an Th2 als an Th3.

Darüber hinaus ermöglicht Abbildung 14 einen qualitativen Vergleich zwischen den Ergebnissen des KIT (links) und des Erdwerks (rechts). Wie bereits für den Fall der Schäftlarnstraße festgestellt, ist die räumliche Verteilung vergleichbar, allerdings sind beim KIT-Ansatz die maximalen ST-Werte größer und auch hier ist eine Abnahme in der Nähe der Oberkante Kristallin zu beobachten.

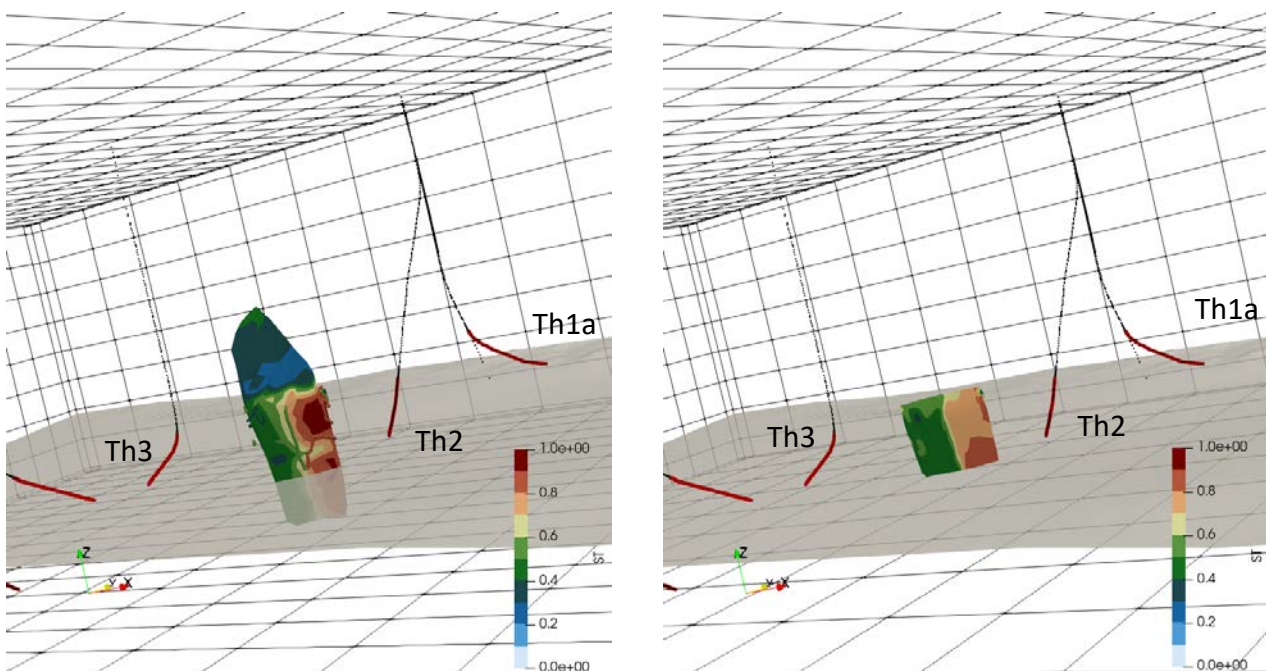


Abbildung 14: Pullach. 3D-Ansicht der mit dem KIT-Ansatz (links, Konfidenzniveau von 50%) oder mit dem Erdwerk-Ansatz (rechts) ermittelten normierte "Slip-Tendency" der Störung um Th2 und Th3 Bohrungen. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.

Die in Abbildung 15 dargestellten KIT-Ergebnisse zeigen, dass die Störungsoberfläche innerhalb von 1 km von Th2 kritisch vorgespannt sein kann ($ST \geq 1$), was bei Th3 nicht der Fall ist. Mit dem Erdwerk-Ansatz ist kein Teil der Störung kritisch vorgespannt, obwohl er in Richtung Th2 näher an der Kritikalität wäre.

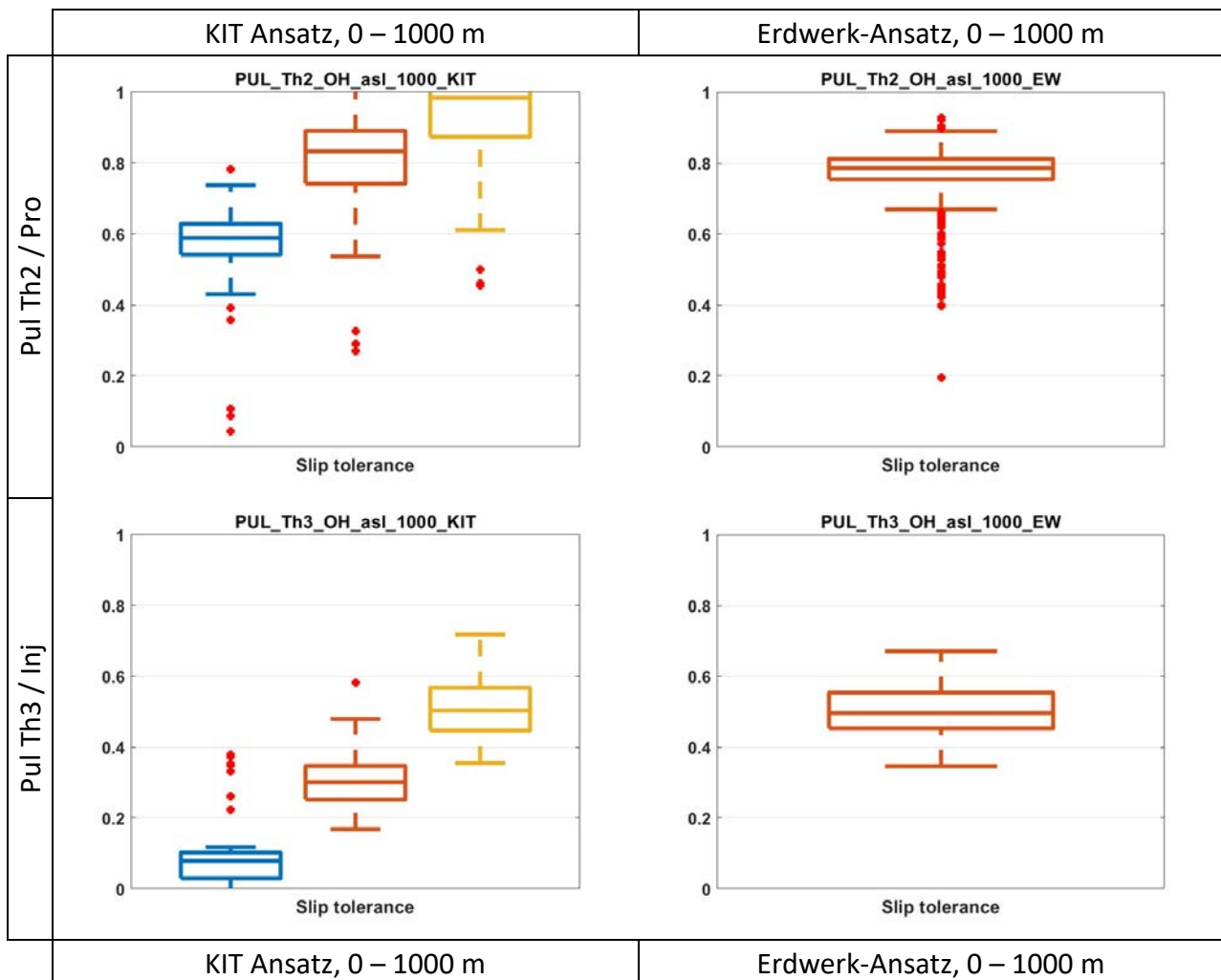


Abbildung 15: Pullach. Boxplots der normierten „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 750 m und 1000 m (Spalten) vom offenen Bohrsektionen der Bohrungen (Zeilen); links: nach dem KIT-Ansatz, für 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) Konfidenzniveaus; rechts: nach dem Erdwerk-Ansatz.

