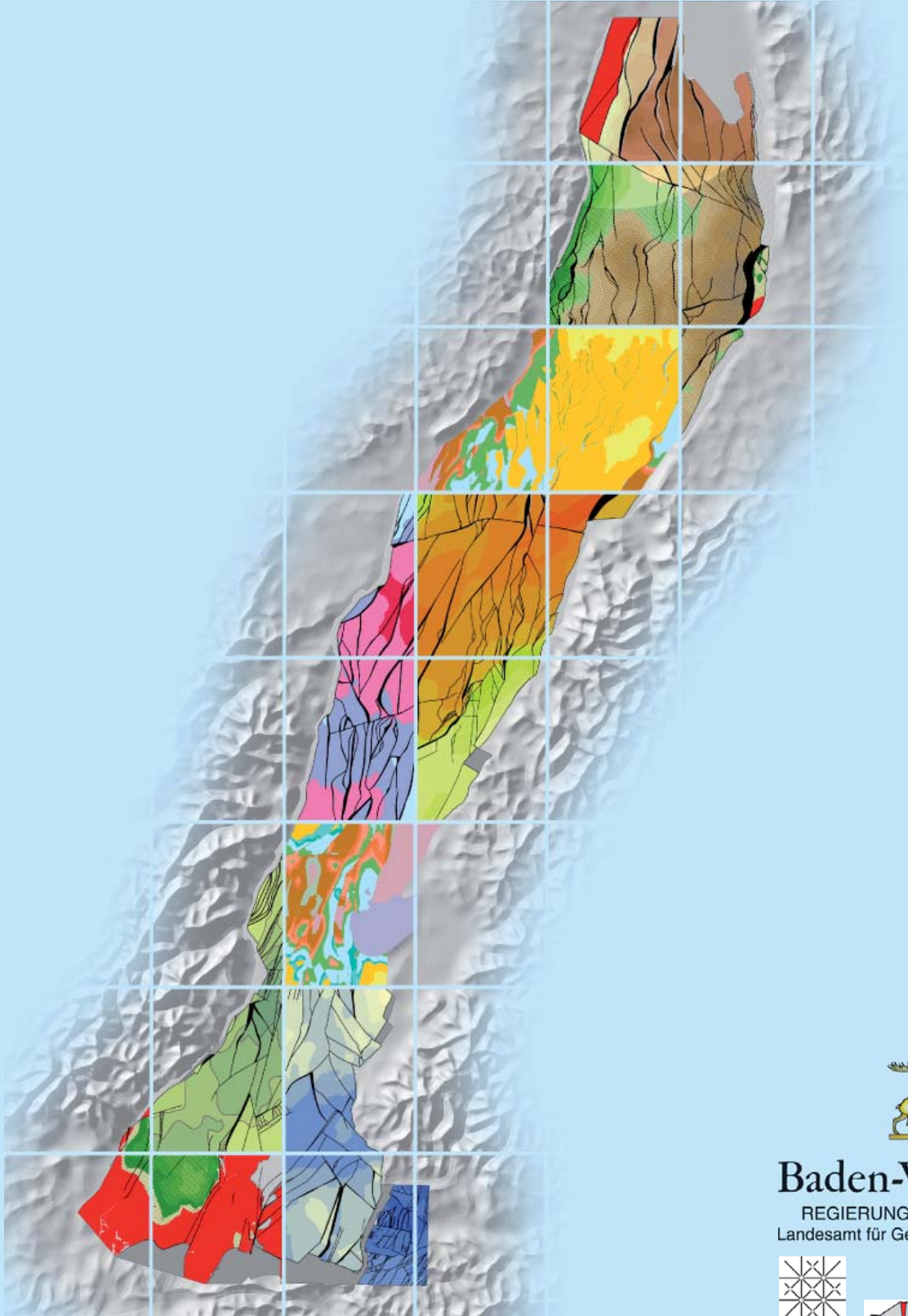
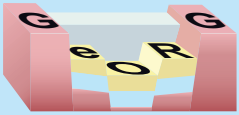


Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben

Fachlich - Technischer Abschlussbericht – Teil 3

Daten, Methodik, Darstellungsweise



Baden-Württemberg

REGIERUNGSPRÄSIDIUM FREIBURG
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau



INTERREG IV
Oberrhein | Rhin supérieur

Der Oberrhein wächst zusammen,
mit jedem Projekt
*Dépasser les frontières :
projet après projet*



Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben

Der Fachlich-Technische Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG besteht aus vier Teilen:

Teil 1 informiert zusammenfassend über die Ziele und Ergebnisse des Projekts GeORG.

Teil 2 informiert ausführlich über die geowissenschaftlichen Ergebnisse und die ermittelten Bewertungen hinsichtlich ihrer Geopotenziale.

Teil 3 dokumentiert ausführlich die im Projekt verwendeten Ausgangsdaten, Methoden und Hilfsmittel.

Teil 4 ergänzt als digitaler Atlas den Fachlich-Technischen Abschlussbericht mit Karten und Profilschnitten.

Der vollständige Fachlich-Technische Abschlussbericht wird im Internet unter www.geopotenziale.eu zum Download bereitgestellt. Die Ergebnisse des Projekts können dort zudem über den **GeORG-Kartenviewer** erschlossen werden.

2013

Freiburg i. Br. / Mainz / Strasbourg / Basel

Herausgegeben von:

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RP Freiburg, Baden-Württemberg)

Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Mainz)

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Orléans et Strasbourg)

Abteilung Angewandte & Umweltgeologie (AUG) der Universität Basel



Schweizer Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Universität Basel:
Abteilung Angewandte
und Umweltgeologie,
Schweiz



Amt für Umwelt und Energie
Kanton Basel-Stadt



Amt für Militär und
Bevölkerungsschutz,
Amt für Umweltschutz und Energie
Kanton Basel-Landschaft



Kommission Klimaschutz der
Oberrheinkonferenz
Frankreich, Schweiz, Deutschland



Bureau de Recherches Géologiques
et Minières (BRGM) France



Région Alsace



ADEME



Conseil Général
du Bas-Rhin (CG67)



Conseil Général
du Haut-Rhin (CG68)



Communauté du
Strasbourg (CUS)



Dieses Projekt wird durch die Europäische Union
kofinanziert - Europäischer Fonds für regionale
Entwicklung (EFRE) - im Rahmen des Programms
INTERREG IV Oberrhein.



Landesamt für Geologie und Bergbau (LGB)
Rheinland-Pfalz



Projektträger

Regierungspräsidium Freiburg
Landesamt für Geologie,
Rohstoffe und Bergbau (LGRB)
Baden-Württemberg



GeORG-Projektteam

Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben

**Fachlich-Technischer Abschlussbericht
des INTERREG-Projekts GeORG**

Teil 3: Daten, Methodik, Darstellungsweise



Das vorliegende Dokument ist Teil des „Fachlich-Technischen Abschlussberichts - Teil 3“ des INTERREG IV-Projekts „GeORG – Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“.

Der komplette Bericht (Teil 1-4) ist unter www.geopotenziale.eu zum Download bereit gestellt.



Impressum

Herausgeber: LGRB Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RP Freiburg, Baden-Württemberg)
BRGM Bureau de recherches géologiques et minières (Orléans et Strasbourg)
LGB Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Mainz)
AUG Abteilung Angewandte & Umweltgeologie der Universität Basel

Autoren: GeORG-Projektteam:
Günter Sokol¹ & Edgar Nitsch¹ (Koord.), Birte Anders¹, Laurent Beccaletto², Laure Capar²,
Davy Cruz Mermey², Chrystel Dezayes², Horst Dresmann³, Philippe Elsass^{2,1}, Charlotte Fehn¹,
Gabriele Fischer¹, Matthias Franz¹, Jost Haneke⁴, Peter Huggenberger³, Thomas Kärcher⁴,
Johannes Krzyzanowski⁴, Gwennolé Oliviero^{1,2}, Rupert Prestel¹, Claudia Rodat¹, Isabel Rupf¹,
Joachim Schuff¹, Stefanie Siemon⁴, Roman Storz⁴, Jörg Tesch⁴, Stephan Urban², Michael
Weidenfeller⁴, Ulrike Wielandt-Schuster¹, Gunther Wirsing¹, Heiko Zumsprekel¹.

