Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung: Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung: Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

> Endbericht erstellt am 24/08/2020

Projekttitel: KrisT

Projektnummer: 865014

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	4. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/01/2018
Projektende	31/05/2020
Gesamtprojektdauer	29 Monate
(in Monaten)	
ProjektnehmerIn	Geo5 GmbH
(Institution)	
Ansprechpartner	Christoph Eichkitz
Postadresse	Roseggerstraße 17; 8700 Leoben
Telefon	03842 / 47061
Fax	
E-mail	office@geo-5.at
Website	www.geo-5.at

KrisT

Kluftparameterbestimmung mittels richtungsabhängiger seismischer Texturattribute zur Minimierung des Fündigkeitsrisikos

> AutorInnen: Christoph Eichkitz Marcellus Schreilechner Martin Krainer Sarah Schneider

Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
3	Inhaltliche Darstellung	6
-	3.1 Methode	8
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	.12
5	Ausblick und Empfehlungen	.30
6	Literaturverzeichnis	.31
7	Kontaktdaten	.34

2 Einleitung

Für eine kostengünstige Gewinnung und Nutzung von Wärme und Strom aus geothermischen Reservoiren ist eine optimale Planung der Landegebiete für Geothermiebohrungen die Voraussetzung. Für eine wirtschaftliche Betreibung von Geothermieprojekten sind die Tiefenlage (Temperatur) sowie die Beschaffenheit des Geothermie Reservoirs (Porosität und Permeabilität) von immenser Wichtigkeit. Mit Hilfe seismischer Untersuchungen (2D und 3D) ist es unter anderem möglich die generelle geologische Struktur des Untergrundes und vor allem des Geothermie Reservoirs abzubilden. Für die Beschreibung der Wasserwegigkeit (Permeabilität) ist für viele Geothermieprojekte vor allem die Identifizierung von geologischen Kluftnetzwerken entscheidend. Mit Hilfe von seismischen Attributen wie Coherence, Curvature oder Ant Track Berechnungen können Bereiche mit erhöhter Klüftigkeit detektiert und dadurch Kluftintensitätsverteilungen erstellt werden. Allerdings können damit keine direkten Informationen über das Einfallen und Streichen von Klüften getroffen werden. Im FFG Sondierungsprojekt RiSeiTex (FFG Projektnummer 848799) wurde die Anwendbarkeit von richtungsabhängigen Texturattributen basierend auf der Grey Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) zur Bestimmung von Kluftparametern verifiziert.

In gegenständlichen Forschungsprojekt stehen drei Projektziele im Vordergrund. Das erste Ziel ist die Erhöhung der Auflösung durch die Erweiterung der möglichen Raumrichtungen für GLCM Berechnungen auf 109 bzw. 193. Das zweite Ziel dieses Projektes ist die kaskadische Verwendung von seismischen Attributen. Der dritte Punkt dieses Projekts ist die softwaretechnische Optimierung des Algorithmus zur Reduzierung der Rechenzeit. Die Resultate der einzelnen Optimierungsschritte wurden jeweils an öffentlich zugängigen seismischen Daten getestet und miteinander verglichen. Dadurch konnte eine verbesserte Visualisierung von Bereichen mit erhöhter seismischer Variabilität erzielt werden, welche wiederum mit dem Vorhandensein von Klüften korrelieren können.

Das Forschungsprojekt behandelt prioritär:

Schwerpunkt 5 Umwandlungs- und Speichertechnologien

Subschwerpunkt: 5.4 Geothermie

Begründung: Kluftparameterbestimmung mittels richtungsabhängiger seismischer Texturattribute zur Minimierung des Fündigkeitsrisikos

3 Inhaltliche Darstellung

Eine kostengünstige Nutzung geothermischer Wärme oder Energie ist abhängig von Temperatur und Fließrate in den geothermischen Reservoiren. Eine ausreichende Fließrate kann fast nur in geklüfteten Reservoiren (meist Karbonate) erreicht werden. Deshalb ist es für Geothermieprojekte vor allem notwendig Kluftnetzwerke im Untergrund so detailliert wie möglich zu beschreiben und die Bohrpfadplanung an diese anzupassen. Das Streichen und Einfallen von Klüften lässt sich über vorhandene Bohrungen mit Imagelogdaten beschreiben. Für die räumliche Verteilung von Klüften abgeleitet aus oberflächengeophysikalischen können seismische Attribute. Untersuchungen (Reflexionsseismik), verwendet werden. Meist werden für die Beschreibung von Kluftintensitäten Post-Stack Daten verwendet (z.B. Blumentritt et al., 2006; Desheng et al., 2010; Elebiju et al., 2011, Guo et al., 2011; Hunt et al., 2010; Khromova et al., 2011; Mai et al., 2009; Narhari et al., 2009; Refunjol et al., 2010; Staples et al., 2010; Yenugu et al., 2010). Seismische Attribute die für die Kluftbeschreibung verwendet werden können, sind entweder sensitiv auf Diskontinuitäten in den Reflektoren (Coherence basierende Attribute) oder sie sind sensitiv auf die Krümmung von Reflektoren (Curvature basierende Attribute). Eine direkte Beschreibung von Kluftfallen und Kluftstreichen ist nur bedingt möglich. Mit diesen Attributen lassen sich nur Kluftzonen und deren Intensität abschätzen. Eine weitere Form von Eingabedaten für Attributberechnungen sind Pre-Stack Daten (z.B. Dai et al., 2011; Wang et al., 2013, 2014). Mithilfe dieser Daten ist es möglich Anisotropien in den Daten zu detektieren. Im Wesentlichen werden hier drei verschiedene Methoden zur Beschreibung von Klüften verwendet. Erstens die P-Wave Azimuthal Velocity Analysis (VVAZ) (Zheng, 2006), die P-Wave Azimuthal AVO Analysis (AVAZ) (Rüger, 1998) und die Shear Wave Splitting Analysis (SWS) (Li, 2011). Für eine verbesserte Beschreibung von Kluftnetzwerken kann eine Kombination von Pre-Stack und Post-Stack Daten verwendet werden (z.B. Chen et al., 2014; Hunt et al., 2010). Allerdings stehen nicht immer Pre-Stack Daten für die Projektbearbeitung zur Verfügung. Deshalb liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Bearbeitung von Post-Stack Daten.

Für die Beschreibung von Kluftnetzwerken in Geothermieprojekten wurden bisher meist Coherence Analysen (Wolfgramm et al., 2015), Produktionsdaten (Horne et al., 2012; Juliusson und Horne, 2010; Juliusson, 2012), Neuronale Netzwerke (Aminzadeh et al., 2010) oder Aufschlussanalogien (Jafari und Babadagli, 2011) verwendet.

Eine weitere Art von Post-Stack Daten sind seismische Texturattribute, wobei in der Seismik vor allem Attribute basierend auf der Grey Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) Verwendung finden.

Seismische Texturattribute basierend auf der Grey Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) wurden bisher hauptsächlich für die Interpretation von Paleoflüssen und Faziesbereichen verwendet (z.B. Vinther et al., 1996; Gao, 1999, 2007, 2008a, 2008b, 2009, 2011; West et al., 2002; Chopra and Alexeev, 2005, 2006a, 2006b; Yenugu et al., 2010; de Matos et al., 2011; Eichkitz et al., 2013). Das Ziel dieser Interpretationen war generell die Extraktion von sogenannten Geobodies und nicht in der Interpretation richtungsabhängiger Parameter. In einer Arbeit von Gao (2003) wird die Verwendung von GLCM Attributen zur Kluftinterpretation beschrieben. In dieser Arbeit lag der Fokus allerdings auf der Interpretation von Paleoflüssen und die Interpretation von Klüften wird nur erwähnt.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Für das Detektieren unterschiedlicher Faziesbereiche innerhalb von Paleoflüssen konnten richtungsabhängige Texturattribute bereits erfolgreich getestet werden (z.B. Eichkitz & Amtmann et al., 2014; Eichkitz & de Groot et al., 2014; Eichkitz et al., 2015). Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass generell Anisotropien mit Hilfe von Texturattributen detektiert werden kann (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Beispiel für die Berechnung von richtungsabhängigen GLCM Attributen für ein 2D Bild. Das zufällig generierte Bild (a) wird mit diskreten Nummern (b) dargestellt. Für die Berechnung der GLCM (c) werden die benachbarten Pixelpärchen gezählt und in eine 2D Matrix eingetragen. Die Zählung der Pixelpärchen eines 2D Bildes kann in horizontaler (d), vertikaler (e), entlang der beiden Diagonalen (f und g), sowie in allen Richtungen gleichzeitig erfolgen. Basierend auf der GLCM wird eine Wahrscheinlichkeitsmatrix berechnet und diese wird anschließend für die Berechnung eines GLCM basierenden Attributs verwendet. In diesem Beispiel erkennt man, dass sich das Ergebnis einzelner Attribute in Abhängigkeit der Richtung ändert (Eichkitz et al., 2013).