4.2.2 „DILATION-TENDENCY“: ERGEBNISSE DES KIT-ANSATZES

Abbildung 16 zeigt die Verteilung von DT auf den Störungsflächen nahe der Bohrungen Th2 und Th3. Wie zu sehen ist, liegt DT in Richtung Th2 bei etwa 0,6 und ist zwischen den Konfidenzniveaus 10, 50 und 90% relativ konstant. Der DT für die Störung in Richtung Th3 steigt jedoch mit zunehmendem Konfidenzniveau und schwankt zwischen 0,5 und 0,7.

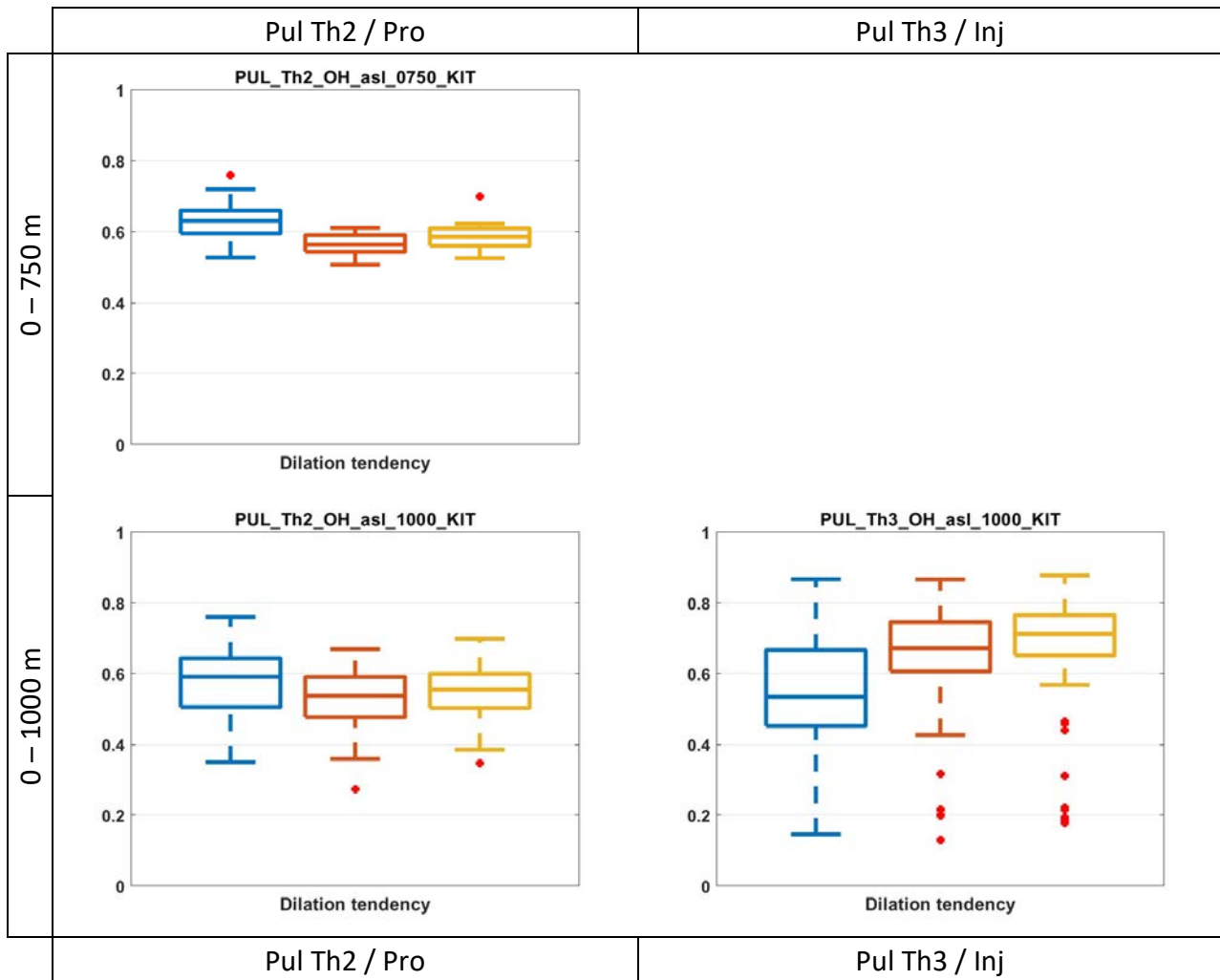


Abbildung 16: Pullach. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 750 m und 1000 m (Spalten) vor offenen Bohrsektionen der Bohrungen (Zeilen) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb). Die ersten drei Zeilen entsprechen den Produktionsbohrungen, die letzten drei Zeilen den Injektionsbohrungen.

4.3 BAIERBRUNN

Der Geothermiestandort Baierbrunn ist noch nicht entwickelt. Die Bohrpfade sind theoretische Trajektorien, die von Erdwerk empfohlen wurden.

4.3.1 NORMIERTE „SLIP-TENDENCY“

4.3.1.1 Ergebnisse des KIT-Ansatzes

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen 3D-Ansichten der mit dem KIT-Ansatz berechneten normierten „Slip-Tendency“ an den Störungen in der Umgebung der Baierbrunner Bohrungen. Wie zu sehen ist, ist die ST auf den stark geneigten Teilen der Störungen am größten, die von der Top Lithotamnienkalk oder der Top Purbeck, also der Oberseite des Reservoirs, ausgehen. In diesem Tiefenbereich sind Störungsflächen, die $\sim 32^\circ$ NE ausgerichtet sind, am stärksten gespannt. Wie dargestellt, befinden sich zwei Zonen mit hoher ST relativ nahe an den Bohrungen Th2 und Th6.

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die Verteilung der ST auf den Störungsoberflächen in einer bestimmten Entfernung von den sechs Bohrungen in Form von Boxplots. Innerhalb von 250 m von Th1, Th2 und Th6 können Störungsflächen angetroffen werden; bei Th3 ist dies in mehr als 250 m Entfernung der Fall und bei Th4 und Th5 in mehr als 500 m Entfernung. Mit einem Konfidenzniveau von 90% wäre Th2 weniger als 250 m von kritischen Zonen entfernt. Bei einem Konfidenzniveau von 50% ist dieses Ergebniss jedoch nicht mehr gültig, obwohl der ST-Wert mit etwa 0,9 relativ hoch bleibt. Neben Th2 ist Th6 die zweite Bohrung, die näher an relativ großen ST-Werten liegt. Bei einem Konfidenzniveau von 90 % werden die kritischen Werte in weniger als 500 m Entfernung erreicht, während sie bei einem Konfidenzniveau von 50 % in mehr als 500 m Entfernung vor Bohrung gefunden werden.

Abbildung 21 zeigt die Störungsfläche (in km^2 und in Prozent der Gesamtoberfläche), die einer bestimmten ST ausgesetzt ist, innerhalb des kürzesten Radius um jedes der sechs Bohrungen für die Konfidenzniveaus 10, 50 und 90%. Es wird deutlich, dass sich die Verteilung mit steigendem Konfidenzniveau zu größeren ST-Werten hin verschiebt.