¹LGRB, ²BRGM, ³AUG, ⁴LGB

Übersetzung: Vera Martin, Traductrice – Membre S.F.T., 16, allée ô Cantelou, F-33360 LATRESNE
Une traduction en français est disponible à <http://www.geopotenziale.eu>

Abbildungen: soweit nicht anders angegeben: GeORG-Projektteam

Satz: Charlotte Fehn

Webrepräsentation: <http://www.geopotenziale.eu>

Ausgabe: Dezember 2013

© Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege sowie Speicherung in
Datenverarbeitungsanlagen - auch auszugsweise - nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Zitiervorschlag: GeORG-Projektteam (2013): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben,
Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG, Teil 3: Daten,
Methodik, Darstellungsweise. – 242 S.; Freiburg i. Br.

Vollständiger Projektbericht:

GeORG-Projektteam (2013): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben,
Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG, Teile 1–4. – Internet
(PDF-Dokument: <http://www.geopotenziale.eu>).



Das vorliegende Dokument ist Teil des „Fachlich-Technischen Abschlussberichts - Teil 3“ des INTERREG IV-
Projekts „GeORG – Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“.

Der komplette Bericht (Teil 1-4) ist unter www.geopotenziale.eu zum Download bereit gestellt.



Inhaltsverzeichnis

3.1	Einführung in den GeORG-Workflow	1
3.1.1	Datengrundlage	3
3.1.2	Hard- und Software	4
3.1.3	Koordinatensysteme	5
3.1.3.1	Transformation in ArcGIS	8
3.1.3.2	Transformation von Gocad-Objekten	9
3.2	Datengrundlagen und Aufbereitung	12
3.2.1	Aufbereitung von Bohrdaten	13
3.2.1.1	Eingangsdaten	14
3.2.1.2	Harmonisierung von Stammdaten	15
3.2.1.3	Harmonisierung von Schichtdaten	16
3.2.1.4	Austauschformat für Stamm- und Schichtdaten	17
3.2.1.5	Aufbereitung von Geophonversenkungsmessungen	19
3.2.2	2D-Darstellungen	20
3.2.2.1	Geologische Karte	21
3.2.2.1.1	Eingangsdaten für die Geologische Karte	22
3.2.2.1.2	Harmonisierung der Datensätze	23
3.2.2.1.3	Weiterführende Kartendarstellungen	25
3.2.2.2	Profilschnitte und Line Drawings	26
3.2.2.3	Schichtlagerungskarten	27
3.2.2.4	Mächtigkeitsverteilungen	29
3.2.3	Digitale Geländemodelle	30
3.2.4	Geologische 3D-Modelle	31
3.2.5	Seismikprozessierung	33
3.2.6	Hydrogeologische Daten	35
3.2.6.1	Datenbank	36
3.2.6.1.1	Struktur und Logik	37
3.2.6.1.2	Temperatur	38
3.2.6.1.3	Hydrochemie	39
3.2.6.2	Wärmeleitfähigkeiten	40
3.2.6.3	Porositäten und Permeabilitäten	41
3.3	Auswertung hydrogeologischer Daten	42
3.3.1	Temperatur	43
3.3.2	Hydrochemie	44
3.3.3	Porosität und Permeabilität	47
3.3.4	Wärmeleitfähigkeit	55
3.4	Seismikinterpretation	62
3.4.1	Seismikinterpretation im SeisVision Modul	63
3.4.2	Seismikinterpretation in Gocad	65
3.5	Geologische 3D-Modellierung	66
3.5.1	Methodische Grundlagen	68
3.5.1.1	Workflow 3D-Modellierung (<i>Workflow 3d-modeling</i>)	69
3.5.1.2	Begrenzung und Teilbereiche des Modells	71
3.5.2	Vorbereitende Arbeitsschritte (<i>Data preparation</i>)	73
3.5.2.1	Verbreitungen (<i>Occurrence</i>)	74
3.5.2.2	Präkämzoische Mächtigkeitsverteilungen (<i>Construction of Pre-Cenocoic thickness distributions</i>)	76
3.5.2.3	Faziesverteilungen (<i>Facies distributions</i>)	79
3.5.2.4	Datenimport in Gocad	81





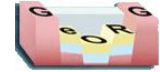
3.5.3	Modellierung von Störungen (<i>Fault modeling</i>).....	82
3.5.3.1	Störungskorrelation (<i>Fault correlation</i>)	84
3.5.3.2	Störungen aus der Seismik (<i>Faults from seismics</i>)	87
3.5.3.3	Störungen aus Seismik und Geologischen Karten / Schichtlagerungskarten (<i>Faults from seismics and geological maps / structural maps</i>)	89
3.5.3.4	Störungen aus der Geologischen Karte / Schichtlagerungskarten oder Bohrungen und/oder 2D-Profilen (<i>Faults from geological or structural maps or wells and/or 2d-cross-sections</i>)	91
3.5.4	Modellierung von Horizonten (<i>Horizon modeling</i>)	93
3.5.4.1	Direkte Modellierung von Horizonten mit Bohrungen und Seismik (<i>Direct horizon modeling with wells and seismics</i>)	96
3.5.4.2	Indirekte Modellierung von Horizonten mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen (<i>Indirect horizon modeling with thickness distributions</i>)	98
3.5.4.3	Direkte Modellierung von Horizonten in der Tiefendomäne (CH) - <i>Direct horizon modeling in depth domain (CH)</i>	100
3.5.4.4	Modellierung der Lockergesteinsbasis (<i>Modeling of base unconsolidated rocks</i>)	102
3.5.4.4.1	Modellierung der Lockergesteinsbasis in Baden-Württemberg.....	104
3.5.4.4.2	Modellierung der Lockergesteinsbasis in Frankreich (<i>Modeling of base unconsolidated rocks in France</i>).....	106
3.5.4.4.3	Modellierung der Lockergesteinsbasis in Rheinland-Pfalz.....	108
3.5.4.4.4	Modellierung der Lockergesteinsbasis in der Schweiz (<i>Modeling of base unconsolidated rocks in Switzerland</i>).....	109
3.5.5	Modellierung von Salzstockstrukturen (<i>Modeling of salt structures</i>)	111
3.5.6	Abgrenzung des Kaiserstuhlgebiets (<i>Kaiserstuhl boundary</i>).....	113
3.5.7	Kombination zum Gesamtmodell.....	115
3.5.8	Geschwindigkeitsmodellierung (<i>Velocity modeling</i>)	117
3.5.8.1	Modell für die Tiefen-Zeitkonvertierung (Geschwindigkeitsmodell 1) - (<i>Model for depth-time conversion (Velocity model 1)</i>).....	119
3.5.8.2	Modell für die Zeit-Tiefenkonvertierung (Geschwindigkeitsmodell 2) (<i>Model for time-depth conversion (Velocity model 2)</i>).....	121
3.5.8.3	Intervallgeschwindigkeiten in der Schweiz (<i>Modeling of interval velocities CH</i>)	124
3.5.9	Darstellung der Datendichte und Abweichungen	126
3.5.9.1	Darstellung der Datendichte	127
3.5.9.2	Abweichungen der Basisdaten (Bohrungen) und neuen Bohrdaten in den Kantonen Basel-Stadt und Basel-Landschaft.....	128
3.5.10	Ableitung von Produkten aus dem geologischen 3D-Modell (<i>Derivation of products</i>)	130
3.5.10.1	Ableitung von Schichtlagerungsinformationen (<i>Derivation of structural maps</i>).....	132
3.5.10.2	Ableitung von Mächtigkeitsverteilungen (<i>Derivation of thickness distributions</i>)	134
3.5.10.3	Ableitung von Störungsinformationen.....	136
3.5.10.4	Ableitung von Profilschnitten	138
3.5.10.5	Ableitung von Mächtigkeitsprofilen	139
3.5.10.6	Ableitung von Geologischen Karten für definierte Tiefenstufen und Isothermen (<i>Derivation of geological maps for certain depths or isothermal planes</i>)	140
3.5.11	Unsicherheiten.....	142
3.5.11.1	Unsicherheiten der Eingangsdaten	143
3.5.11.2	Unsicherheiten im Modellierprozess.....	144
3.5.11.3	Störungskorrelationstests in der Schweiz.....	145
3.5.11.4	Nicht modellierte bzw. schematische Modellbereiche	151
3.6	Geothermische 3D-Modelle	153
3.6.1	Geostatistische Temperaturmodellierung (<i>Geostatistical temperature modeling</i>)	154
3.6.1.1	Vorbereitende Arbeitsschritte	156
3.6.1.1.1	Datentypen und deren Aufbereitung.....	157