Im Sondierungsprojekt RiSeiTex (FFG Projektnummer 848799) wurde die prinzipielle Anwendbarkeit von GLCM basierenden Texturattributen für die Erkennung von Kluftnetzwerken erfolgreich getestet. Der für die Beschreibung von Faziesbereichen zur Verfügung stehenden Workflow (Eichkitz et al., 2015) wurde in einem ersten Projektteil, um die Beschreibung von Klüften in Geothermie Reservoiren möglich zu machen, adaptiert. Diese ersten Tests zeigten, dass es prinzipiell möglich ist mit Hilfe der GLCM Kluftintensitäten, Kluftstreichen und Klufteinfallen zu beschreiben (Eichkitz et al., 2015; 2016; Schneider et al., 2015; 2016). Vergleiche mit anderen seismischen Attributen zeigten, dass GLCM basierende Attribute das Einfallen von Klüften viel detaillierter und aussagekräftiger beschreiben als klassische seismische Attribute (Eichkitz et al., 2016)

Im Projekt KrisT stehen drei Projektziele im Vordergrund. Das erste Ziel ist die Erhöhung der Auflösung durch die Erweiterung der möglichen Raumrichtungen auf 109 bzw. 193. Das zweite Ziel dieses Forschungsantrages ist die kaskadische Verwendung von seismischen Attributen. Der dritte Punkt dieses Forschungsantrages ist softwaretechnische Optimierung des Algorithmus zur Reduzierung der Rechenzeit.

3.1 Methode

Die Grey Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) ist eine statistische Methode der Beschreibung von Textureigenschaften. Diese Methode wird hauptsächlich in der Beschreibung von Sattelitenbildern (z.B. Soh and Tsatsoulis, 1999; Franklin et al., 2001; Maillard et al., 2005; Tsai et al., 2007) und von Computer Tomographie Bildern (z.B. Kovalev et al., 2001; Zizzari et al., 2011) verwendet. Im Bereich der Seismikinterpretation werden GLCM basierende Attributberechnung im Vergleich zu klassischen Attributen wie Coherence, Curvature, Spectral Decomposition oder Inversion kaum verwendet. In den letzten 15-20 Jahren wurde jedoch die Methode der GLCM auch in der Seismikinterpretation eingesetzt. Für die Verwendung bei Seismikdaten muss die Berechnung der GLCM dreidimensional erfolgen. Die bisherigen Methoden (Vinther et al., 1996; Gao, 1999, 2003, 2007, 2008a, 2008b, 2009, 2011; West et al., 2002; Chopra and Alexeev, 2005, 2006a, 2006b; Yenugu et al., 2010; de Matos et al., 2011) verwenden die zweidimensionale Berechnung von GLCM Attributen in einem 3D Analysefenster. Eichkitz et.al (2013, 2014) verwendet einen vollen 3D Algorithmus zur Berechnung der GLCM in allen möglichen Raumrichtungen.

Die GLCM ist ein Maß wie oft verschiedene Kombinationen von Graustufen bei benachbarten Pixeln vorkommen. Für den zweidimensionalen Fall würde diese Berechnung in 4 Raumrichtungen erfolgen. Für den 3D Fall würde die Berechnung normalerweise für direkt benachbarte Pixeln erfolgen, dies wäre in 13 Raumrichtungen (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Benachbarte Pixelpärchen in einem 3D Datensatz sind in 13 Raumrichtungen angeordnet. (Eichkitz et al., 2013)

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Basierend auf der GLCM können verschiedene Attribute berechnet werden. Haralick et al. (1973) beschreiben 14 verschiedene GLCM Attribute. Mittlerweile wurden weitere GLCM basierende Attribute entwickelt (Soh & Tsatsoulis, 1999), so dass bereits 24 Attribute Berechnungen bekannt sind.

Um die Berechnung von GLCM Attributen zu verbessern, sollte die Berechnung entlang des strukturellen Dips von Daten erfolgen. Zu diesem Zweck müssen vor der eigentlichen GLCM Berechnung sogenannte Steering Cubes berechnet werden. In diesen Steering Cubes werden für jeden Datenpunkt Dip Informationen in Inline und Crossline Richtung gespeichert. Durch Integration der Steering Information in die GLCM Berechnung wird das Analysefenster verändert. D.h. das Analysefenster ist kein waagrechtes Fenster, sondern passt sich dem strukturellen Dip der Daten an (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Das Standardberechnungsfenster für die Berechnung ist ein Quader (a). In dieser Berechnung wird das strukturelle Einfallen der Reflektoren nicht berücksichtig. Um die Berechnung der GLCM Attribute zu optimieren, kann die Berechnung das strukturelle Einfallen der Reflektoren in die Berechnung mit einbeziehen. In diesem Fall wird das Analysefenster an Dip und Azimut der Reflektoren angepasst (b).

Für die Berechnung von Kluftintensitäten aus richtungsabhängigen GLCM basierenden Attributen wurde ein Workflow (siehe Abbildung 4) weiterentwickelt, der bisher zur Beschreibung von Faziesänderungen in Paläoflüssen verwendet wurde (Eichkitz et al., 2014). Zu diesem Zweck werden zuerst einzelne GLCM-basierende Attribute in 13 verschiedene Raumrichtungen berechnet. Anschließend werden diese miteinander verglichen und aus diesem Vergleich eine Abschätzung über Kluftintensität, Streichen und Fallen der Klüfte getätigt. Anisotropie beschreibt die Richtungsabhängigkeit jeder Eigenschaft. Diese seismische Anisotropien können durch räumliche Variationen der Sedimente, das Vorhandensein von Brüchen und Störungszonen und Unterschiede in den Porenfüllungen verursacht werden. Im Bereich der Geophysik bezieht sich Anisotropie meist auf die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Richtung oder vom Winkel (z.B. Crampin 1981, 1985; Lynn & Thomsen, 1990; Willis et al., 1986, Martin & Davis, 1987; Thomsen, 1986; Alkhalifah & Tsvankin, 1995).

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 4: Prinzipieller Workflow für die Berechnung von Anisotropien im Untergrund. In einem ersten Schritt werden GLCM basierende Attribute in allen Raumrichtungen gemessen. Anschließend werden für jeden Samplepunkt der Maximalwert, der Minimalwert, sowie die Richtungen in denen Maximal- und Minimalwert auftreten bestimmt. Da bei den Berechnungen sehr selten der gleiche Wert in allen Richtungen auftritt, ist es notwendig die Ergebnisse zu filtern. Zu diesem Zweck wird das Verhältnis von Maximal- zu Minimalwert bestimmt. Basierend auf diesem Verhältnis werden Samplepunkte mit einem niedrigen Verhältnis auf Isotrop gesetzt (Eichkitz et al., 2014).

Zum besseren Verständnis der Methode wird der Effekt der richtungsabhängigen Berechnung von GLCM Attributen und der Bestimmung der Anisotropie an einem synthetischen Modell gezeigt (siehe Abbildung 5). Hier sieht man, dass sich individuelle Berechnungen von GLCM Attributen kaum unterscheiden, jedoch direkte Vergleiche pro Datenpunkten trotzdem Variationen hervorrufen.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 5: Synthetisches Beispiel für die Berechnung eines GLCM-basierter Energy Attributes in verschiedenen Richtungen und Vergleich der Ergebnisse. Berechnungen in einzelne Richtungen bzw. die Kombination von mehreren Richtungen ergeben ähnliche Resultate. Durch den Vergleich der einzelnen Ergebnisse erhält man aber ein unterschiedliches Ergebnis mit Fokus auf einen Bereich in denen am meisten räumliche Variabilität der Daten vorhanden ist.