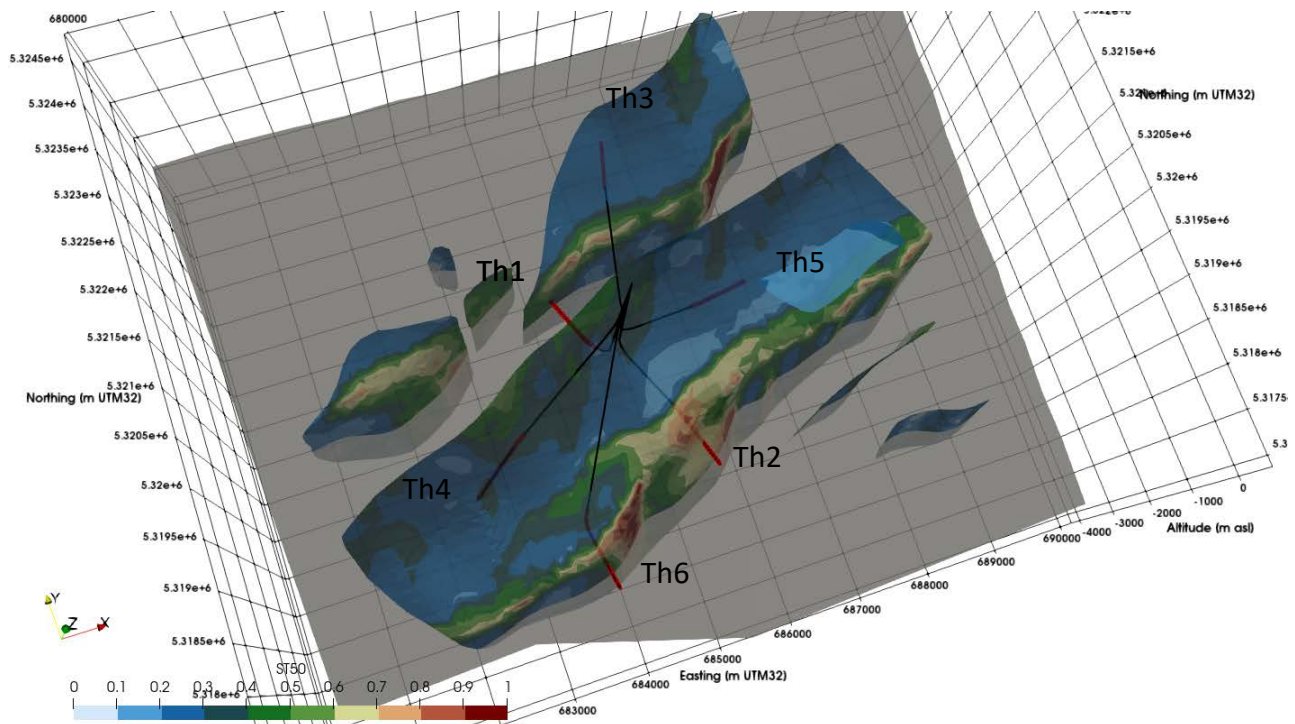


Abbildung 17: Baierbrunn. 3D-Ansicht der mit dem KIT-Ansatz ermittelten normierte "Slip-Tendency" der Störungen um die Bohrungen. Konfidenzniveau von 50 %. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.

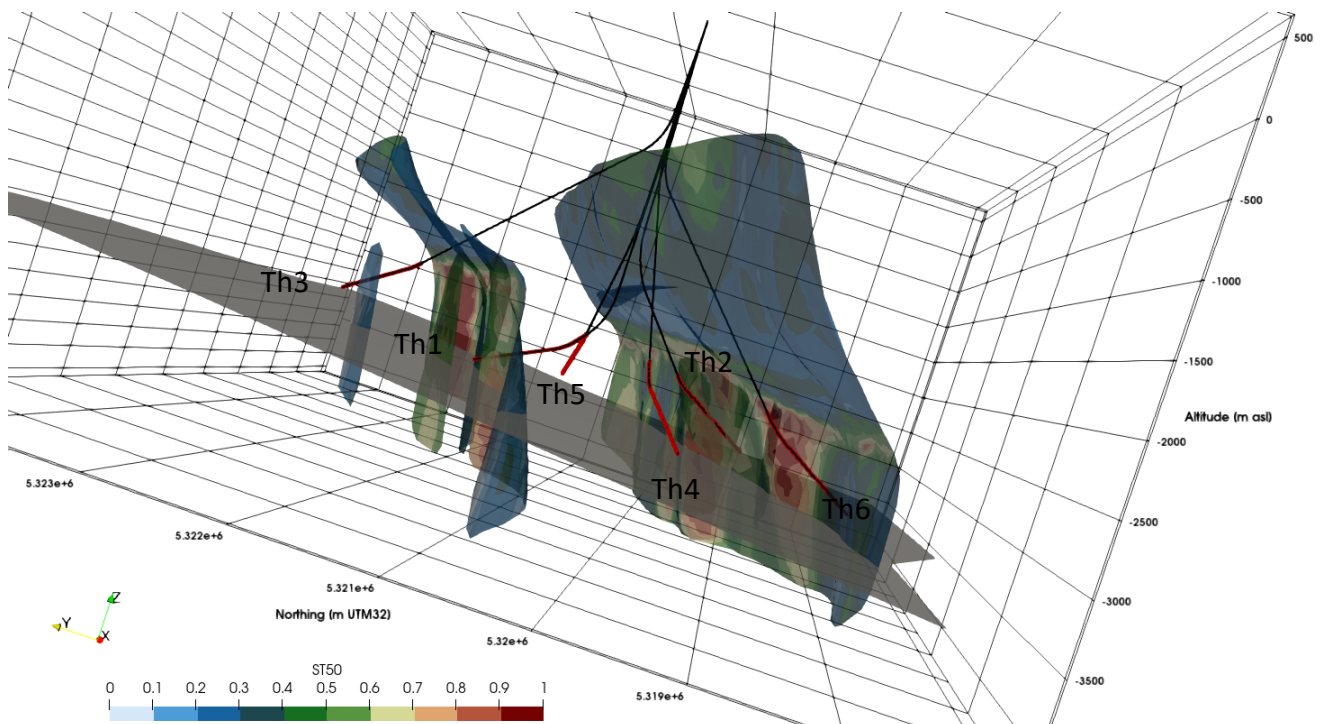


Abbildung 18: Wie Abbildung 17, jedoch aus einem anderen Blickwinkel.

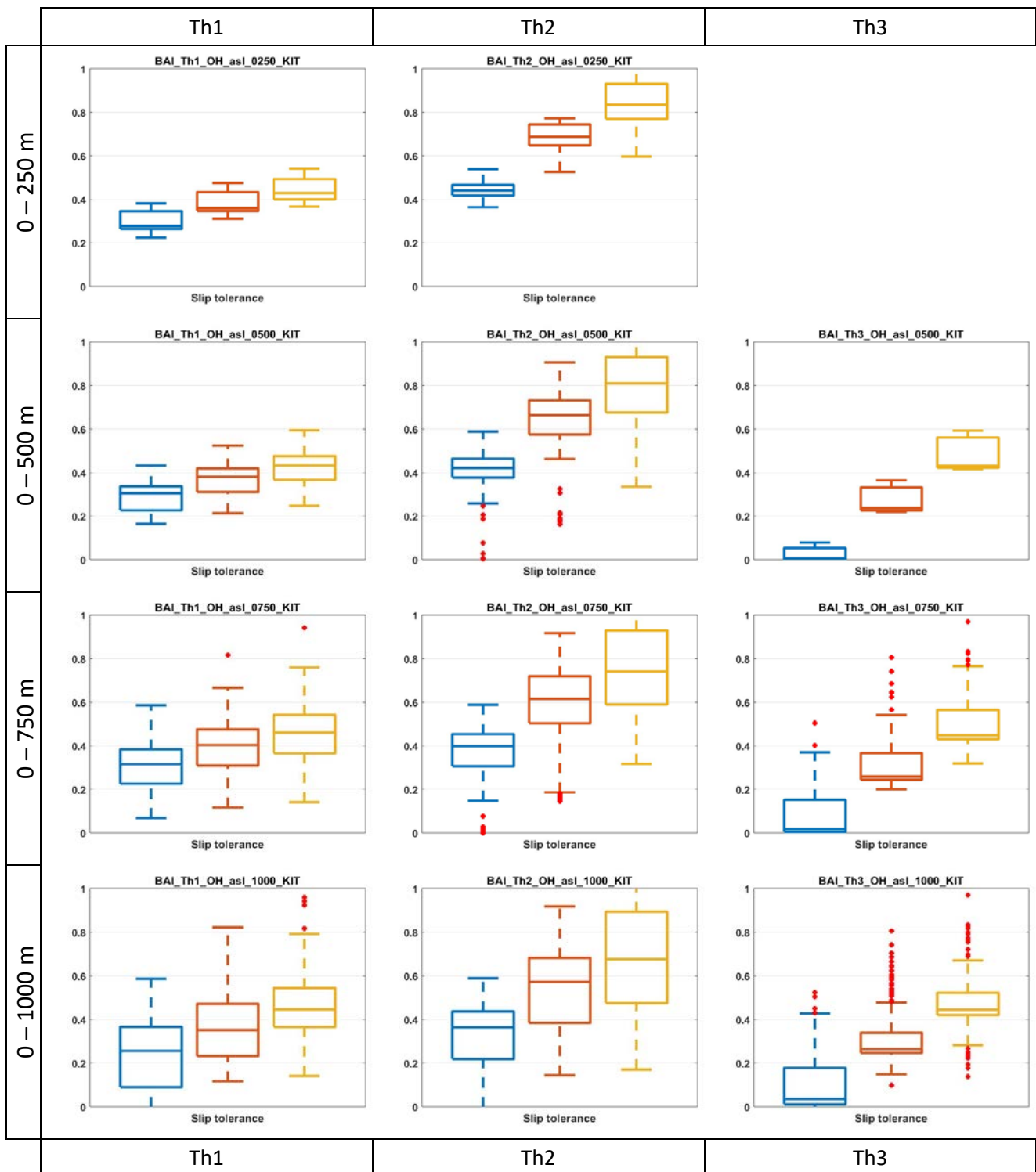


Abbildung 19: Baierbrunn. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Th1, Th2 und Th3 Borungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).