3.6.1.1.2	Wichtung der Eingangsdaten	159
3.6.1.1.3	Berechnung von Bodentemperaturen	162
3.6.1.2	Modellaufbau	163
3.6.1.2.1	Aufbau des Voxetmodells	164
3.6.1.2.2	Datenimport und Gridparametrisierung	165
3.6.1.2.3	Gradientenbasierte Plausibilitätsprüfung.....	166
3.6.1.3	Erstellung des A-Priorimodells	167
3.6.1.3.1	Regressionsanalyse der Temperaturdaten	168
3.6.1.3.2	Topographieeffekt.....	169
3.6.1.4	Erstellung des Residualtemperaturmodells	172
3.6.1.4.1	Analyse der Residualtemperaturen	173
3.6.1.4.2	Kriging der Residualtemperaturen.....	175
3.6.1.5	Kombination zum Gesamttemperaturmodell	176
3.6.1.6	Auswertung und Datenexport	177
3.6.1.6.1	Ableitung von Temperaturen für definierte Tiefenstufen	178
3.6.1.6.2	Ableitung von Isothermenflächen	179
3.6.1.6.3	Ableitung von Temperaturen an geologischen Horizonten	180
3.6.1.6.4	Berechnung von Standardabweichungen für Temperaturkarten	181
3.6.2	Pilotstudie:„Logauswertung und konduktive Temperaturmodellierung im Oberrheingraben zwischen Rastatt und Landau“	182
3.6.2.1	Arbeitsablauf der Logauswertung und konduktiven Temperaturmodellierung	183
3.6.2.2	Datenzusammenstellung	187
3.6.2.3	Sichtung der Daten, Vollständigkeitsprüfung	188
3.6.2.4	Auswahl der Referenzbohrungen, Qualitätskontrolle	191
3.6.2.5	Interpretation der Logdaten	193
3.6.2.5.1	Rekonstruktion der Lithologie aus Logdaten	194
3.6.2.5.2	Berechnung des Tonvolumens.....	196
3.6.2.5.3	Berechnung der Porosität.....	197
3.6.2.5.4	Berechnung der Wärmeleitfähigkeitsprofile.....	200
3.6.2.5.5	Berechnung der Wärmeproduktionsrate	202
3.6.2.6	Konduktives Temperaturmodell	203
3.6.2.6.1	Modellaufbau	204
3.6.2.6.2	Stationäre Modellierung des Temperaturfeldes	208
3.7	Geopotenzialkarten	213
3.7.1	Ableitung des Nutzungspotenzials für Gasspeicher	216
3.7.1.1	Eingangsdaten.....	217
3.7.1.2	Bewertungskriterien	218
3.7.1.3	Auswertung und Datenexport	219
3.7.2	Ableitung des Geothermischen Potenzials.....	221
3.7.2.1	Eingangsdaten.....	222
3.7.2.2	Bewertungskriterien	223
3.7.2.3	Auswertung und Datenexport	224
3.7.3	Abschätzung des Wärmehaltes und des technischen geothermischen Potenzials	225
3.7.3.1	Eingangsdaten.....	226
3.7.3.2	Methodik	227
3.7.3.3	Auswertung und Datenexport	229
3.8	Schnittstellen und Ausgabemedien.....	232
3.8.1	GeORG WEB-Seite	233
3.8.2	GeORG Kartenviewer.....	234
3.8.3	GeORG Metadaten.....	235
3.8.4	Geodaten und Geodaten-Dienste.....	236





3.9	Literatur zu Teil 3	237
-----	---------------------------	-----



3.1 Einführung in den GeORG-Workflow

Ziel: Übersicht über die Arbeitspakete des GeORG-Workflows und deren Zusammenhänge

Kurzbeschreibung

Übersicht über die Arbeitspakete des GeORG-Workflows und deren Zusammenhänge

Beschreibung

- Der GeORG-Workflow setzt sich aus folgenden Teilarbeitspaketen zusammen:

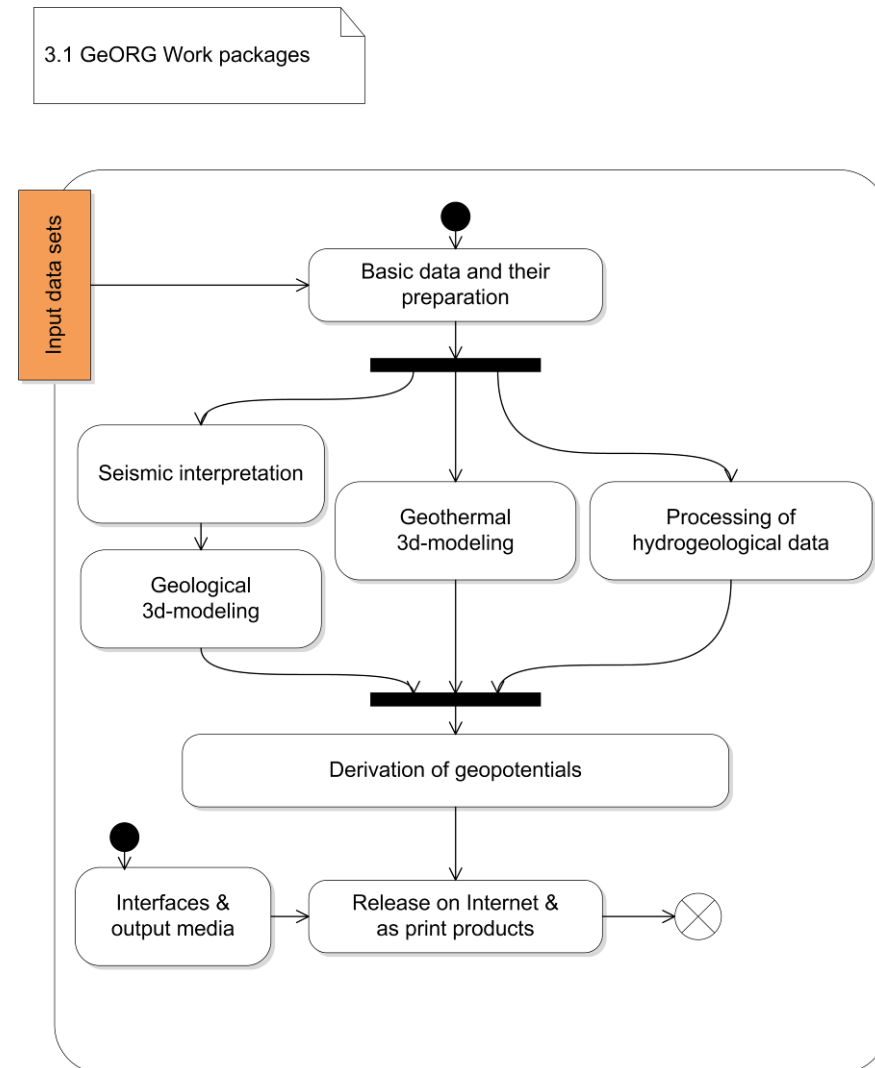
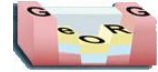


Abb. 3.1-1: UML diagram - Work packages GeORG workflow

- Die grundlegenden Eingangsdatentypen und deren technische und inhaltliche Harmonisierung (*Basic data and their preparation*) werden in Kapitel 3.2 Datengrundlagen und Aufbereitung beschrieben

- Auf den Eingangsdaten (*Input data sets*) aufbauend finden Modellierungen und Auswertungen unter folgenden Aspekten statt:



- Kapitel 3.3 Auswertung hydrogeologischer Daten (*Processing of hydrogeological data*)
- Kapitel 3.4 Seismikinterpretation (*Seismic interpretation*)
- Das geologische 3D-Modell (Kapitel 3.5 Geologische 3D-Modellierung) baut im Wesentlichen auf den Ergebnissen der Seismikinterpretation auf (*Geological 3d-modeling*)
- Die Arbeitstechniken für eine geostatistische Auswertung von Temperaturen und die auf Wärmeleitfähigkeiten gestützte konduktive Wärmemodellierung werden Kapitel 3.6 Geothermisches 3D-Modell beschrieben (*Geothermal 3d-modeling*)
- Die Ergebnisse der Kapitel 3.2-3.6 finden in Kapitel 3.7 Geopotenzialkarten Eingang (*Derivation of geopotential information*)
- Die Strukturen für die Ausgabe im Internet werden in Kapitel 3.8 Schnittstellen und Ausgabemedien beschrieben (*Interfaces & output media*)
- 3.9 Literatur zu Teil 3





3.1.1 Datengrundlage

Ziel: Auflistung der Datengrundlagen und deren Herkunft für das GeORG-Projekt

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Datengrundlagen und deren Herkunft für das GeORG-Projekt

Eingangsdaten

s.u.