Das Forschungsprojekt KrisT wurde prinzipiell in fünf Arbeitspakete aufgeteilt, wobei Arbeitspaket 1 das Projektmanagement ist und diese Arbeitspaket den ganzen Bereich der Dissemination beinhaltet. Die Arbeitspakete 2-4 widerspiegeln die angestrebten Ziele des Forschungsprojekts. Diese sind:

- Adaptierung des bestehenden Workflows zur Erhöhung des Auflösungsvermögens. Im Sondierungsprojekt RiSeiTex konnte die Auflösung des Klufteinfallen und Kluftstreichen von 45° auf 22,5° verbessert werden. Im Vergleich zu Imagelogdaten ist diese Auflösung aber noch immer unzureichend. Das erste Projektziel ist deshalb die Erweiterung der Auflösung. Hier wurde der Algorithmus so angepasst, dass GLCM Attribute nun 109 Raumrichtungen (11,25°) bzw. in 193 Raumrichtungen (5,625°) berechnet werden können.
- Integration von anderen seismischen Attributen. Durch kaskadische Berechnungen können andere seismische Attribute als Input für die Berechnung von Kluftparametern basierend auf Texturattributen verwendet werden. Im gegebenen Forschungsprojekt wurde der Fokus dabei vor allem auf strukturelle Attribute wie Coherence gelegt. Zusätzlich wurden seismische Inputdaten mithilfe von Spectral Decomposition in Seismikdaten mit fokussierten Frequenzspektrum gewandelt und auf diesen Daten GLCM Attribute berechnet.
- Optimierung der Rechenzeit: Die Berechnungen im Sondierungsprojekt RiSeiTex erfolgten f
 ür relativ kleine 3D Seismikdaten. Heutzutage sind viele 3D Seismikdaten aber bereits
 über 1000 km² groß. Mit dem bestehenden Algorithmus sind Rechenzeiten von mehreren Tagen zu erwarten. F
 ür eine sp
 ätere Nutzung dieser Technologie ist es jedoch notwendig diese Zeit zu minimieren. In diesem Forschungsprojekt wurde deshalb versucht
 über verschiedene Ans
 ätze die Rechenzeit zu minimieren.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Ziele des Forschungsprojektes waren die Erweiterung des bestehenden Workflows zur Bestimmung der seismischen Variabilität in mehr Raumrichtungen, die kaskadische Berechnung von GLCM-basierenden Attributen und die Optimierung des Algorithmus um die Berechnungen schneller durchzuführen. Die Berechnung von GLCM Attributen in 3D erfolgt mittels folgender Gleichung:

$$M(i,j) = \sum_{x=1}^{X} \sum_{y=1}^{Y} \sum_{z=1}^{Z} \begin{cases} 1 & , G(x,y,z) = i \land G(x+dx,y+dy,z+dz) = j \\ 0 & , G(x,y,z) \neq i \lor G(x+dx,y+dy,z+dz) \neq j \end{cases}$$

In dieser Gleichung wird mit dx, dy, dz der Abstand der benachbarten Datenpunkten definiert, wobei meist ein konstanter Wert von 1 genommen wird. Dies würde direkt benachbarte Datenpunkte beschreiben, welche in 13 Raumrichtungen angeordnet sind. Durch eine Erhöhung der Werte für dx, dy und dz, erhöht sich auch die Anzahl an Raumrichtungen. Für einen konstanten Abstand von 2 erhält man 49 Raumrichtungen, für einen Abstand von 3 erhält man 109 Raumrichtungen und für einen Abstand von 4 erhält man 193 Raumrichtungen. Diese Erhöhung der Raumrichtungen geht auch mit einer Verbesserung der Auflösung einher. So kann man mit 13 Raumrichtungen seismofazielle

Änderungen mit 45° Genauigkeit beschreiben, für 49 Richtungen wären es 22,5°, für 109 Richtungen 11,25° und für 193 Richtungen 5,625° (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Effekt der verwendeten Abstände für dx, dy und dx und die daraus resultierende Anzahl möglicher Richtungen. (a) Für einen Abstand von 1 werden die direkten Nachbarn verglichen, das zu 13 möglichen Richtungen führt. (b) Bei einer Erhöhung des Abstandes auf 2 werden die direkten Nachbarn übersprungen, das 49 mögliche Richtungen ergibt. (c) Bei einem Abstand von 3 werden zwei Schichten übersprungen und es ergeben sich 109 mögliche Richtungen. (d) Derzeit ist der höchste getestete Abstand 4, wobei 3 Schichten übersprungen werden und wir 193 mögliche Richtungen berechnen können.

Prinzipiell schafft man mit dieser Vorgehensweise eine Verbesserung der lateralen Auflösung. Allerdings wird dafür auch ein größerer Abstand zwischen den Pixelpaaren benötigt. Dadurch besteht die Gefahr, dass man kleinräumige Änderungen in der seismischen Fazies übersieht. Umgekehrt können höhere Richtungszahlen auch eine Verbesserung der Visualisierung von großräumigen Strukturen bedeuten. In Abbildung 7 ist der Effekt der Berechnung der Anisotropie mit unterschiedlichen Richtungszahlen dargestellt. Eine Berechnung mit 13 Raumrichtungen visualisiert in diesem Beispiel hauptsächlich Bereiche mit kleinräumigen Änderungen. Eine Erhöhung der Richtungszahl resultiert in einem größeren Gebiet mit seismofaziellen Änderungen.



Abbildung 7: Abschätzung der lateralen seismischen Variabilität mittels GLCM basierender Energy. Wird die Berechnung in 13 Raumrichtungen durchgeführt, werden nur wenige Bereiche hervorgehoben. Eine Erweiterung der Raumrichtungen produziert auch mehr Bereiche mit erhöhter Variabilität. Dies hängt mit der Größe der abgebildeten Strukturen zusammen.

Klima- und Energiefonds des Bundes - Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Prinzipiell hat man mit dieser Methode den Vorteil, dass man dadurch unterschiedlich große Strukturen hervorheben kann. So können kleinräumige Strukturen zum Beispiel Verkarstung darstellen, während größere Strukturen Kluftbereiche entsprechen können und sehr große Strukturen zum Beispiel Fazieswechsel oder Störungszonen entsprechen. Rein durch die Berechnung der Anisotropie können allerdings noch keine Aussagen über deren Ursache getroffen werden. Dafür ist eine Korrelation mit Bohrungsinformationen notwendig.



Abbildung 8: Einfluss der Größe des Analysefensters auf die Berechnung der GLCM-basierenden Anisotropie.

Im Rahmen der Weiterentwicklung des Algorithmus für die Berechnung von mehr Raumrichtungen wurde ein Parameter für die Berechnung von GLCM-basierender Anisotropie immer wichtiger, der bisher

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

in den Berechnungen kaum betrachtet wurde. Neben der Anzahl der Graustufen hat das verwendete Analysefenster einen großen Einfluss auf die GLCM Berechnung. Das Analysefenster für 2D-Daten wird durch eine Anzahl von Spuren und eine Anzahl von vertikalen Stichproben definiert. Bei 3D-Daten muss das Analysefenster durch einen Inline-Bereich, einen Crossline-Bereich und die Anzahl der vertikalen Abtastwerte definiert werden. Gao (2007) weist darauf hin, dass typischerweise ein vertikales Analysefenster von der Größe der durchschnittlichen Wellenlänge genommen werden sollte. Für seismische Daten mit einer durchschnittlichen dominanten Frequenz von 36 Hz würde dies eine vertikale Fenstergröße von 30 ms bedeuten, das 15 Abtastwerte (Datenpunkte) bei einer Abtastrate von 2 ms ergeben. Tests mit verschiedenen Analysefenstern (siehe Abbildung 8) zeigten, dass je nach Größe des Analysefensters unterschiedliche Merkmale ausgeprägt oder unterdrückt werden. Kleine Analysefenster wie [3,3,7] können nur größere Strukturen hervorheben, nicht aber kleinere Elemente wie zum Beispiel im Westen (rote Pfeile in Abbildung 8). Wenn das vertikale Analysefenster vergrößert wird, wird auch dieses kleine Element visualisiert. Bei den Analysefenstern [3,3,13] und [3,3,15] sieht man eine Zunahme der Unschärfe und eine Reduktion der Auflösung, wobei im Umgebungsbereich eine Rauschunterdrückung stattfindet. Zusätzlich nehmen die Amplitudenwerte mit größeren vertikalen Fenstergrößen ab. Bei der Größe des horizontalen Analysefensters kann man im Allgemeinen feststellen, dass kleinere horizontale Analysefenster schärfere Bilder liefern. De Martino et al. (2003) zeigten, dass die Fenstergröße 90 Prozent der Variabilität in den Ergebnissen der Klassifikation ausmacht. Die Größe des Analysefensters muss für jeden Datensatz bzw. jede Fragestellung neu definiert werden, was ein sehr zeitaufwendiger Prozess ist. Aus diesem Grund wurde versucht eine automatisierte Bestimmung des vertikalen Analysefensters zu entwickeln. Zu diesem Zweck wird eine Semi-Variogramm Analyse durchgeführt und damit die optimale Fenstergröße bestimmt. Der Effekt der Semi-Variogramm Analyse wurde auf zwei verschiedenen Datensätzen getestet. Einerseits auf der Hector 3D Seismik, Neuseeland, und andererseits auf der Teapot Dome 3D Seismik, USA. Im ersten Beispiel wurde die Semi-Variogramme für konstante Zeit-Intervalle berechnet, nämlich 240 ms, 1000 ms, 2400 ms und 3000 ms. Darüber hinaus werden fünf verschiedene Grauwert-Transformationsmethoden verwendet, um ihre Auswirkung auf die Semi-Variogramm Analyse zu untersuchen (siehe Abbildung 9). Interessanterweise sind die Ergebnisse der Semi-Variogramm Analyse unabhängig von der Art der Graustufentransformation, werden aber stark durch das jeweilige Zeitintervall beeinflusst. Bei einem seichten Zeitintervall von 240 ms führen die fünf verschiedenen Graustufentransformationen zu einem sehr schnellen Anstieg der Semi-Varianz Werte, wobei die höchsten Werte bei einem vertikalen Analysefenster von ±3 erreicht werden. Danach beginnen die Semi-Varianz Werte wieder abzunehmen. Auf dem tiefsten Zeitintervall von 3000 ms führen die verschiedenen Transformationsmethoden zu ähnlichen Kurven, aber in diesem Fall ist der Anstieg der Semi-Varianz flacher mit einem Maximum für ein vertikales Analysefenster von ±5. Der Vergleich von Semi-Variogrammen für verschiedene Zeitebenen zeigt deutlich die Tiefen- bzw. Zeitabhängigkeiten der Semi-Variogramm Analyse. Bei seichteren Zeitintervallen - wo höhere Frequenzen dominieren - ist das optimale vertikale Analysefenster eher klein. Mit zunehmender Tiefe werden die höheren Frequenzen unterdrückt und somit schlägt die Semi-Variogramm Analyse größere vertikale Analysefenster vor. Für die Hector 3D Seismik kann eine sehr interessante Beobachtung gemacht werden. Bei einem Zeitniveau von 2400 ms erreicht das optimale Analysefenster mit ±6 ein Maximum, darunter geht das optimale Analysefenster auf ±5 zurück. Dies könnte mit den sehr hohen Amplitudenwerten auf diesem Zeitniveau zusammenhängen.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 9: Semi-Variogramm Analyse für den Hector 3D Datensatz. (a) Semi-Variogramme für verschiedene Graustufentransformationen auf einem konstanten Zeitintervall von 240 ms. (b) Semi-Variogramme für verschiedene Graustufentransformationen auf einem konstanten Zeitintervall von 3000 ms. (c) Semi-Variogramme für verschiedene Zeitintervall jeweils mit linearer Graustufentransformation.