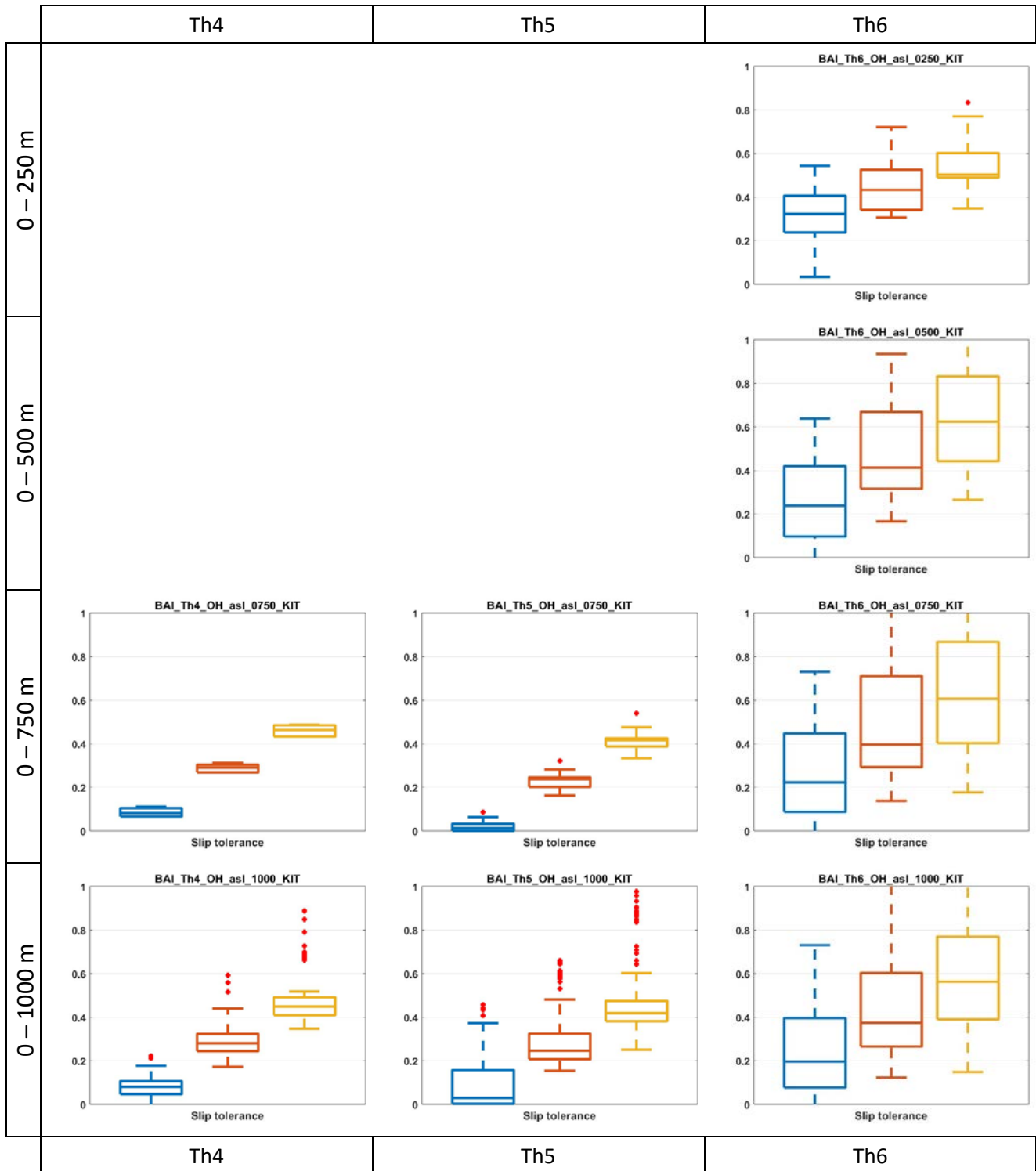
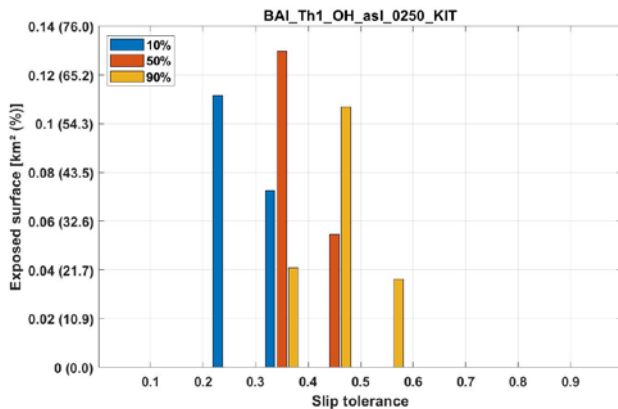
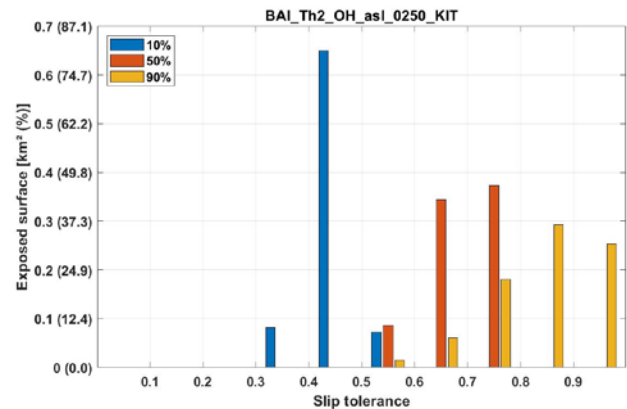


Abbildung 20: Baierbrunn. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Th4, Th5 und Th6 Borungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).

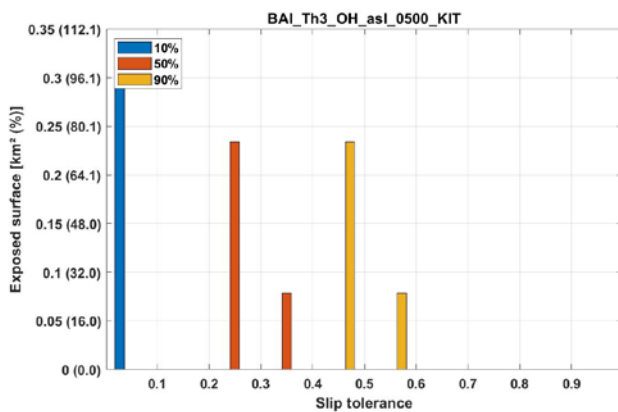
a)



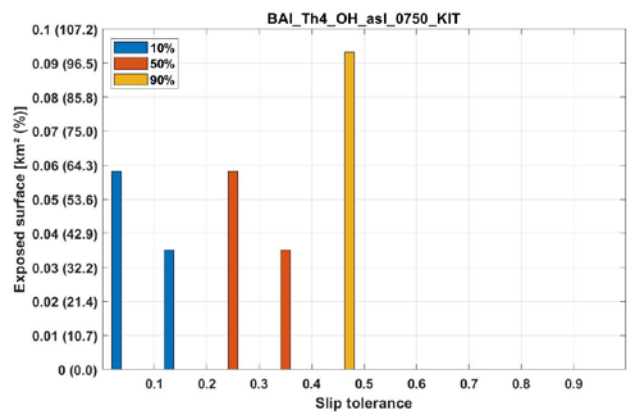
b)