Beschreibung

Die in GeORG genutzten Eingangsdatensätze stammen im Wesentlichen aus den Archiven der beteiligten Projektpartner und der Literatur. Der Wirtschaftsverband Erdöl und Erdgasgewinnung, swisstopo und die Unternehmen ExxonMobil Production Deutschland GmbH, Gaz de France Produktion Exploration Deutschland GmbH, RWE Dea AG, Wintershall Holding AG Erdölwerke, die SEAG Aktiengesellschaft für Schweizerisches Erdöl, Shell France und die Geopower AG unterstützten die Nutzung von Bohrungs- und Seismikdaten sowie Kartenwerken.

Detaillierte Beschreibungen zu den Eingangsdaten und deren Aufbereitung finden sich Kap. 3.2





3.1.2 Hard- und Software

Ziel: Auflistung der im GeORG-Projekt genutzten Hard- und Softwarekomponenten

Kurzbeschreibung

Beschreibung der im GeORG-Projekt genutzten Hard- und Softwarekomponenten

Beschreibung

Hardware:

In der Regel handelsübliche PCs mit Windows OS. Für Seismikinterpretation, geologische 3D-Modellierung und Temperaturmodellierung Fujitsu Celsius Workstations mit Highend Nvidia Grafikkarten und bis zu 72 GB Arbeitsspeicher unter Cent OS.

Software:

Neben der üblichen Bürokommunikationssoftware kamen für verschiedene Aufgaben Spezialsoftware, teilweise auch Eigenentwicklungen, zum Einsatz:

- Datenbankabfrageskripte (LGRB): PHP-Skripte (Eigenentwicklung)
- Seismikinterpretation und Visualisierung von SEG-Y Daten: SeisVision, SeiSee 2.14, Gocad 2009.x, ReflexW
- GIS-Software (Datenvor- und Nachbereitung, Produktgenerierung): ArcGIS 9.3 und 10, ArcView 3.3
- 3D-Modellierung: Gocad 2009.x
- Eigenentwicklungen im Gocadumfeld (Werkverträge, Programme für Güteabschätzung und Koordinatentransformation)
- Explorative Statistik für Geschwindigkeiten, Temperaturen: Sigmaplot 12.0
- Geostatistische Analyse und Modellierung: Gocad 2009.x
- Konduktive Temperaturmodellierung: Schemat (Werkvertrag Fa. Geophysica)





3.1.3 Koordinatensysteme

Ziel: Transformation von Eingangs-, Arbeits- und Ergebnisdaten in landesübliche und zusätzliche im Projekt verwendete Koordinatenreferenzsysteme

Kurzbeschreibung

Übersicht der in GeORG verwendeten Koordinatensysteme, Transformationsmethoden für 2D- und 3D-Daten

Eingangsdaten

GIS-Daten, Seismikdaten, Gocad-Objekte

Beschreibung

Die Eingangsdaten der 3D-Modellierung (Bohrdaten, Seismikdaten, geologische Karten, Karten aus vorherigen Projekten, bereits bestehende Gocad-Modelle) sind originär in ihren landesüblichen Koordinatenreferenzsystemen (*Gocad objects in original coordinate system*) gehalten. Hierzu gehören vor allem:

In Frankreich:

Lambert II Carto
Projection: Lambert_Conformal_Conic
False_easting: 600000.00000000
False_northing: 2200000.00000000
Central_meridian: 2.33722910
Standard_parallel_1: 46.8
Latitude_of_origin: 46.80000000
Linear unit: Meter
Geographic coord system: NTF-PM
Datum: D_NTF-PM
Main meridian: Greenwich
Linear unit: Degree

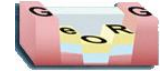
In Deutschland:

DHDN_3_Degree_Gauss_Zone_3
Projection: Gauss_Kruger
False_Easting: 3500000.000000
False_Northing: 0.000000
Central_Meridian: 9.000000
Scale_Factor: 1.000000
Latitude_Of_Origin: 0.000000
Linear Unit: Meter
GCS_Deutsches_Hauptdreiecksnetz
Datum: D_Deutsches_
Hauptdreiecksnetz

In der Schweiz:

CH1903_LV03
Projection: Hotine_Oblique_Mercator_
Azimuth_Center
False_Easting: 600000.000000
False_Northing: 200000.000000
Scale_Factor: 1.000000





Azimuth: 90.000000
Longitude_Of_Center: 7.439583
Latitude_Of_Center: 46.952406
Linear Unit: Meter
GCS_CH1903
Datum: D_CH1903

Für die Darstellung der Projektergebnisse in Form von gedruckten Karten und digital mit Hilfe von Webdiensten wird das europaweit gängige Koordinatenreferenzsystem ETRS_1989 mit der für das Untersuchungsgebiet gültigen Projektion UTM Zone 32N verwendet:

Europa

ETRS_1989
Projection: UTM_Zone_32N
False_easting: 500000.0
False_northing: 0.0
Scale_factor: 0.9996
Central_meridian: 9.0
Latitude_of_origin: 0.0
Linear unit: Meter
Datum: D_ETRS_1989
Main meridian: Greenwich
Linear unit: Degree

Für die Einbindung von GeORG-Webdiensten in externe Geoportale und Kartenanwendungen ist darüber hinaus die Bereitstellung der Daten in geographischen Koordinaten (GCS WGS84, Dezimalgrad) empfehlenswert.

An verschiedenen Stellen des Workflows im Projekt - (1) bei der Aufarbeitung der Eingangsdaten zur 3D-Modellierung, (2) im Zuge des Austauschs von 2D- und 3D-Arbeitsdaten zwischen den Projektpartnern, (3) bei der abschließenden Auslieferung des 3D-Modells an die Projektpartner in den landesüblichen Koordinatenreferenzsystemen und (4) bei der Darstellung von Ergebnisdaten in Kartenform und im Internet - sind daher Umwandlungen von einem Koordinatenreferenzsystem in ein anderes (Datumstransformation) für 2D- und 3D-Daten notwendig. Die Methoden der Datumstransformation für 2D- und 3D-Daten müssen bei der Projektbearbeitung vorab festgelegt und konsistent gehandhabt werden, um Lageungenauigkeiten, die aus unterschiedlichen Datumstransformationen resultieren, möglichst gering zu halten.

GIS-Eingangsdaten für die 3D-Modellierung (Bohrlagepunkte, geologische Karten, Karten aus vorherigen Projekten) wurden mit Hilfe üblicher GIS-Methoden in der Software ArcGIS 9.3 transformiert, wobei Zwei-Schritt-Datumstransformationen angewendet wurden (s. 3.1.3.1.)

Seismikdaten lagen auf deutscher Seite bereits in dem auch bei der 3D-Modellierung verwendeten Gauß-Krüger-Koordinatensystem vor. Französische Daten wurden während der Seismikprozessierung mit Gauß-Krüger-Koordinaten versehen.