Abbildung 10: Semi-Variogramm Analyse für den Teapot Dome Datensatz. (a) Semi-Variogramme für verschiedene Graustufentransformationen für den interpretierten Frontier Horizont. (b) Semi-Variogramme für verschiedene Graustufentransformationen für den interpretierten Tenseleep B Horizont. (c) Semi-Variogramme für verschiedene interpretierte Horizonte jeweils mit linearer Graustufentransformation.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Das zweite Beispiel stammt aus der Teapot Dome Seismik, USA, wo anstelle von konstanten Zeitebenen interpretierte Horizonte für die Semi-Variogramm Analyse verwendet werden (siehe Abbildung 10). Auch hier führt die Berechnung entlang eines einzigen interpretierten Horizonts unter Verwendung verschiedener Graustufentransformationsmethoden zu ähnlichen Semi-Variogrammen. Für den seichten Horizont "Frontier" wird ein optimales vertikales Analysefenster von ±6 bestimmt. Für die tiefere Tensleep B Formation kann das gleiche optimale vertikale Analysefenster bestimmt werden, aber die Semi-Variogramme unterscheiden sich von denen des Frontier Horizonts. Insbesondere der Vergleich verschiedener Horizonte zeigt ein glockenförmigeres Semi-Variogramm für die seichteren Horizonte, die sich dann bei tieferen Horizonten abzuflachen beginnen. Diese Beobachtungen zeigen, dass die Semi-Variogramm-Berechnung zur Bestimmung der optimalen Analysefenster mehr oder weniger unabhängig von der Grauwert-Transformationsmethode ist. Es ist jedoch sehr wichtig, die Semi-Variogramm-Analyse in mehreren Tiefenebenen durchzuführen und die spätere Attributberechnung in entsprechende Pakete aufzuteilen.

Ein weiterer Fokus dieses Forschungsprogramms war die Berechnung von GLCM basierenden Attributen aus alternativen Inputdaten. Normalerweise werden für die Berechnung der GLCM Post-Stack Amplituden Cubes als Input verwendet. In diesem Forschungsprojekt wurden nun andere Daten wie konventionelle seismische Attribute sowie die Ergebnisse einer Spectral Decomposition als Inputdaten verwendet.

In einem ersten Schritt wurden konventionelle seismische Attribute wie zum Beispiel Coherence, Curvature, RMS Amplitude, Instantaneous Phase, Instantaneous Frequency oder Sweentness berechnet und diese anschließend als Eingabedaten für den GLCM Workflow verwendet. Prinzipiell funktioniert der entwickelte Workflow auch auf diesen Daten, allerdings entspricht die Qualität der Ergebnisse nicht den vorherigen Erwartungen. Da die meisten Attribute wie zum Coherence oder Curvature (siehe Abbildung 11) bereits auf wenige Bereiche fokussieren, können GLCM Attribute basierend auf diesen Daten auch nur die gleichen Bereiche visualisieren. Die Umgebung dieser Bereiche wird dann in der GLCM Berechnung komplett negiert. Dadurch bringen die GLCM Attribute basierend auf diesen Attributen kaum neue Erkenntnisse und agieren eher kontraproduktiv.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG





Anders verhält es sich mit Attributcubes basierend auf einer Spectral Decomposition. Durch die Spectral Decomposition werden Amplitudencubes in Daten mit limitierten Frequenzspektrum geteilt. Damit ist es möglich Strukturen mit definierten Frequenzbereichen besser zu visualisieren. In diesem Forschungsprojekt wurden die einzelnen Frequenzbereiche als Input für den Anisotropieworkflow verwendet. Da diese Inputdaten sehr ähnlich wie ein klassischer Amplitudecube sind, sind die Resultate der GLCM Berechnung auch sehr ähnlich. Hier wird der komplette Bereich eines seismischen Datensatzes abgebildet und nicht wie bei den anderen Attributen bereits auf gewisse Bereiche fokussiert. In den Abbildung 12 bis Abbildung 15 sind die Ergebnisse der Berechnung der Anisotropie basierend auf limitierten Frequenzspektren für die Niveaus "Tensleep B" und "Alcova Limestone" aus dem Teapot Dome Datensatz, USA, dargestellt. Im direkten Vergleich zu den Ergebnissen mit dem kompletten Amplitudencube sieht man ein sehr ähnliches Bild. Allerdings fokussieren die einzelnen Frequenzbereiche auf unterschiedliche Strukturen. So zeigen die tieferen Frequenzen von 10 Hz eher weniger Bereiche mit erhöhter Anisotropie und mit zunehmender Frequenz werden Anisotropiewerte generell höher. Dadurch ist es möglich mit dieser Methode einzelne Strukturelemente besser zu visualisieren. Für eine genaue Beschreibung dieser einzelnen Bereiche sind aber Informationen aus Bohrungen notwendig. Vor allem für die Beschreibung von Kluftbereichen ist diese Methode eine wertvolle Unterstützung, da davon ausgegangen werden kann, dass Klüfte eher den höherfrequenten Bereichen zuzuordnen sind.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 12: Ergebnis der Berechnung der Anisotropie auf Niveau "Tensleep B" für (a) den Amplitudencube und für (b) - (g) einzelne Frequenzbereiche. Die GLCM basierende Energy wurde dafür in 13 Raumrichtungen berechnet.



Abbildung 13: Ergebnis der Berechnung der Anisotropie auf Niveau "Tensleep B" für (a) den Amplitudencube und für (b) - (g) einzelne Frequenzbereiche. Die GLCM basierende Energy wurde dafür in 49 Raumrichtungen berechnet.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 14: Ergebnis der Berechnung der Anisotropie auf Niveau "Alcova Limestone" für (a) den Amplitudencube und für (b) - (g) einzelne Frequenzbereiche. Die GLCM basierende Energy wurde dafür in 13 Raumrichtungen berechnet.



Abbildung 15: Ergebnis der Berechnung der Anisotropie auf Niveau "Alcova Limestone" für (a) den Amplitudencube und für (b) - (g) einzelne Frequenzbereiche. Die GLCM basierende Energy wurde dafür in 49 Raumrichtungen berechnet.

Jede nicht-triviale Software durchläuft Phasen der Optimierung und Modernisierung. Falls erforderlich, wird diese auch um Funktionalitäten erweitert. Aufgrund der Größe von seismischen Datensätzen hat bei diesem Projekt auch der nicht-funktionale Aspekt der Performance-Optimierung einen entscheidenden Anteil. Im Folgenden werden diese Phasen der Software- und Algorithmus-Entwicklung im Rahmen dieses Projekts näher beschrieben. Die Performance des Algorithmus ist vor allem von der Anzahl der Graustufen (siehe Abbildung 16), der Anzahl an verwendeten Richtungen, sowie von des verwendeten Analysefensters abhängig.