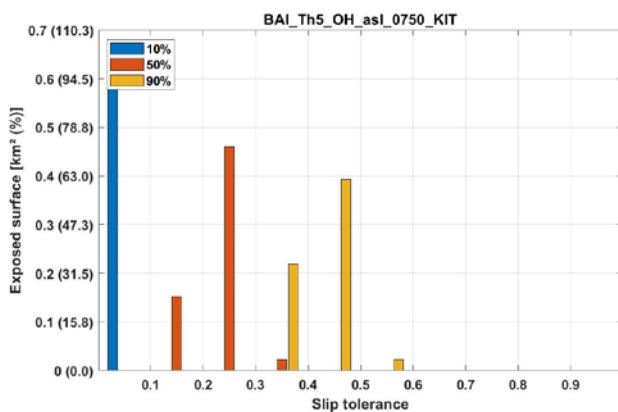
c)



d)



e)



f)

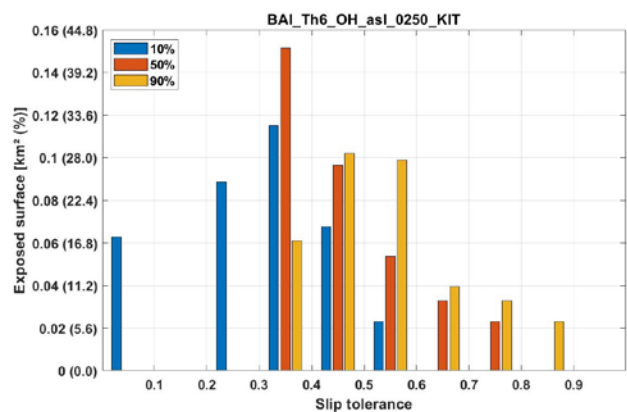


Abbildung 21: Baierbrunn. Verteilung der normierten „Slip-Tendency“ auf den gesamten Störungsflächen, die die offenen Bohrsektionen umgeben: a) Th1, Störungsfläche im Radius von 250 m; b) Th2, Störungsfläche im Radius von 250 m; c) Th3, Störungsfläche im Radius von 500 m; d) Th4, Störungsfläche im Radius von 750 m; e) Th5, Störungsfläche im Radius von 750 m und f) Th6, Störungsfläche im Radius von 250 m. Jede Farbe steht für ein Konfidenzniveau: 10% - blau, 50% - orange und 90% - gelb.

4.3.1.2 Vergleich mit den Ergebnissen des Erdwerk-Ansatzes

Abbildung 22 zeigt parallel 3D-Ansichten der ST-Werte nach dem KIT-Ansatz (links) und dem Erdwerk-Ansatz (rechts). In den Erdwerk-Ergebnissen sind nur die Werte unterhalb des Top-Lithotamnienkalk und der Top-Kristallin (d.h. fast das Malm-Reservoirs) gegeben. Für dieses Tiefenintervall fällt auf, dass die Werte räumlich und auch in der Amplitude relativ nahe beieinanderliegen, obwohl die KIT-Ergebnisse immer noch etwas größere maximale ST-Werte aufweisen. Dies wird in Abbildung 23 und Abbildung 24, durch den Vergleich der ST-Boxplot-Verteilungen zwischen KIT-Ergebnissen und Erdwerk-Ergebnissen bestätigt. Zu beachten ist, dass, da die Erdwerk-Ergebnisse für das Reservoir bereitgestellt werden, der Abstand zwischen den Störungen und Bohrungen zwischen KIT- und Erdwerk-Ergebnissen variieren kann (z. B. Th4).

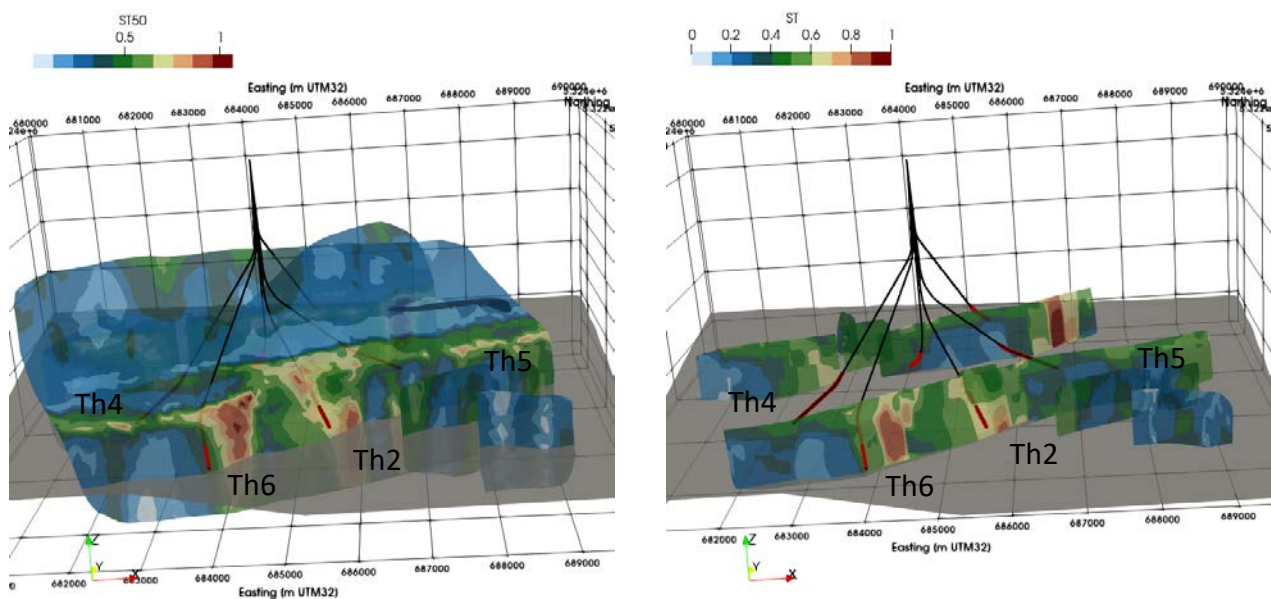


Abbildung 22: Baierbrunn. Normierte „Slip-Tendency“ der mit KIT-Ansatz (links, Konfidenzniveau 50%) und mit Erdwerk-Ansatz (rechts) erhaltenen Störungen. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.

4.3.1.3 Diskussion

Für den Standort Baierbrunn wurde zusätzlich zu den Bohrtrajektorien ein Vorschlag zur Aufteilung der Produktions- und Injektionsbohrungen gemacht. Es überrascht nicht, dass Th2 und Th6 als Förderbohrungen ausgewählt wurden, was mit relativ nahe gelegenen Störungszonen übereinstimmt, die nahezu kritisch sein könnten. Th1, das ebenfalls kurz vor einer Störung steht, wurde ebenfalls als Förderbohrungen ausgewählt. Angesichts der ST-Werte sind diese Entscheidungen sinnvoll.