Gocad -Objekte können prinzipiell aufgrund ihres Ascii-Charakters ebenfalls in GIS importiert, transformiert und als Ascii-Dateien aus ArcGIS wieder exportiert werden. Dies war bei der Projektbearbeitung jedoch - angesichts der zu prozessierenden Datenmengen und des häufigen Datenaustausches zwischen den Projektpartnern in GeORG - mit einem nicht vertretbaren Zeit- und Bearbeitungsaufwand verbunden.





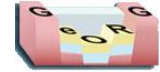
Daher wurde an der TU Bergakademie Freiberg im Rahmen eines Werkvertrags das Programm KoordTrans entwickelt, mit dem Gocad-Objekte direkt zwischen den in GeORG benötigten Koordinatensystemen umgewandelt werden können (Karich 2010).

KoordTrans verwendet dabei EPSG-Codes und die offene Programmbibliothek PROJ.4 zur Datumstransformation (s. 3.1.3.2)

Literaturhinweise

Karich (2010)





3.1.3.1 Transformation in ArcGIS

Ziel: Transformation von GIS-Daten zwischen den landesüblichen und zusätzlichen, im Projekt relevanten Koordinatensystemen

Kurzbeschreibung

Transformationsmethoden für 2D-Daten mit ArcGIS

Eingangsdaten

GIS-Daten

Beschreibung

Die 3D-Modellierung im deutschen und französischen Projektgebiet wurde im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (Zone 3) durchgeführt, im Teilgebiet Schweiz im Koordinatensystem CH1903_LV03. Bei der 3D-Modellierung verwendete GIS-Eingangsdaten (Bohrlagepunkte, geologische Karten, 2D-Daten aus vorherigen Projekten) wurden daher ggf. mit Hilfe üblicher GIS-Methoden in der Software ArcGIS 9.3 in das jeweilige Koordinatensystem der 3D-Modellierung transformiert.

Da die landesüblichen Koordinatenreferenzsysteme zum Teil auf unterschiedlichen Referenzellipsoiden und Projektionsparametern beruhen, stand in ArcGIS keine direkte Möglichkeit der Datumstransformation zur Verfügung. Flacke & Kraus (2005) empfehlen in länderübergreifenden Regionen mit unterschiedlich definierten Koordinatenreferenzsystemen (wie z.B. auch der Dreiländerregion D, A, CH) eine Zwei-Schritt-Transformation, in der die Eingangskoordinaten in einem ersten Schritt in geographische Koordinaten (GCS WGS84, Dezimalgrad) transformiert werden und in einem zweiten Schritt in das Zielkoordinatensystem. Gute Erfahrungen mit dieser Methodik wurden bereits im INTERREG III Projekt SIGRS-GISOR Oberrhein gesammelt (SIGRS-GISOR 2012). Die Zwei-Schritt-Transformation in ArcGIS wurde daher für die GIS-Eingangsdaten übernommen und konnte mit dem ModelBuilder in ArcGIS teilautomatisiert werden. Als Transformationsmethoden wurden landesweit anwendbare, wenn möglich Grid-basierte Verfahren verwendet. Bei dem Schweizer Koordinatensystem wurde ein landesweit gültiges Parameter-basiertes Verfahren gewählt:

Name der Datumstransformationen in ArcGIS:

Frankreich: WGS_1984_To_NTF_NTv2

Schweiz: CH1903_To_WGS_1984_2

Deutschland: DHDN_To_WGS_1984_4_NTv2

Die bei der Zwei-Schritt-Transformation erreichten Ergebnisse wurden von den Projektpartnern überprüft und als zufriedenstellend für die Projektbearbeitung bewertet.

Literaturhinweise

Flacke & Kraus (2005)

SIGRS-GISOR (2012)



3.1.3.2 Transformation von Gocad-Objekten

Ziel: Transformation von 3D-Daten zwischen den landesüblichen und zusätzlichen, im Projekt relevanten Koordinatensystemen

Kurzbeschreibung

Transformationsmethoden für 3D-Daten mit KoordTrans

Eingangsdaten

Gocad-Objekte

Beschreibung

Die 3D-Modellierung im deutschen und französischen Projektgebiet wurde im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (Zone 3) durchgeführt, im Teilgebiet Schweiz im Koordinatensystem CH1903_LV03. Zum Austausch von 3D-Arbeitsdaten der Modellierung und bei der abschließenden Auslieferung des 3D-Modells an die Projektpartner in den landesüblichen Koordinatenreferenzsystemen müssen **Gocad-Objekte** transformiert werden. Sie können prinzipiell aufgrund ihres Ascii-Charakters ebenfalls in GIS importiert, transformiert und als Ascii-Dateien aus ArcGIS wieder exportiert werden (s. Abbildung Datumstransformation 2D/3D). Dies war bei der Projektbearbeitung jedoch - angesichts der zu prozessierenden Datenmengen und des häufigen Datenaustausches zwischen den Projektpartnern in GeORG - mit einem nicht vertretbaren Zeit- und Bearbeitungsaufwand verbunden.

Daher wurde an der TU Bergakademie Freiberg im Rahmen eines Werkvertrags das Programm KoordTrans entwickelt, mit dem Gocad Objekte direkt zwischen den in GeORG benötigten Koordinatensystemen umgewandelt werden können (Karich 2010).

Die im Rahmen der BSc-Arbeit mit Microsoft Visual Studio C++ 2008 entwickelte Version des Programms erlaubt eine Transformation der Gocad-Objektarten PointSets, Curves und Surfaces zwischen den landesüblichen, in 3.1.3 aufgeführten Koordinatenreferenzsystemen sowie in ETRS_1989 UTM_Zone 32N. Die Objekte können mit Hilfe einer grafischen Oberfläche eingeladen und nach der Definition des Eingangs- und Zielkoordinatensystem transformiert werden (s. Abb. 3.1.3.2-2). Ausgabedateien werden eindeutig nach den erfolgten Transformationsschritten benannt. Außerdem besteht die Möglichkeit der Batch-Verarbeitung.

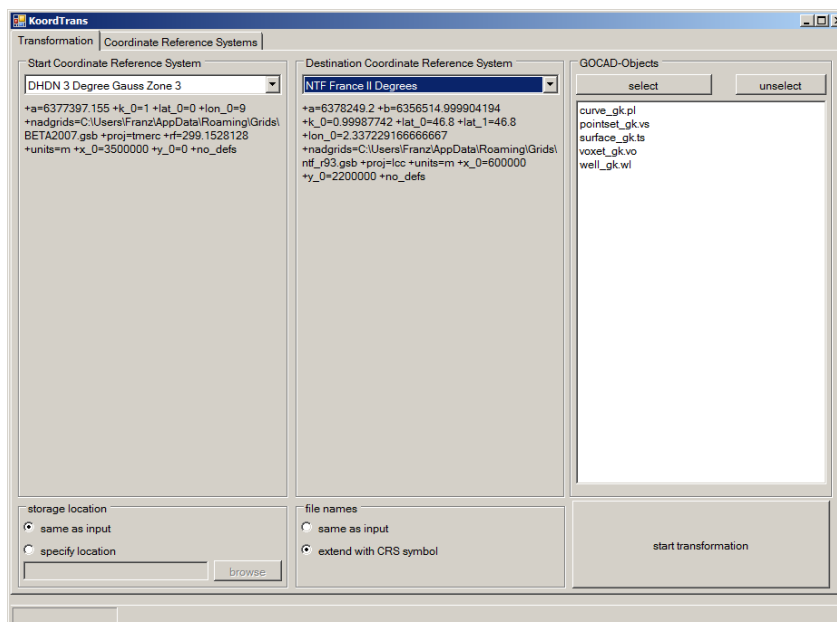
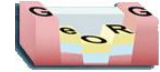


Abb. 3.1.3.2-2: Grafische Oberfläche KoordTrans





Die Lagegenauigkeit der mit KoordTrans transformierten Objekte wurde anhand von Beispielobjekten getestet und liegt im Vergleich zu den in 3.1.3.1 beschriebenen Datumstransformationen mit ArcGIS bei Einfachtransformationen in den landesüblichen Koordinatensystem (s. 3.1.3) im Bereich von einigen Metern, was für die Modellgenauigkeit im Projekt zufriedenstellend ist. Lagedifferenzen sind dabei auf die unterschiedlichen Methoden der in KoordTrans verwendeten offenen Programmibliothek PROJ.4 und ArcGIS zurückzuführen, die sich ohne detaillierten Zugang zu den in ArcGIS verwendeten Transformationsmethoden nicht vermindern lassen (Karich 20).