Abbildung 16: Die Größe der Graustufenmatrix nimmt mit dem Quadrat der Anzahl an Graustufen zu

In der ersten Version der Implementierung des Rechenalgorithmus lag das Hauptaugenmerk auf der Funktionalität und Korrektheit des Programms. In Hinblick auf Performance wurde die Programmiersprache C++ gewählt, die sich aufgrund ihrer Maschinennähe und dem daraus resultierenden Performancevorteil gegenüber vielen anderen Programmiersprachen als besonders geeignet für zeitkritische Anwendungen anbot (Aruoba, Fernández-Villaverde, 2014).

Ursprünglich wurden nur 13 Raumrichtungen berücksichtigt. Dies ermöglichte es, für eine erste Implementierung einen prozeduralen Ansatz zu verfolgen. Für jeden Referenzpunkt wurden für jede Raumrichtung die entsprechenden seismischen Amplitudenwerte innerhalb eines Sub-Cubes ermittelt und daraus in weiterer Folge die Graustufenwert-Paare errechnet. Strukturen, die diese Graustufenwerte sowie deren Co-Occurrence beinhalteten, wurden in einer einfach verketteten Liste gespeichert. Anschließend diente diese Liste zur Berechnung des jeweiligen Attribut-Wertes für diesen Referenzpunkt. Die Berechnung aller Attributwerte für jeden Referenzpunkt des seismischen Input-Cubes stellt schließlich den Output-Cube dar.

In Hinblick auf die geplante Erweiterung des Algorithmus auf 49 und in weiterer Folge auf 109 und 193 Raumrichtungen, war schnell klar, dass der gewählte Ansatz der ersten Version nicht weiterverfolgt werden kann. Eine erste Problem-Analyse erbrachte, unter anderem, folgende Ergebnisse:

- Schlechte Erweiterbarkeit
 - Bei nur 13 Raumrichtungen ist die prozedurale Herangehensweise durchaus noch akzeptabel. Jedoch ist dies schon bei einer ersten Erweiterung des Algorithmus auf 49 Raumrichtungen nicht mehr praktikabel und erfordert einen modularen Aufbau des Programms.
- Code-Duplikate

- Der Code zur Berechnung der Graustufenwerte sowie die Aktualisierung der einfach verketteten Liste ist bei allen Raumrichtungen ident. Die dadurch entstehenden Code-Duplikate können eliminiert werden.
- C++ Version
 - Mit der einfach verketteten Liste auf Basis von dynamisch erzeugten Zeigern wird ein C++ Programmierstil angewendet, der in modernen Versionen eines C++ Programms vermieden werden sollte (Meyers, 2014).
- Mehrfachzugriff auf seismische Amplitudenwerte
 - Für jede Raumrichtung werden seismische Amplitudenwerte ermittelt, die auch für die Berechnung bei anderen Raumrichtungen benötigt werden. Diese Werte befinden sich für einen bestimmten Referenzpunkt in einem definierten Bereich des seismischen Würfels. Da jeder Zugriff auch Rechenzeit benötigt ist es naheliegend, diesen zeitkritischen Bereich des Algorithmus zu optimieren. Dies führt zur Matrix-Optimierung, die im nächsten Abschnitt erläutert wird.

Jeder Berechnungsdurchlauf zur Ermittlung eines Attributwertes für einen Referenzpunkt benötigt eine bestimmte Menge an seismischen Amplitudenwerten aus einem Sub-Cube, dessen Größe entsprechend der Voreinstellungen variieren kann. Diese Einstellungen beziehen sich auf die Größe des gewählten Inline/Crossline-Fensters sowie auf das vertikale (Zeit/Tiefe) Fenster. Bei einem 3x3x11 Sub-Cube entspricht dies 99 Werten, ein 9x9x11 Sub-Cube beinhaltet bereits 891 Werte. Die seismischen Amplitudenwerte werden über eine Funktion ermittelt, und benötigen dementsprechend Rechenzeit.

Da der Algorithmus bei jeder untersuchten Raumrichtung auf diese Werte zurückgreift ist es naheliegend, diesen Sub-Cube in Form einer effizienten 3D-Matrix zur Verfügung zu stellen, deren Werte nur einmalig mit einer Funktion ermittelt werden müssen, um so in weiterer Folge durch schnellen Speicherzugriff die Berechnungszeit zu reduzieren.

Zur Umsetzung stehen in C++ mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, unter anderem:

- Einfach verkettete Liste, Zugriff auf die Daten mittels Pointer-Arithmetik
 - Eine einfach verkettete Liste wird bereits in der ersten Version für die Graustufenwerte/Co-Occurrence-Struktur eingesetzt und zeichnet sich durch einen schnellen Speicherzugriff aus. Diese Methode weist jedoch eine hohe Fehleranfälligkeit auf, da einerseits die Länge der Liste zur Laufzeit nicht bekannt ist, und man andererseits auch auf nicht definierte Speicherbereiche zugreifen kann, was zu unerwarteten Ergebnissen bis hin zum Programmabsturz führen kann.
- Statisches (multidimensionales) Array, Zugriff auf Daten mittels Index-Operator
 - Ein statisches, multidimensionales Array ist ein Feld mit bestimmter Größe und beliebig vielen Dimensionen. Der Datenzugriff erfolgt via Index-Operator. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, den 3-dimensionalen Sub-Cube im Code am direktesten abzubilden. Dies geht jedoch auf Kosten der Flexibilität, da das Array eine fixe Größe hat und diese auch mit konstanten Ausdrücken definiert werden muss. Da die Größe des Sub-Cubes aber erst zur Laufzeit des Programms bekannt ist, erweist sich dieser Ansatz als nicht praktikabel.
- Container-Klasse der C++Standardbibliothek

 Die C++ Standardbibliothek stellt mehrere Container-Klassen zur Verfügung. Diese können in sequentielle und assoziative Container kategorisiert werden. Sequentielle Container ermöglichen Zugriff auf (halb-offene) Sequenzen von Elementen, assoziative Container bieten assoziative Suche basierend auf einem Schlüssel (Stroustrup, 2013).

Da eine Suche basierend auf Schlüsseln für die Matrix-Optimierung nicht erforderlich ist, wird im Folgenden nur auf sequentielle Container der C++ Standardbibliothek näher eingegangen:

- Vector
 - Eine zusammenhängend zugewiesene Folge von Elementen eines bestimmten Typs.
- List
 - Eine doppelt verkettete Liste von Elementen eines Typs. Diese Option bietet sich an, wenn man Einfüge- oder Löschoperationen benötigt ohne vorhandene Elemente zu verschieben.
- Forward-list
 - Eine einfach verkettete Liste von Elementen eines Typs. Ideal f
 ür leere und sehr kurze Sequenzen.
- Deque
 - Eine doppelt-endende Reihe von Elementen eines Typs. Dies ist eine Mischung aus vector und list, allerdings für die meisten Anwendungsfälle auch langsamer.
- Array
 - Ein Feld mit fixer Größe einer bestimmten Anzahl von Elementen eines bestimmten Typs.
 Dem statischen Array sehr ähnlich.

Anhand der unterschiedlichen Eigenschaften der Container sowie den Anforderungen an den Algorithmus bieten sich im Speziellen Vector und Array an. Vector ist ein dynamisches Array und ist somit in der Lage, die Anzahl der Elemente dynamisch anzupassen. Allen Containern ist gemeinsam, dass für sie jeweils zugehörige Iterator-Klassen definiert sind. Iteratoren erlauben einen zeigerähnlichen Zugriff zu den Elementen eines Containers. Zusätzlich gibt es vordefinierte Algorithmen, die auf den Vektor angewandt werden können, wie z.B. Suchen, Ersetzen oder Einfügen. All diese Algorithmen sind bereits ausgiebig getestet und wohldefiniert sowie Teil des ISO Standards selbst. Genau genommen ist Array der ideale Kandidat, da der Sub-Cube zur Laufzeit eine bestimmte Größe aufweist und somit eine dynamische Vergrößerung des Containers eigentlich nicht notwendig ist. Dennoch wurde Vector aus folgenden Gründen als Container für die Matrix-Optimierung gewählt:

- "Der Standardbibliotheksvektor ist sehr flexibel und effizient. Verwenden Sie es als Ihren Standardcontainer." (Stroustrup, 2018)
- Mögliche Effizienzvorteile des Arrays gegenüber Vector werden durch Speicherreservierung bei der Definition praktisch eliminiert.
- Eine mögliche spätere Funktionserweiterung des Algorithmus, die eine Größenanpassung des Containers zur Laufzeit bedingt, ist durch die Flexibilität des Vector gewährleistet.