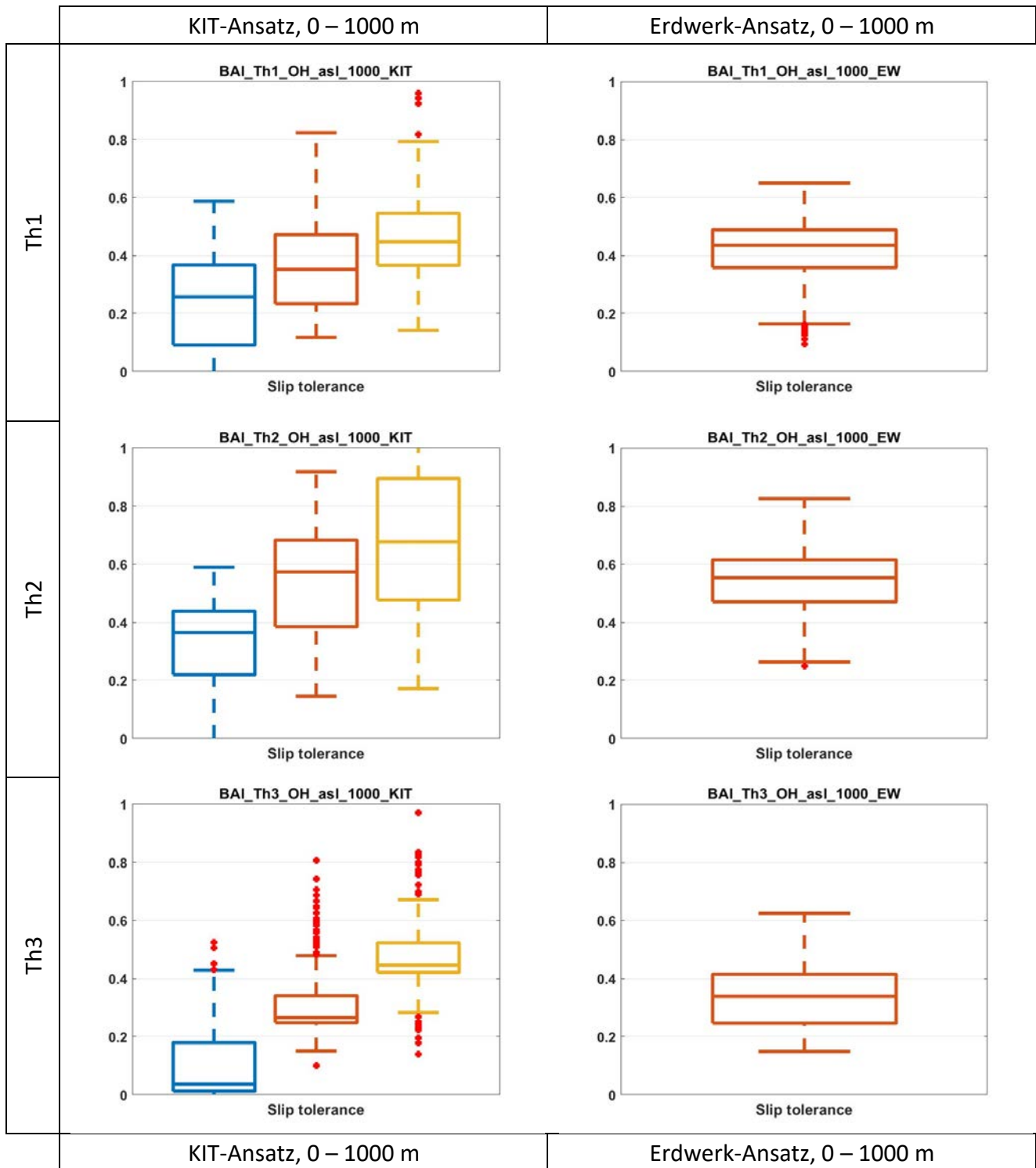


Abbildung 23: Baierbrunn. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 1000 m vor offenen Bohrsektionen der Bohrungen (Zeilen) nach dem KIT-Ansatz (linke Spalte) und nach dem Erdwerk-Ansatz (rechte Spalte). Für KIT sind die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) dargestellt.

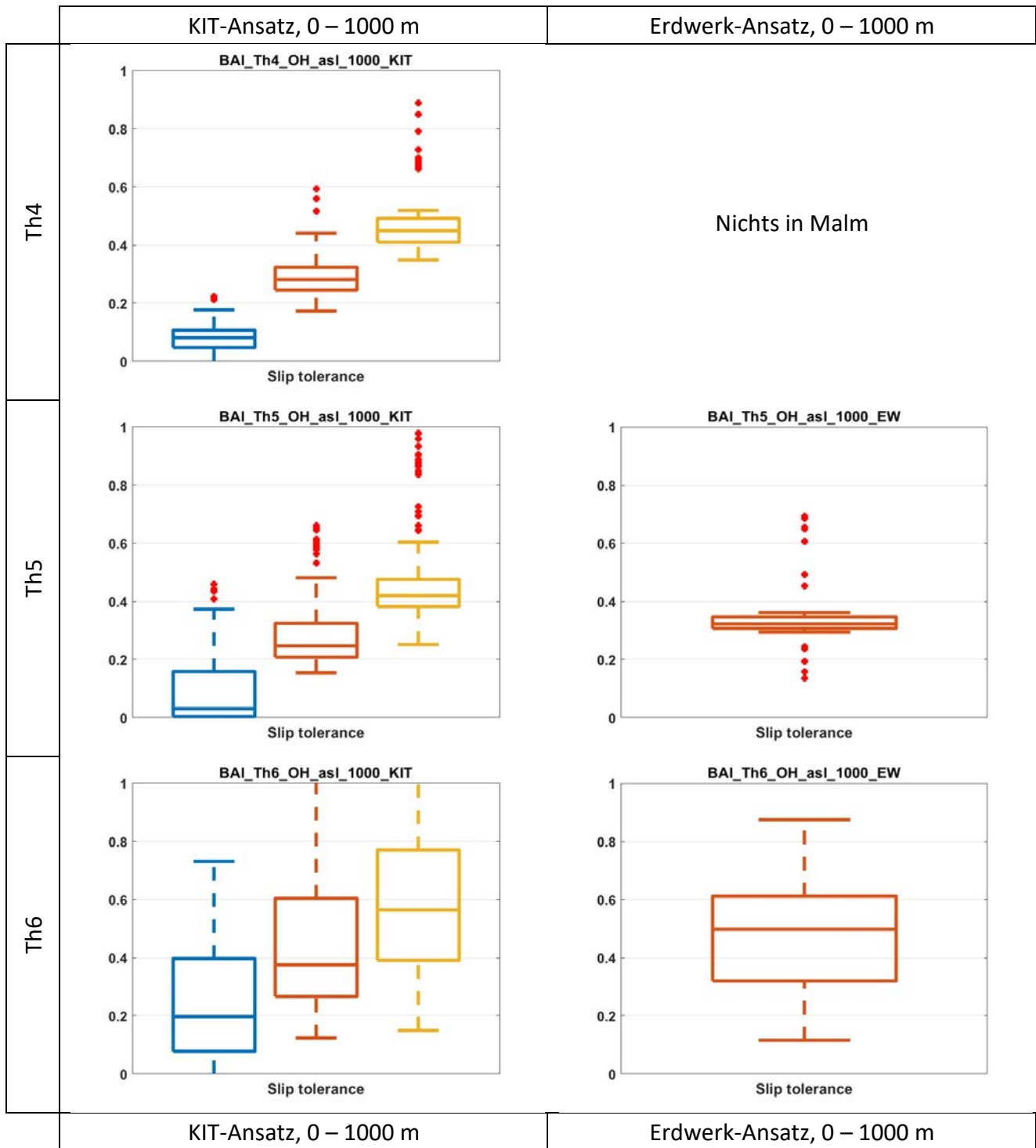


Abbildung 24: Baierbrunn. Boxplots der normierte „Slip-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 1000 m vor offenen Bohrsektionen der Bohrungen (Zeilen) nach dem KIT-Ansatz (linke Spalte) und nach dem Erdwerk-Ansatz (rechte Spalte). Für KIT sind die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb) dargestellt.

4.3.2 „DILATION-TENDENCY“: ERGEBNISSE DES KIT-ANSATZES

Wie in Abbildung 25 zu sehen, korrespondieren die Zonen mit hoher „Dilation-Tendency“ relativ gut mit den hohen normierten „Slip-Tendency“-Zonen, zumindest unterhalb des Lithotamnienkalks (in dem die Störungsebenen sich stark zu neigen beginnen).