3.1.3.2 GeORG datum transformation

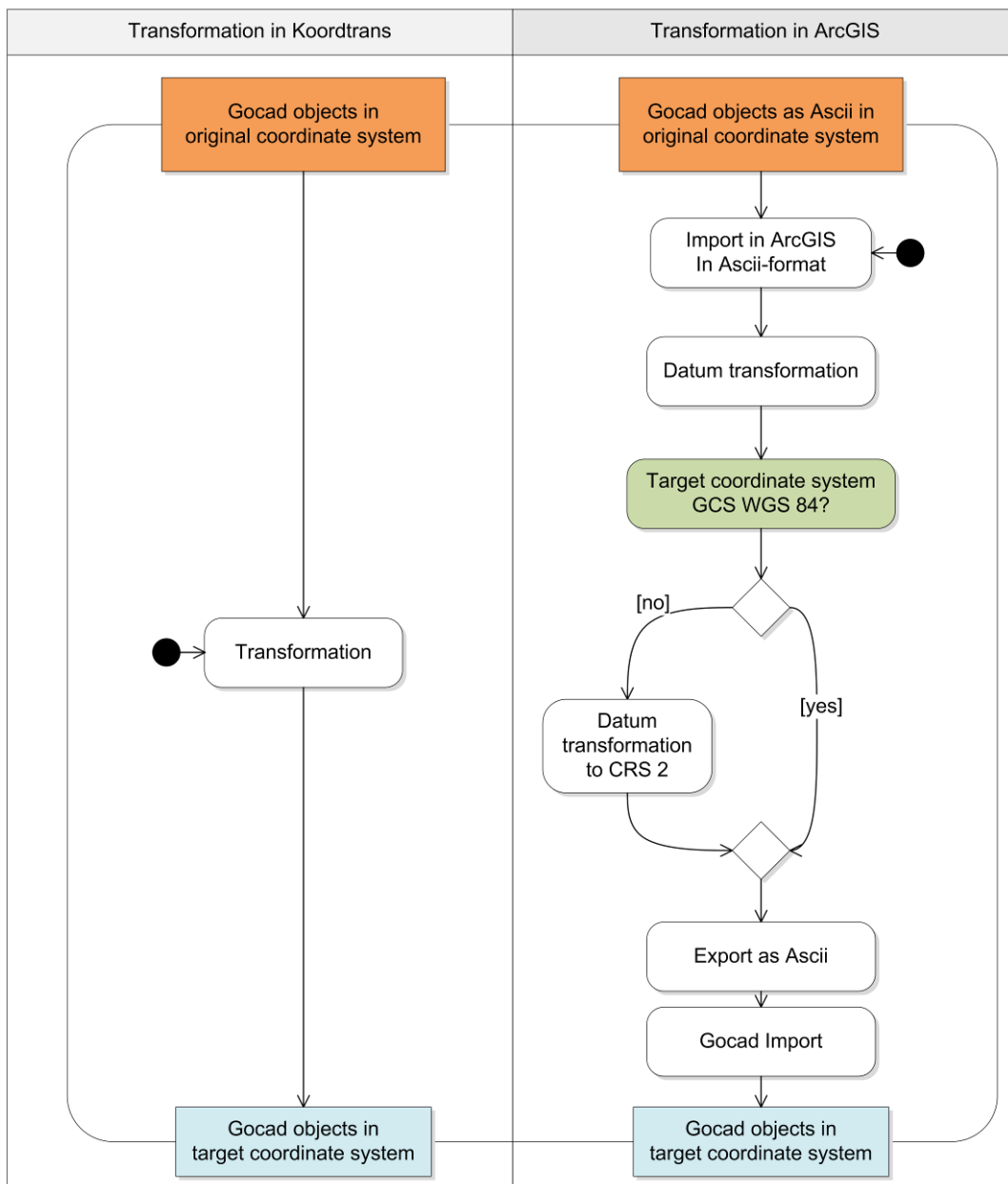


Abb. 3.1.3.2-1: UML diagram - Coordinate transformation of Gocad objects in KoordTrans and ArcGIS





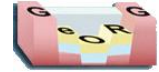
Im Projektzeitraum wurde KoordTrans um die folgenden Funktionalitäten weiter entwickelt bzw. verbessert:

- Optimierung der bestehenden Transformationsmethode GK3/DHDN nach UTM/ETRS89 an die Ergebnisse der ArcGIS-Transformationsmethode DHDN_To_ETRS_1989_8_NTv2 (Abweichung < 5 Meter)
- Optionale Nutzung des BeTA2007-Grids des BKG
- Transformation zwischen GK3/DHDN und GK4/DHDN, UTM 32/ETRS89 und UTM 33/ETRS89 und Geographischen Koordinaten/WGS84 in allen Kombinationen
- Weitere Gocadobjekte: Neben den bestehenden Objekten können auch die Gocad-Objekte Wells und Voxets transformiert werden.
- Transformationsparameter können in der Benutzeroberfläche manuell definiert werden
- Bei Grid-basierten Methoden ist das Projektionsgrid auswählbar
- Transformationsergebnisse bei der UTM und GK-Transformation können wahlweise mit oder ohne Zonenzusatz ausgegeben werden.
- Programm ist auf unterschiedlichen Windows-Systemen (Vista, Windows 7) betriebsfähig

Literaturhinweise

Karich (2010)





3.2 Datengrundlagen und Aufbereitung

Ziel: Aufbereitung verschiedener Eingangsdatentypen für Modellaufbau und Geopotenzialauswertungen

Kurzbeschreibung

Beschreibung der verschiedenen Eingangsdatentypen und deren Aufbereitung für den Modellaufbau und Geopotenzialauswertungen

Eingangsdaten

s. Beschreibung

Beschreibung

Kap. 3.2 beschreibt die grundlegenden Datentypen und deren Vorbereitung für die Weiterverarbeitung unter geologischen, hydrogeologischen und geothermischen Gesichtspunkten. Folgende Datentypen wurden innerhalb des GeORG-Workflows genutzt:

- Bohrdaten
- 2D-Darstellungen (Geologische Karte, Profilschnitte, Schichtlagerungskarten etc.)
- Digitale Höhenmodelle
- 3D-Modelle
- Reflexionsseismikprofile
- Hydrogeologische Daten





3.2.1 Aufbereitung von Bohrdaten

Ziel: Länderübergreifend harmonisierte digitale Bohrdaten für den Modellaufbau und Geopotenzialauswertungen

Kurzbeschreibung

Aufbereitung von Bohrdaten für den Aufbau des geologischen 3D-Modells und des geothermischen 3D-Modells sowie für Geopotenzialauswertungen

Eingangsdaten

Bohrdatenbanken der Projektpartner; analoge Unterlagen (Schichtenverzeichnisse, geophysikalische Logs etc.)

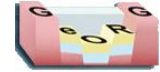
Beschreibung

Unterlagen von geologischen Bohrprojekten können eine Vielzahl unterschiedlicher Daten beinhalten wie Schichtenverzeichnisse, geophysikalische, thermische oder hydrologische Messungen etc. Diese Daten liegen i.d.R. heterogen vor und müssen für eine bessere Vergleichbarkeit harmonisiert werden. Diese Schritte werden in den Kap. 3.2.1 (Stamm- und Schichtdaten, Geophonversenkungsmessungen) und Kap. 3.2.6 (Hydrogeologische Daten) beschrieben.