Aufgrund der Struktur eines Vector, es handelt sich um einen sequentiellen Container, müssen die Daten des Sub-Cube in einer definierten Reihenfolge eingelesen werden. Somit wird der 3D-Sub-Cube Seite 23 von 34 eindimensional dargestellt. Eine Hilfsfunktion ermittelt über die Position des Inline/Crossline-Fensters sowie dem Sample des Zeit/Tiefen-Fensters den korrekten Wert der Matrix.

Durch diese Effizienzsteigerung bezüglich des Zugriffs auf seismische Amplitudenwerte konnte eine deutliche Rechenzeitverkürzung erzielt werden (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: Rechenzeiten für einen typischen Datensatz mit einer klassischen 2D-Matrix und mit dem ersten Ansatz einer Linked-List in Abhängigkeit der Anzahl an Graustufen.

Die Erweiterung der Raumrichtungen auf 109 bzw. 193 Raumrichtungen erbrachte interessante Ergebnisse insbesondere im Bereich zur Analyse von Störungssystemen oder faziellen Änderungen. Die dazu notwendigen größeren Analysefenster von 7x7 bzw. 9x9 bedingen jedoch auch höhere Rechenzeiten, die durch die bereits optimierten Matrixoperationen kaum noch verringert werden können. Aus diesem Grund wurde zur Verkürzung der Rechenzeit ein neuer Ansatz verfolgt, die sogenannte fokussierte Variante. Diese ist auch für 49 Raumrichtungen anwendbar und bringt im Verhältnis zum nicht-fokussierten Algorithmus umso mehr Rechenzeiteinsparung, je mehr Raumrichtungen man berücksichtigt.

Der nicht-fokussierte Algorithmus durchläuft für jede Raumrichtung die zuvor erstellte Matrix mit den seismischen Werten eines Sub-Cubes, um die Grauwertematrix zu ermitteln. Mit dieser wird dann das entsprechende Attribut berechnet. Dies bedeutet speziell für 109 oder 193 Raumrichtungen deutlich mehr Rechenschritte und somit auch deutlich mehr Rechenzeit.

Die fokussierte Variante des Algorithmus nützt den Umstand, dass eine berechnete Raumrichtung mit einer Auflösung von 45° (13 Raumrichtungen) mit hoher Wahrscheinlichkeit jenen Bereich abdeckt, den eine Berechnung mit höherer Auflösung (22,5°, 11,25° und 5,625°) ergibt. Aus diesem Grund wird beim fokussierten Algorithmus zuerst die Raumrichtung mit der geringsten Auflösung berechnet. Basierend auf diesem Wert werden in weiterer Folge nur noch die Raumrichtungen mit höherer Auflösung untersucht, die der Ursprungsrichtung am nächsten liegen (jeweils bis zu 9) und somit schrittweise die Auflösung erhöht (siehe Abbildung 18).

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 18: Mögliche Richtungen für die Berechnung der GLCM basierenden Attribute mit einem Sampleabstand von (a) 1, (b) 2, (c) 3 und (d) 4. Durch eine Vordefinition von bestimmten Richtungen kann die Anzahl an zu berechnenden Richtungen und damit auch die Rechenzeit wesentliche reduziert werden. Für einen Abstand von (f) 2 halbiert sich die Anzahl an Richtungen. Für einen Abstand von (e) 3 ergeben sich ca. ein Drittel der Richtungen und für einen Abstand von (h) 4 ergeben sich ca. ein Fünftel der Richtungen Methode.

Im Folgenden wird an einem Beispiel Workflow die Berechnung des fokussierten Algorithmus anhand von 109 Raumrichtungen dargestellt:

- 1. Ermittlung der Raumrichtung für 13 Raumrichtungen
 - a. Ergebnis z.B.: Azimut 45, Dip 0
- 2. Basierend auf diesem Ergebnis wird die Raumrichtung für 49 Raumrichtungen ermittelt, allerdings nur unter Berücksichtigung folgender Richtungen
 - a. Azimut: 22,5 / Dip: 0
 - b. Azimut: 22,5 / Dip: 22,5
 - c. Azimut: 22,5 / Dip: 157,5
 - d. Azimut: 45 / Dip: 0
 - e. Azimut: 45 / Dip: 22,5
 - f. Azimut: 45 / Dip: 157,5
 - g. Azimut: 67,5 / Dip: 0
 - h. Azimut: 67,5 / Dip: 22,5

Klima- und Energiefonds des Bundes - Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- i. Azimut: 67,5 / Dip: 157,5
- j. Ergebnis z.B.: Azimut: 45 / Dip: 22,5
- 3. Basierend auf diesem Ergebnis wird die Raumrichtung für 109 Raumrichtungen ermittelt, nun ausschließlich für diese Richtungen:
 - a. Azimut: 30 / Dip: 15
 - b. Azimut: 30 / Dip: 30
 - c. Azimut: 45 / Dip: 15
 - d. Azimut: 45 / Dip: 30
 - e. Azimut: 60 / Dip: 15
 - f. Azimut: 60 / Dip: 30

Ergebnis für 109 Raumrichtungen ergibt einen Wert zwischen Azimut: 30 / Dip: 15 und Azimut: 60 / Dip: 30.

Aus diesen Berechnungen kann man auch die maximalen Abweichungen von Azimut und Dip für 49, 109 und 193 Raumrichtungen ausgehend von der ermittelten Raumrichtung basierend auf 13 Raumrichtungen ermitteln:

- 49 Raumrichtungen: Maximal 22,5°
- 109 Raumrichtungen: Maximal 30°
- 193 Raumrichtungen: Maximal 33,75°

Diese Methode erbringt deutliche Rechenzeiteinsparungen, die umso mehr ins Gewicht fallen, je höher die Auflösung ist (siehe Abbildung 19).





Grundsätzlich kann für den entwickelten Algorithmus nahezu jede Programmiersprache zur Umsetzung angewandt werden. Die verwendete Programmiersprache C++ bietet sich aufgrund ihrer Maschinennähe

und dem daraus resultierenden Performancevorteil gegenüber vielen anderen Programmiersprachen als besonders geeignet für zeitkritische Anwendungen an.

So wie die meisten Programmiersprachen unterliegt auch C++ Veränderungen, die zumeist der Modernisierung sowie Stabilität als auch der Performanz dienen. Eine der größten Veränderungen der seit 1985 existierenden Programmiersprache erfolgte mit der Version C++11, die viele neue Features über die Standardbibliothek einführte, die Typsicherheit erhöhte und mit dem "Zero-Overhead" Prinzip auch die Performance steigerte. Ein grundlegendes Performance-Problem, das noch bei der Vorgängerversion C++03 bestand, waren kostspielige und nicht benötigte sogenannte "tiefe Kopien", die implizit auftreten können, wenn Objekte als Wert übergeben werden.

Ein weiterer, nicht minder wichtiger Faktor für jedes Programm stellt dessen Wartbarkeit dar. In der ersten Version des Rechenalgorithmus kam durchwegs noch Pointer-Arithmetik zum Einsatz. Während der Einsatz von Zeigern nach wie vor äußerst effiziente Speicherzugriffe erlaubt, ist von deren Verwendung in modernen Versionen von C++ aus mehreren Gründen abzusehen:

- Die Gefahr von Speicherlecks steigt, da jeder Zeiger, der mit dem Schlüsselwort "new" erstellt wurde auch explizit wieder freigegeben werden muss.
- Die Effizienz des Prozessor-Caches leidet darunter, wenn eine Datenstruktur auf viele Speicherblöcke verweist, die im Adressraum weit auseinanderliegen.
- Zeiger können ungültige Speicherstellen referenzieren, die zu falschen Ergebnissen bis hin zu Programmabstürzen führen können.

Unter der Leitung des Erfinders der Programmiersprache C++, Bjarne Stroustrup, sowie Herb Sutter, Vorsitzender der C++ ISO-Arbeitsgruppe, wurde die Initiative "C++ Core Guidelines" ins Leben gerufen. Das Hauptziel der Guidelines ist die Erstellung von Regeln und "Best Practices", um typ- und ressourcensicheres C++ effizient und konsistent zu schreiben. Die Kernrichtlinien wurden in der Eröffnungsrede auf der CPPCon 2015 bekannt gegeben.