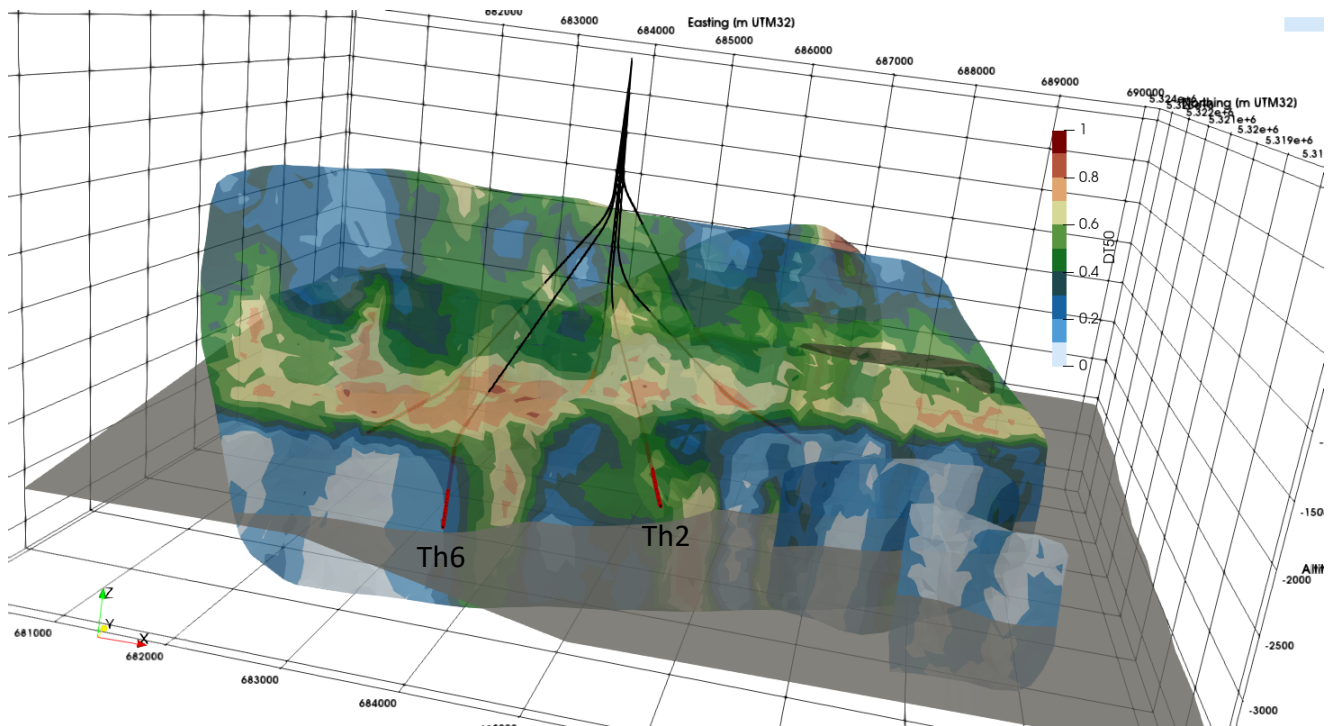


Abbildung 25: Baierbrunn. Mit KIT-Ansatz ermittelte „Dilation-Tendency“ auf 50% confidence level Konfidenzniveau (transparente Flächen). Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.

Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigen für einen gegebenen Abstand zu den Bohrungen einen Boxplot der „Dilation-Tendency“ der Störungen. Bei 75 % der Oberflächen ist DT kleiner als 0,6, unabhängig vom Konfidenzniveau und der Vertiefung, mit Ausnahme von Th6, wo es 0,7 erreicht.

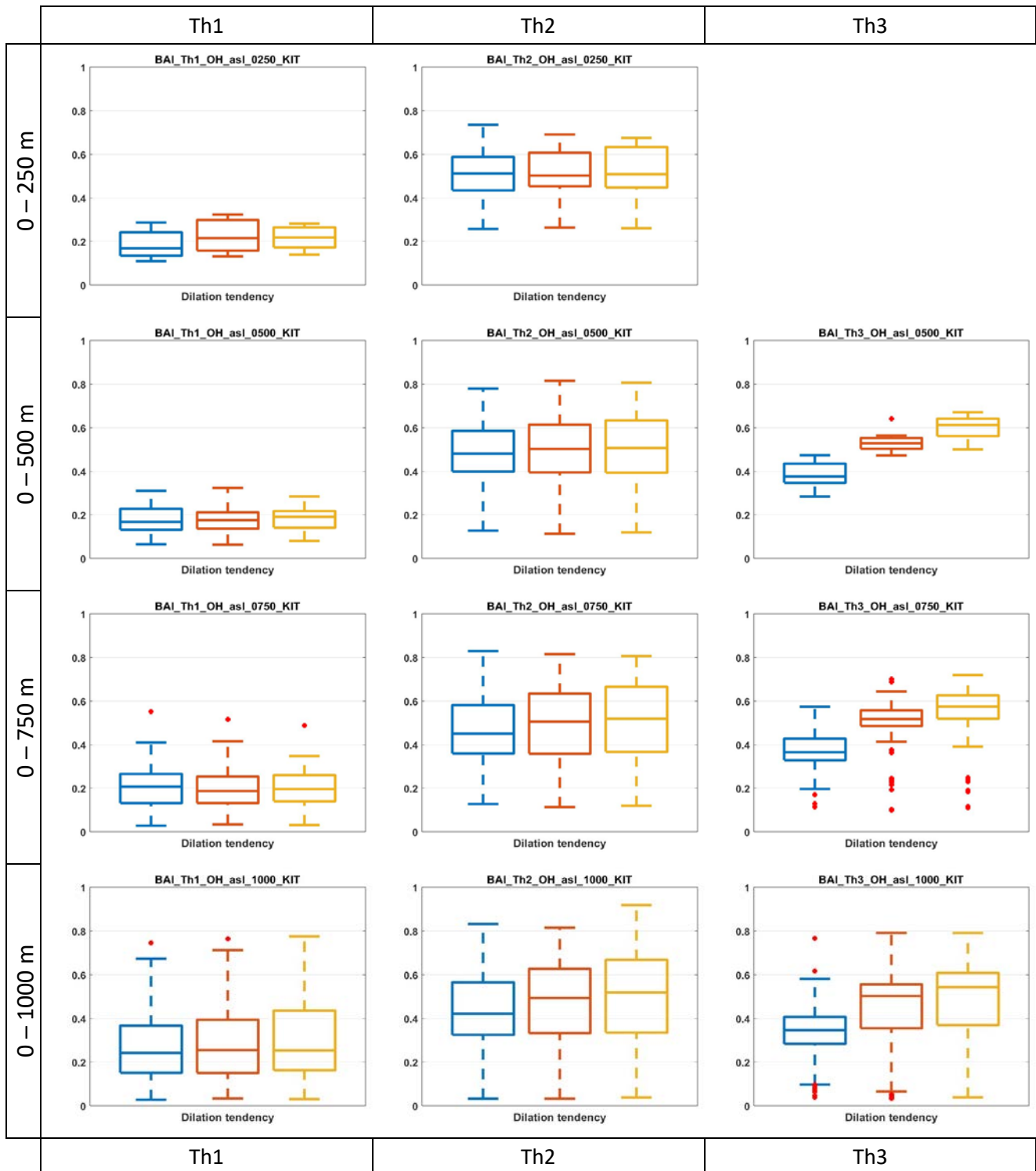


Abbildung 26: Baierbrunn. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Th1, Th2 und Th3 Borungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).