Atlasblätter

1.2





3.2.1.1 Eingangsdaten

Ziel: Auflistung der Bohrdatentypen

Kurzbeschreibung

Aufbereitung von Bohrdaten für den Aufbau des geologischen 3D-Modells und des geothermischen 3D-Modells sowie für Geopotenzialauswertungen

Eingangsdaten

Auszüge aus den Bohrdatenbanken bzw. den Archiven der Projektpartner

Beschreibung

Der Datensatz einer Bohrung kann je nach Aufschlusszweck und Untersuchungsprogramm neben den obligatorischen Stammdaten (Name, Lagekoordinaten des Bohransatzpunktes, Endteufe etc.) weitere Informationen enthalten wie z.B.:

- lithologische Schichtbeschreibung
- Fossil-, Pollen-, mineralogische oder petrographische Untersuchungen
- stratigraphisches (Kurz-)Profil
- geophysikalische Bohrlochmessungen (z.B. Widerstands-, Eigenpotenzial-, Gamma- Log, Geophonversenkungsmessung)
- Pump- oder Fördertests
- Temperaturmessungen
- hydrochemische Untersuchungen der Fluide im Bohrloch
- petrophysikalische Untersuchungen (z.B. Wärmeleitfähigkeit, Dichte)

Die verwendeten Bohrungen stammen hauptsächlich aus der Kohlenwasserstoff- und Kalisalzerkundung sowie von Geothermieprojekten (nicht in Rheinland-Pfalz) und der Förderung von Grundwasser. Zusätzlich wurden zur Informationsverdichtung weitere Bohrungen aus den Archiven der Projektpartner hinzugenommen.





3.2.1.2 Harmonisierung von Stammdaten

Ziel: Länderübergreifende Harmonisierung der Stammdatensätze

Kurzbeschreibung

Prüfprozeduren für Stammdatensätze der Bohrungen

Eingangsdaten

Auszüge aus den Bohrdatenbanken bzw. den Archiven der Projektpartner

Beschreibung

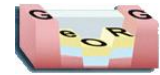
Die Stammdaten (Name, Lagekoordinaten des Bohransatzpunktes, Endteufe, Bohrpfad etc.) der Bohrungen aus den verschiedenen Ländern/Bundesländern wurden von den jeweiligen Projektpartnern in Excel-Tabellen oder Shapefiles zusammengestellt und gegebenenfalls überprüft.

Die Lagekoordinaten von Bohrungen aus Frankreich und der Schweiz wurden in Gauß-Krüger Zone 3 Koordinaten transformiert (vgl. Kapitel 3.1.3).

Alle Stammdaten wurden mit einheitlichen Attributen in einem Shapefile zusammengeführt.

Der Import in Gocad erfolgte als Ascii-Datei (Import Objects - Well Data - Path - Column-based file).





3.2.1.3 Harmonisierung von Schichtdaten

Ziel: Länderübergreifende Harmonisierung der Schichtdatensätze

Kurzbeschreibung

Prüfprozeduren für Schichtdatensätze der Bohrungen

Eingangsdaten

Excel-Tabellen oder Gocad Bohrungsobjekte der Projektpartner

Beschreibung

- länderübergreifende Harmonisierung von 17 lithostratigraphischen Horizonten (Details in Kap. 2.2.1)

Für eine projektgebietsweit einheitliche Interpretation muss sichergestellt werden, dass mit gleichen Namen gleiche lithostratigraphische Einheiten bezeichnet werden. Dies ist besonders für die känozoische Grabenfüllung von Bedeutung, denn hier wurden im Laufe der langen Forschungsgeschichte sowohl gleiche Namen für unterschiedliche lithostratigraphische Einheiten benutzt, als auch gleiche lithostratigraphische Einheiten mit verschiedenen Namen bezeichnet. Seit 2008 wurde in der Projektgruppe daher eine aktualisierte, grenzübergreifende lithostratigraphische Nomenklatur für die känozoischen Sedimente erarbeitet (Wielandt-Schuster et al. 2012). Die vorhandenen Schichtenverzeichnisse der verwendeten Bohrungen wurden unter Berücksichtigung dieser Nomenklatur durchgesehen und z.T. neu interpretiert.

- Schichtdaten wurden dezentral von den Projektpartnern verwaltet und mit Hilfe eines allgemeinen Standards ausgetauscht (s. 3.2.1.4).

Literaturhinweise

Wielandt-Schuster et al. (2012)



3.2.1.4 Austauschformat für Stamm- und Schichtdaten

Ziel: Definition eines länderübergreifenden Austauschformats für Stamm- und Schichtdaten

Kurzbeschreibung

Beschreibung eines länderübergreifenden Austauschformats für Stamm- und Schichtdaten für den Datenaustausch zwischen den Projektpartnern

Eingangsdaten

Bohrstamm- und Schichtdaten

Beschreibung

Für den Austausch von Stamm- und Schichtdaten zwischen den Projektpartnern wurde folgendes Ascii-Austauschformat definiert.

Stammdaten:

Well ID	name of the well	X_GK3	Y_GK3	Depth/ sea level	Deviation	Total depth
ABR1	ABWAENDER	3429338	5418991	129.2	N	888.00
ALT1	ALTENSTADT-1	3424216	5432724	155	N	1240.00
ARM1	ARTZENHEIM-1	3390816	5331349	184	N	1136.00

Well ID: eindeutiger Identifizierer der Bohrung (Archivnummer)

Name of Well: Name der Bohrung

X: Rechtswert in Gauß-Krüger Zone 3

Y: Hochwert in Gauß-Krüger Zone 3

Depth/sea level: Höhe der Bohransatzpunkts in m NN

Deviation: Abgelenkter Bohrfad (Ja/Nein)

Total Depth: Endteufe der Bohrung in Bohrmeter

Bohrfad (Details für abgelenkte Bohrungen):

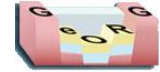
Well ID	Measured depth	Deviation angle	Direction of well path deviation
7512	50	0	0
7512	87	1	12
7512	123	1	34
7512	161	0.9	8

Well ID: eindeutiger Identifizierer der Bohrung (Archivnummer)

Measured depth: Position der Ablenkmessung in Bohrmeter

Deviation angle: Abweichungswinkel der Bohrung von der Senkrechten (zwischen 0-180°)

Direction of well path deviation: Richtung der Abweichung (zwischen 0°-359°)



Bohrmarker:

Well ID	Depth of the geol marker	Geol marker	Additional comments
1266	9	[bff]	
1266	303	T_CR	
1266	441	T_Eoc	
1266	550	[bt]	jm
1266	551	T_Aal	
1266	570	T_LMLia	
1266	706	[bju]	
1266	725	T_MKp	
1266	910	T_Let	
1266	940	[bku]	
1266	1117	[bmu]	
1266	1157	Total_Depth	

Well ID: eindeutiger Identifizierer der Bohrung (Archivnummer)

Depth of geol marker: Tiefe des Bohrmarkers (Stratigraphie, Tektonik) in Bohrmeter

Geol marker: Name des Bohrmarkers (Auswahlliste, in eckigen Klammern GeORG Modellhorizonte)

Additional comments: Bemerkungsfeld

Die Bohrungsinformationen können auf dieser Grundlage in die GIS- und 3D-Modellierungssoftware importiert werden.



3.2.1.5 Aufbereitung von Geophonversenkungsmessungen

Ziel: Aufbereitung von Geophonversenkungsmessungen für den Aufbau eines Geschwindigkeitsmodells

Kurzbeschreibung

Datenquellen für Geophonversenkungsmessungen und deren Aufbereitung für den Aufbau eines Geschwindigkeitsmodells

Eingangsdaten

Geschwindigkeitsmessungen aus den Archiven der Projektpartner und der Kohlenwasserstoffdatenbank des LBEG (KW DB)

Beschreibung

Ein Großteil der Geophonversenkungsmessungen (GVM, engl. Check Shots) wurde bereits in der Kohlenwasserstoffdatenbank (KW DB) des LBEG zusammen getragen. Diese Daten liegen digital vor. Analoge Daten (Graphen, Geschwindigkeitstabellen) ergänzen die Geschwindigkeitslogs. Die Graphen mussten zunächst gescannt und digitalisiert (in ArcGIS) werden. Analoge Geschwindigkeitstabellen wurden in digitale Form überführt.