Der letzte Optimierungsschritt in Hinblick auf die Programmierung stellte die Umsetzung dieser Regeln auf das Programm dar und umfasste dabei unter anderem folgende Punkte:

- "Smart pointer" statt "raw pointer", um Speicherlecks zu vermeiden.
- C++ Standard-Vektoren anstelle von verketteten Zeigern mit unbestimmter Länge.
- "noexcept"-Spezifikation für Funktionen, um Compiler-Optimierungen zu ermöglichen.
- Nutzung der C++ Standardbibliothek. Diese Algorithmen sind bereits ausgiebig getestet und wohldefiniert sowie Teil des ISO Standards selbst.
- "constexpr" für Werte und Funktionsrückgaben, die zur Kompilierzeit evaluiert werden können.
- Standardmäßig alle Funktionen, Parameter und Objekte als "const" deklarieren. Dies verhindert sogenannte "race conditions".
- Code auf niedriger Ebene ist nicht notwendigerweise schneller als Code auf hoher Ebene. Der Grund dafür ist, dass Low-Level-Code manchmal Optimierungen des Compilers verhindert.
- Einfacher Code optimiert oft besser als handgefertigter, komplexer Code.
- Minimierung der Anzahl der Zuweisungen und Speicherfreigaben.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In Abbildung 20 bis Abbildung 23 werden die Ergebnisse der Berechnung verschiedener GLCM Attribute in allen Raumrichtungen bzw. in den fokussierten Raumrichtungen für den Tensleep B Horizon nebeneinander dargestellt. Ziel dieses Vergleichs ist es zu untersuchen, ob der optimierte Workflow ähnliche Ergebnisse erzielt oder nicht. Generell kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse basierend auf unterschiedlichen Workflows weitgehend ähnlich sind. Eine höhere Anzahl an Richtungen führt oft zu Bildern mit einem allgemein höheren Anisotropiefaktor, andererseits wirken diese Ergebnisse auch oft geglättet. Mit der Methode der fokussierten Richtungen ist es zunächst einmal möglich die Berechnungszeit stark zu reduzieren. Außerdem führt dieser neue fokussierte Workflow in den meisten Fällen auch zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie der Standard-Workflow und darüber hinaus erhöht er in oft sogar die Auflösung des Ausgabebildes.



Abbildung 20: Berechnung der GLCM basierenden Dissimilarity auf Niveau Tensleep B mittels klassischer Berechnung und mittels fokussierter Methode.

Energieforschungsprogramm - 4. Ausschreibung Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 21: Berechnung der GLCM basierenden Energy auf Niveau Tensleep B mittels klassischer Berechnung und mittels fokussierter Methode.



Abbildung 22: Berechnung der GLCM basierenden Homogeneity auf Niveau Tensleep B mittels klassischer Berechnung und mittels fokussierter Methode.

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 23: Berechnung des GLCM basierenden Contrast auf Niveau Tensleep B mittels klassischer Berechnung und mittels fokussierter Methode.

5 Ausblick und Empfehlungen

Im gegenständlichen Forschungsprojekt konnte die Berechnung der GLCM Attribute in mehr als 49 Raumrichtungen erfolgreich umgesetzt werden. Durch die höhere Anzahl an Raumrichtungen ist es einerseits möglich die laterale Auflösung zu erhöhen und andererseits können unterschiedliche große Strukturen damit schäfer visualisiert werden. Eine weitere Erhöhung der Raumrichtungen ist mit den momentan verwendeten Methoden eher wenig zielführend, da die Abstände zwischen den Samplepunkten mit größerer Richtungszahl auch größer werden. Hier wäre es vielleicht in Zukunft möglich mittels 5D Interpolation den Inline- und Crosslineabstand in einem 3D Seismikdatensatz zu verringern und damit die Auflösung zu erhöhen.

Die kaskadische Berechnung von GLCM basierenden Attributen ist nur bedingt einsetzbar. Eine Berechnung von GLCM Attributen basierend auf anderen seismischen Attributen lieferten keine Verbesserung für die Visualisierung von Klüften. Diese Berechnungen limitierten die Aussagekräftigkeit der Anisotropieabschätzung eher, weshalb dieser Ansatz der Berechnung in Zukunft eher wenig Verwendung finden wird. Die Berechnung von kaskadischen Attributen mittels Spectral Decomposition lieferte dagegen gute Resultate. Mit Hilfe dieser Methode können unterschiedlich große Strukturen perfekt visualisiert werden. Allerdings ist hier für die genaue Identifikation der Strukturen ein Abgleich mit geophysikalischen Bohrlochmessungen notwendig. Im Zusammenhang mit Spectral Decomposition könnte für zukünftige Forschungen vor allem die Verwendung einer "Spektralen GLCM" von Interesse sein. Hierbei könnten ähnlich einer "Spectral Coherence" nur die Realanteile der seismischen Spuren genommen werden und die GLCM Berechnung auf diese durchgeführt werden. Wichtig wäre, vor der Berechnung der Attribute, eine Addition der einzelnen spektralen Elemente in einer Graustufenmatrix. Dadurch könnten strukturelle Elemente schärfer visualisiert werden. Der Nachteil dieser Methode wäre allerdings wiederum ein Anstieg der Rechenzeit.

Die Berechnung der Anisotropie mittels GLCM Attribute ist generell ein rechenzeitintensiver Prozess. Durch die Optimierung der einzelnen Codeteile ist es möglich die Rechenzeit in einem vernünftigen Ausmaß zu reduzieren. Bei den höheren Raumrichtungszahlen hat sich vor allem die Berechnung mit einem fokussierten Algorithmus sehr bewährt. Die Rechenzeiten konnten dabei teilweise auf ein Fünftel gesenkt werden und die resultierenden Attribute liefern ähnliche Ergebnisse wie die vollständige Berechnung. Die Reduzierung der Rechenzeit wird aber auch für zukünftige Projekte das Hauptaugenmerk sein, da aktuell für große Datensätze noch immer mehrere Stunden an Rechenzeit notwendig sind.

6 Literaturverzeichnis

- Alkhalifah, T. and Tsvankin, I. [1995] Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics*, **60**(5), 1550-1566.
- Aminzadeh, F., Tafti, T.A. and Maity, D. [2010] Characterizing Fractures in Geysers Geothermal Field using Soft Computing. *Geothermal Resources Council Transactions*, **34**, 1193-1198.
- Boraan Aruoba, S. and Fernández-Villaverde, J. [2014] A Comparison of Programming Languages in Economics, National Bureau of Economic Research
- Blumentritt, C.H., Marfurt, K.J., and Sullivan, E.C. [2006] Volume-based curvature computations illuminate fracture orientations Early to mid-Paleocene, Central Basin Platform, west Texas. *Geophysics*, **71**(5), B159-B166.
- Chen, S., Huang, P., Li, Y.-Y., and Zhang, H. [2014] Fracture estimation using attenuation attributes: A case study. *76th EAGE Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Chopra, S. and Alexeev, V. [2006a] Application of texture attribute analysis to 3D seismic data. *The Leading Edge*, **25**(8), 934-940.
- Chopra S. and Alexeev, V. [2006b] Texture attribute application to 3D seismic data. *6th International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics*, Kolkata, India, 874-879.
- Chopra, S. and Alexeev, V. [2005] Application of texture attribute analysis to 3D seismic data. *75th SEG meeting*, Houston, Texas, USA, 767-770.
- Crampin, S. [1981] A review of wave motion in anisotropic and racked elastic-media. *Wave Motion*, **3**(4), 343-391.
- Crampin, S. [1985] Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics*, **50**(1), 142-152.
- Dai, H., Li, X.-Y., Ford, R., Yu, C., and Wang, J. [2011] Fracture detection using PS converted waves A case study from Daqing oil field. *81st SEG Annual Meeting*, San Antonio, USA.
- de Matos, M.C., Yenugu, M., Angelo, S.M. and Marfurt, K.J. [2011] Integrated seismic texture segmentation and cluster analysis applied to channel delineation and chert reservoir characterization. *Geophysics*, **76**(5), P11-P21.