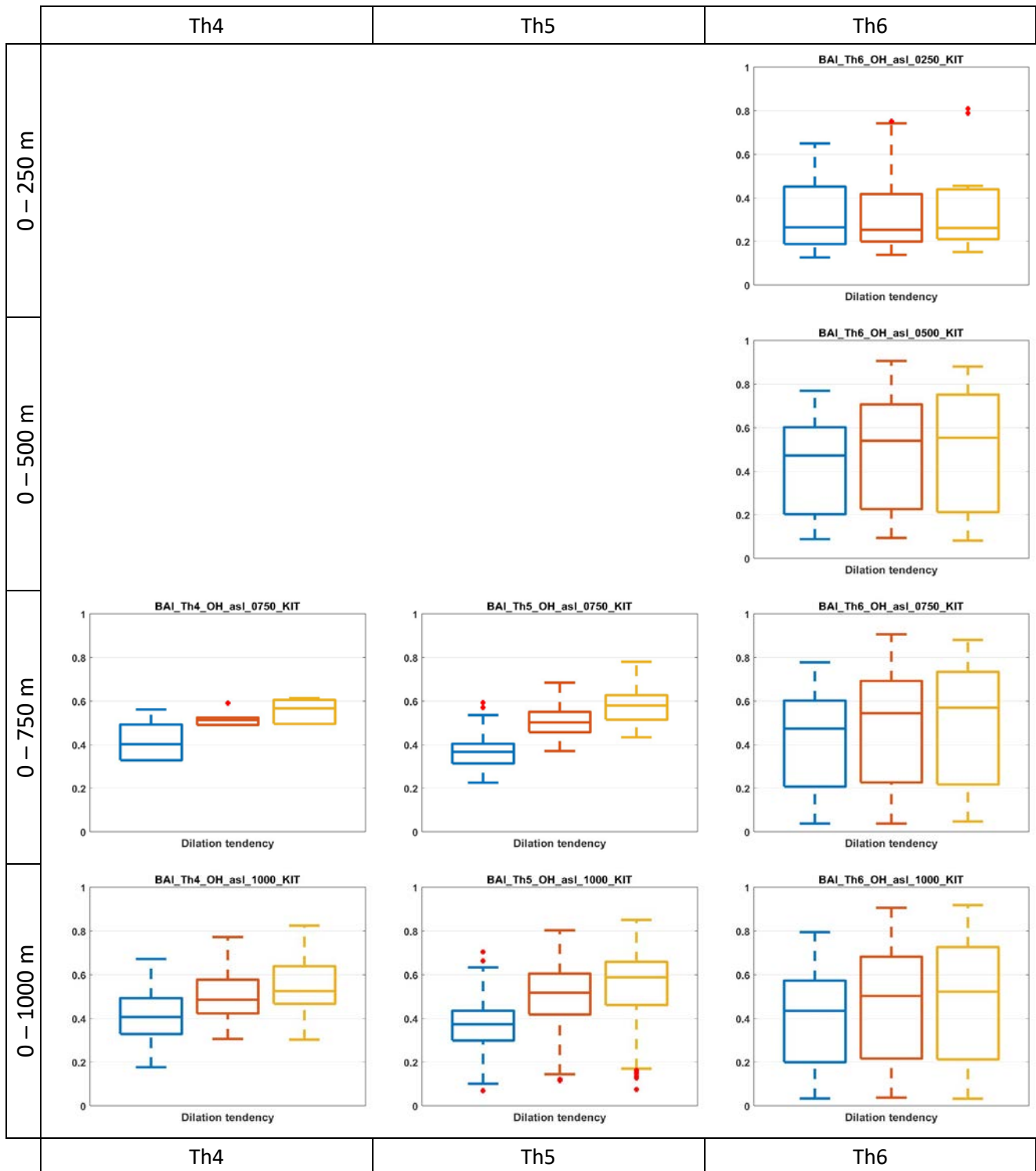


Abbildung 27: Baierbrunn. Boxplots der „Dilation-Tendency“ auf Störungsflächen innerhalb von 250 m, 500 m, 750 m und 1000 m (Zeilen) vor offenen Bohrsektionen der Th4, Th5 und Th6 Borungen (Spalten) für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb).

5 DISKUSSION UND ZUSAMMENFASSUNG

Die normierten „Slip-Tendency“-Ergebnisse aus dem Erdwerk-Ansatz und aus dem KIT-Ansatz sind hinsichtlich der räumlichen Verteilung auf den Störungen in der Nähe der Geothermiebohrungen aller untersuchten Felder konsistent. Aufgrund der unterschiedlichen Spannungsfeldannahmen sind die normierten „Slip-Tendency“-Werte im KIT-Ansatz jedoch generell größer und variieren stärker in Abhängigkeit von der Tiefe.

Die normierte „Slip-Tendency“ ist am größten in den steil einfallenden Teilen der Störungen, die unterhalb des Top Lithotamnienkalk beginnen und folglich das Malm-Reservoir und das darunter liegende Kristallin miteinschließen.

Die am kritischsten gespannten Störungszonen – ggf. kritisch nach dem KIT-Ansatz – im Umfeld der Geothermiebohrungen sind den Förderbohrungen Schäftlarnstraße und Pullach bzw. den zu geplanten Förderbohrungen Baierbrunn zuzuordnen. Es wird jedoch erwartet, dass die lokale Störung des Spannungsfeldes aufgrund der Produktion nicht zu einer Verwerfung führt, sondern sich davon entfernt.

Der hier gewählte statische geomechanische Ansatz sollte mit Vorsicht betrachtet und nur als erste Schätzung des Spannungszustands der Störungen verwendet werden. Dafür gibt es zwei Hauptgründe.

Der erste ist, dass die wirkliche lokale Spannung, die im Untergrund wirkt, definitiv unsicher ist, aber auch ungenau sein könnte. Deutlich wird hier, dass die Ansätze von Erdwerk und KIT in Bezug auf das Spannungsfeld stark voneinander abweichen: unterschiedlich in der Hauptspannungsrichtung und unterschiedlich in den Hauptspannungsamplituden. Außerdem werden in beiden Fällen Störungen im Untergrund nicht berücksichtigt, obwohl bekannt ist, dass (große) Störungen die Ausrichtung und Magnitude des Spannungsfelds beeinflussen (Barton and Zoback, 1994; Sahara et al., 2014). Darüber hinaus erfordert der Mangel an Beobachtungsdaten zur Berechnung des Spannungsfelds oft eine indirekte Schätzung. Ein Verfahren beinhaltet Annahmen zum Spannungsregime und zu den mit dem Versagenskriterium verbundenen Störungsparametern, also Kohäsion und Reibungskoeffizient. Ein solches Verfahren wurde angewendet, um das von Erdwerk verwendete Spannungsfeld bereitzustellen. Daher wird es zu einem Teufelskreis, wenn Absolutwerte der „Slip-Tendency“ untersucht werden. Beim KIT-Ansatz wurde das Spannungsfeld nach Ziegler und Heidbach (2020) tatsächlich verwendet, um „akzeptable“ Kohäsion und Reibungskoeffizient zu identifizieren und überkritisch belastete Störungsbereiche zu vermeiden (siehe Unterabschnitt 3.3.2 „KIT Annahmen“).

Der zweite Grund ist, dass während der Erzeugung des geothermischen Feldes das Spannungsfeld aufgrund von hydraulischen, aber auch thermischen Effekten zweifellos mit der Zeit variieren wird. Daher wird sich das im statischen Ansatz als konstant betrachtete Spannungsfeld im Laufe der Zeit ändern.

Um die Auswirkungen dieser beiden Haupteinschränkungen der statischen geomechanischen Modellierung zu minimieren, besteht eine Lösung darin, eine dynamische thermo-hydromechanische Modellierung durchzuführen. Der erste Schritt wäre die Konvergenz zu einem stationären statischen 3D-Spannungsfeld, das aus einem anfänglichen 3D-Spannungsfeld und der Integration der Störungen im Untergrund berechnet wird. Der zweite Schritt wäre, die Produktion und Injektion von geothermischen Fluiden an den Bohrungen zu reproduzieren oder zu simulieren und die raumzeitliche Entwicklung des Spannungsfelds zu untersuchen. Dann kann die normierte „Slip-Tendency“ realistischer sein, obwohl die Versagenskriteriumparameter immer noch geschätzt werden sollten.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- Barton, C.A., Zoback, M.D., 1994. Stress perturbations associated with active faults penetrated by boreholes: Possible evidence for near-complete stress drop and a new technique for stress magnitude measurement. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 99, 9373–9390. <https://doi.org/10.1029/93JB03359>
- Ferrill, D.A., Winterle, J., Wittmeyer, G., Sims, D.W., Colton, S., Armstrong, A., Morris, A.P., 1999. Stressed rock strains groundwater at Yucca Mountain, Nevada. *GSA Today* 9, 1–8.
- Morris, A., Ferrill, D.A., Henderson, D.B., 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology* 24, 275–278. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<textless0275:staafr>textgreater2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<textless0275:staafr>textgreater2.3.co;2)
- Sahara, D.P., Schoenball, M., Kohl, T., Müller, B.I.R., 2014. Impact of fracture networks on borehole breakout heterogeneities in crystalline rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 71, 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.07.001>
- Seithel, R., Steiner, U., Müller, B., Hecht, C., Kohl, T., 2015. Local stress anomaly in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermal Energy* 3, 77. <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0023-z>
- Ziegler, M.O., Heidbach, O., 2020. The 3D stress state from geomechanical–numerical modelling and its uncertainties: a case study in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermal Energy* 8, 65. <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00162-z>