- Desheng, S., Yun, L., Xiangyu, G., Jun, G., and Jixiang, L. [2010] Application of discrete frequency coherence cubes in the fracture detection of volcanic rocks in full-azimuth seismic data. *SEG Annual Meeting*, 29, 1342-1346.
- Eichkitz, C.G., Amtmann, J., Schreilechner, M.G. and Schneider, S. [2016] Anisotropy estimation based on the grey level co-occurrence matrix (GLCM). *First Break*, **34**(3), 71-77.
- Eichkitz, C.G., Schreilechner, M.G., de Groot, P. and Amtmann, J. [2015] Mapping directional variations in seismic character using GLCM-based attributes. *Interpretation*, **3**(1), T13-T23.
- Eichkitz, C.G., Amtmann, J. and Schreilechner, M.G. [2014] Application of GLCM-based seismic attributes for anisotropy detection. *76th EAGE Conference & Exhibition*, Amsterdam, The Netherlands.
- Eichkitz, C.G., de Groot, P. and Brouwer, F. [2014] Visualizing anisotropy in seismic facies using stratigraphically constrained, multi-directional texture attribute analysis. *AAPG Hedberg Research Conference "Interpretation Visualization in the Petroleum Industry"*, Houston, USA.
- Eichkitz, C.G., Amtmann, J. and Schreilechner, M.G. [2013] Calculation of grey level co-occurrence matrix-based seismic attributes in three dimensions. *Computers and Geosciences*, **60**, 176-183.
- Elebiju, O.O., Matson, S., Keller, G.R., and Marfurt, K.J. [2011] Integrated geophysical studies of the basement structures, the Mississippi chert, and the Arbuckle Group of Osage County region, Oklahoma. AAPG Bulletin, 95(3), 371-393.
- Franklin, S.E., Maudie, A.J. and Lavigne, M.B. [2001] Using spatial co-occurrence texture to increase forest structure and species composition classification accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **67**(7), 849-855.
- Gao, D. [2011] Latest developments in seismic texture analysis for subsurface structure, facies, and reservoir characterization: A review. *Geophysics*, **76**(2), W1-W13.
- Gao, D. [2009] 3D seismic volume visualization and interpretation: An integrated workflow with case studies. *Geophysics*, **74**(1), W1-W24.
- Gao, D. [2008a] Adaptive seismic texture model regression for subsurface characterization. *Oil & Gas Review*, **6**(11), 83-86.
- Gao, D. [2008b] Application of seismic texture model regression to seismic facies characterization and interpretation. *The Leading Edge*, **27**(3), 394-397.
- Gao, D. [2007] Application of three-dimensional seismic texture analysis with special reference to deepmarine facies discrimination and interpretation: Offshore Angola, West Africa. AAPG Bulletin, 91(12), 1665-1683.
- Gao, D. [2003] Volume texture extraction for 3D seismic visualization and interpretation. *Geophysics*, **68**(4), 1294-1302.
- Gao, D. [1999] 3-D VCM seismic textures: A new technology to quantify seismic interpretation. *69th SEG meeting*, Houston, Texas, USA, 1037-1039.
- Guo, H., Marfurt, K.J., and Shu, J. [2011] Map complex fracture systems as termite mounds a fast marching approach. *The Leading Edge*, **30**(5), 496-501.
- Haralick, R.M., Shanmugam, K. and Dinstein, I. [1973] Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, **3**(6), 610-621.

- Horne, R. N., Li, K., Alaskar, M., Ames, M., Co, C., Juliusson, E. and Magnusdottir, L. [2012] Fracture Characterization in Enhanced Geothermal Systems by Wellbore and Reservoir Analysis. Stanford Univ., CA (United States). Dept. of Energy Resources Engineering.
- Hunt, L., Reynolds, S., Hadley, S., Downtown, J., and Chopra, S [2011] Causal fracture prediction: Curvature, stress and geomechanics. *The Leading Edge*, **30**(11), 1274-1286.
- Jafari, A. and Babadagli, T. [2011] Effective fracture network permeability of geothermal reservoirs. *Geothermics*, **40**(1), 25-38.
- Juliusson, E. and Horne, R.N. [2010] Characterization of Fractures in Geothermal Reservoirs. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Indonesia.
- Juliusson, E. [2012] Characterization of Fractured Geothermal Reservoirs Based on Production Data. Dissertation, Stanford University.
- Khromova, I., Link, B., and Marmelevskyi, N. [2011] Comparison of seismic-based methods for fracture permeability prediction. *First Break*, **29**(1), 37-44. Lynn, H.B., and Thomsen, L.A., 1990. Reflection shear-wave data collected near the principal axes of azimuthal anisotropy. *Geophysics*, **55**(2), 147-156.
- Li, Y., Wu, Q., Zhang, F., Feng, Q. and Zhang, R. [2011] Seismic anisotropy of the Northeastern Tibetan Plateau from shear wave splitting analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, **304**(1), 147-157.
- Mai, H.T., Marfurt, K.J., and Tan, M.T. [2009] Multi-attributes display and rose diagrams for interpretation of seismic fracture lineaments, example from Cuu Long basin, Vietnam. *9th SEGJ International Symposium*.
- Maillard, P., Clausi, D.A., and H. Deng, 2005, Operational map-guided classification of SAR sea ice imagery: *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 43, no. 12, 2940-2951.Maillard et al., 2005;
- Martin, M.A. and Davis, T.L. [1987] Shear-wave birefringence: A new tool for evaluating fractured reservoirs. *The Leading Edge*, **6**(10), 22-28.
- Meyers, S. [2014] Effective Modern C++, O'Reilly Media, Inc
- Narhari, S.R., Kidambi, V.K., Al-Ashwak, S., and Al-Qadeen, B., 2009. Volume Curvature Attribute An additional control for fracture swarm identification: Sabriyah Case Study. *Detective stories behind prospect generation: challenges and the way forward*, EAGE, Muscat, Oman.
- Refunjol, X.E., Keranen, K.M., and Marfurt, K.J., 2010. Inversion and attribute-assisted hydraulicallyinduced microseismic fracture prediction: A North Texas Barnett Shale case study, *SEG Annual Meeting*, **29**, 2161-2165.
- Rüger, A. [1998] Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media. *Geophysics*, 63(3), 935-947.
- Schneider, S., Eichkitz, C.G., Schreilechner, M.G. and Davis, J.C. [2016] Interpretation of fractured zones using seismic attributes - case study from Teapot Dome, Wyoming, USA. *Interpretation*, 4(2), T273-T284.
- Schneider, S., Eichkitz, C.G. and Schreilechner, M.G. [2015] Interpretation and modeling of fractured zones using seismic attributes and image log data data from Teapot Dome, Wyoming. 77th EAGE Conference & Exhibition, Madrid, Spain.

- Soh, L.-K. and Tsatsoulis, C. [1999] Texture analysis of SAR sea ice imagery using gray level cooccurrence matrices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **37**, no. 2, 780-795.
- Staples, E., Marfurt, K.J., and Reches, Z., 2010. Fracture analysis using 3D seismic attributes in the Hunton Limestone, Oklahoma, USA. *SEG Annual Meeting*, **29**, 1516-1520.
- Stroustrup, B. [2013] The C++ Programming Language, Fourth Edition, Addison-Wesley
- Stroustrup, B. [2014] Programming Principles and Practice Using C++, Second Edition, Addison-WesleyThomsen, 1986;
- Tsai, F., C.-T. Chang, J.-Y. Rau, T.-H. Lin, and G.-R. Liu [2007] 3D computation of gray level cooccurrence in hyperspectral image cubes, in A. F. Yuille, S.-C. Zhu, D. Cremers, and Y. Wang, eds., Energy minimization methods in computer vision and pattern recognition: Springer, 429–440.
- Vinther, R., Mosegaar, K., Kierkegaard, K., Abatzi, I., Andersen, C., Vejbaek, O.V., If, F. and Nielsen, P.H. [1996] Seismic texture classification: A computer-aided approach to stratigraphic analysis. 65th SEG meeting, Houston, Texas, USA, 153-155.
- Wang, Y., Chen, S., and Li, X.-Y., 2014. The anisotropic characteristics of mesoscale fractures and applications in wide azimuth 3D P-wave seismic data. *76th EAGE Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands.
- Wang, Y., Li, X.-Y., Cui, Y.F., and Ding, P.B., 2013. Effects of fracture scale length on P-wave anisotropic attributes. 75th EAGE Conference and Exhibition, London, UK.
- West, B.P., May, S.R., Eastwood, J.E. and C. Rossen [2002] Interactive seismic facies classification using textural attributes and neural networks. *The Leading Edge*, **21**(10), 1042-1049.
- Willis, H., Rethford, G. and Bielanski, E. [1986] Azimuthal anisotropy: Occurrence and effect on shear wave data quality. *56th Annual International Meeting, SEG*.
- Wolfgramm, M., Bloch, T., Bartels, J., Heuberger, S., Kuhn, P., Naef, H., Voigt, D.H., Seibt, P., Sonderegger, M., Steiger, T. and Uhlig, S. [2015] Reservoir-Geological Characterization of a Fractured Limestone: Results Obtained from the Geothermal Well St. Gallen GT-1 (Switzerland). Proceedings World Geothermal Congress 2015, Australia.
- Yenugu, M., Marfurt, K.J. and Matson, S. [2010] Seismic texture analysis for reservoir prediction and characterization. *The Leading Edge*, **29**(9), 1116-11.

7 Kontaktdaten

Projektleiter DI Christoph Eichkitz Geo5 GmbH Roseggerstraße 17, 8700 Leoben Tel: 03842/47061 <u>office@geo-5.at</u> <u>www.geo-5.at</u>