Die Daten liegen für den Import in die Modellierungssoftware in folgendem Format vor:

id	name	survey_id	depth [m]	owt [msec]	quelle
6417	Weinheim 101	1	210.50	115.3	kwdb
6417	Weinheim 101	1	255.50	138.9	kwdb
6417	Weinheim 101	1	305.50	163.6	kwdb
6417	Weinheim 101	1	345.50	180.8	kwdb
6417	Weinheim 101	1	395.50	204.1	kwdb
6417	Weinheim 101	1	460.50	232.2	kwdb
6417	Weinheim 101	1	498.50	248.1	kwdb
6417	Weinheim 101	1	570.50	278.8	kwdb
6417	Weinheim 101	1	625.50	301.1	kwdb

id: eindeutiger Identifizierer der Bohrung (Archivnummer)

name: Name der Bohrung

survey_id: Version der Messung (>1, falls mehr Geschwindigkeitsmessungen existieren)

depth[m]: Position der Geschwindigkeitsmessung in Bohrmeter

owt[msec]: One-Way Travel Time in ms (Einweglaufzeit)

Quelle: Datenquelle

Falls Mehrfachmessungen vorlagen, wurde der gemittelte Wert benutzt.

Die Angaben über die Messtiefe sind in den Originalunterlagen häufig vertikalisiert angegeben. Da sie für den Import in Gocad jedoch in Bohrmeter vorliegen müssen, ist eine Rückrechnung nötig.



3.2.2 2D-Darstellungen

Ziel: Aufbereitung von 2D-Darstellungen als Datengrundlage für das geologische 3D-Modell

Kurzbeschreibung

Datenquellen für 2D-Darstellungen und deren Aufbereitung für die geologische 3D-Modellierung

Eingangsdaten

Geologische Karten, Profilschnitte, Schichtlagerungskarten, Mächtigkeitsverteilungen, Digitale Geländemodelle

Beschreibung

Für das geologische 3D-Modell wurden verschiedene 2D-Daten für den Import in die 3D-Modellierungssoftware vorbereitet:

- Die Geologische Karte im Maßstab 1:50 000 setzt sich aus im Rahmen von GeORG harmonisierten Einzeldatensätzen der Projektpartner zusammen. Sie liefert den Geländeausstrich der GeORG-Modelleinheiten.
- Aus Bohrungen und Seismik abgeleitete Profilschnitte geben eine Übersicht über die verschiedenen Modellvorstellungen von Vorgängerprojekten und der Literatur.
- Schichtlagerungskarten beschreiben die Raumlage von Horizonten und das tektonische Inventar
- Mächtigkeitsverteilungen bilden eine Grundlage für die Modellierung mesozoischer Horizonte
- Digitale Geländemodelle (DGM) fließen bei der Modellierung direkt als Horizont in das geologische 3D-Modell ein



3.2.2.1 Geologische Karte

Ziel: Erstellung von Datensätzen zur oberflächlichen Verbreitung und Lagerung der Modellhorizonte im Projektgebiet, Eingangsdaten für die geologische 3D-Modellierung, Produkterstellung

Kurzbeschreibung

Aufbereitung geologischer Daten der Projektpartner und Verwendung zur Erstellung von Ergebniskarten bzw. Produkten aus GeORG

Eingangsdaten

s. 3.2.2.1.1

Beschreibung

Im Rahmen der geologischen Landesaufnahme werden von den Staatlichen Geologischen Diensten der beteiligten Projektpartner geowissenschaftliche Kartenwerke erstellt und digital vorgehalten. Die gesammelten Daten geben vor allem Informationen über die Verbreitung der Gesteinsschichten an der Erdoberfläche, über deren Beschaffenheit und Alter (Stratigraphie) sowie über die Lagerungsverhältnisse und das Auftreten von Störungen (Tektonik).

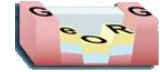
Insbesondere für die geologische 3D-Modellierung, die sich im Wesentlichen auf Bohr- und Seismikdaten stützt, stellen Daten aus den geologischen Kartenwerken eine wichtige Zusatzinformation dar. Daher wurden die aktuellen, für den im Projekt angestrebten Maßstab relevanten geologischen Daten gesammelt (s. 3.2.2.1.1), stratigraphisch harmonisiert und durch weitere GIS-Bearbeitung vereinheitlicht (s. 3.2.2.1.2). Sie bilden die Grundlage für das Atlasblatt 1.4 (Geologische Karte).

Nach der Zusammenführung der geologischen Daten mit den aus der geologischen 3D-Modellierung gewonnenen Ergebnissen (insbesondere Störungsverläufe im Grabeninneren) konnten die Daten zur Erstellung des Atlasblatts 1.5 (Tektonische Übersichtskarte GeORG) verwendet werden. Als weiteres Produkt wurde unter Verwendung der Daten die Geologische Karte des Oberrheingrabens im Bearbeitungsgebiet des GeORG-Projekts im Maßstab 1 : 300 000 erstellt und veröffentlicht.

Atlasblätter

Atlasblätter 1.4 und 1.5, Geologische Karte des Oberrheingrabens im Bearbeitungsgebiet des GeORG-Projekts im Maßstab 1 : 300 000





3.2.2.1.1 Eingangsdaten für die Geologische Karte

Ziel: Sammlung von Eingangsdaten für die Erstellung von Datensätzen zur oberflächlichen Verbreitung der Modellhorizonte und Störungen im Projektgebiet

Kurzbeschreibung

Auflistung verwendeter geologischer Kartenwerke

Eingangsdaten

Geologische Kartenwerke (Details s.u.)

Beschreibung

Für die Erstellung der Datensätze zur oberflächlichen Verbreitung und Lagerung der Modellhorizonte im Projektgebiet wurden folgende Daten aus geologischen Kartenwerken der beteiligten Staatlichen Geologischen Dienste bzw. in der Schweiz des Bundesamts für Landestopografie verwendet:

Baden-Württemberg:

Integrierte Geowissenschaftliche Landesaufnahme
Baden-Württemberg (GeoLa)

Frankreich:

Carte géologique 1 : 50 000 France

Hessen:

Geologische Karte 1 : 25 000 Hessen

Rheinland-Pfalz:

Geologische Karte 1 : 25 000 Rheinland-Pfalz

Schweiz:

Geologischer Atlas der Schweiz 1 : 25 000 und
Geologische Karte der zentralen Nordwestschweiz 1 : 100 000

Länderübergreifend:

Digitale Geologische Übersichtskarte 1 : 300 000 (2004)

Die Datensätze liegen bei den Dateneigentümern sämtlich in digitaler Form als Flächenobjekte (oberflächliche Verbreitung von Gesteinseinheiten) bzw. als Linienobjekte (Störungen) vor. Zum Teil werden die Daten auch in Form von Webdiensten angeboten.



3.2.2.1.2 Harmonisierung der Datensätze

Ziel: Harmonisierung der Eingangsdaten für die Erstellung von Datensätzen zur oberflächlichen Verbreitung und Lagerung der Modellhorizonte im Projektgebiet

Kurzbeschreibung

Attributierung der Eingangsdaten mit den im Projekt definierten Modelleinheiten

Koordinatentransformation

Topologische Bereinigung und weitere GIS-Bearbeitungsschritte zur Vereinheitlichung der Daten

Eingangsdaten

s. 3.2.2.1.1

Beschreibung

Die Bearbeitung der in 3.2.2.1.1 aufgelisteten Eingangsdaten erfolgte in drei separaten Datensätzen: (1) Verbreitung von Modelleinheiten (Polygon), (2) Äolische Ablagerungen (Polygon) und (3) Störungen (Linien).

(1) Verbreitung von Modelleinheiten (Polygon)

Attributierung: Anhand der aktuell gültigen stratigraphischen Schlüssellisten der beteiligten Partner (z.B.: LGRB 2012) und unter Berücksichtigung der neu entwickelten und in den bundesweiten Symbolschlüssel eingearbeiteten Stratigraphie für die känozoischen Ablagerungen des Oberrheingrabens (LBEG 2013) erfolgte die Attributierung der Eingangsdaten mit den im Projekt definierten Modelleinheiten (s. Kap. 2.2.1). Gewässerflächen, anthropogene geomorphologische Objekte (i.W. Rohstoffabbauflächen, anthropogene Aufschüttungen bzw. anthropogen verändertes Gelände) und Karbildungen wurden der umgebenden geologischen Einheit zugeordnet und im Falle mehrerer benachbarter Einheiten geometrisch zugeschnitten.

Koordinatentransformation: Eingangsdaten aus Frankreich und der Schweiz wurden mit den in Kap. 3.1.3.1 beschriebenen Methoden der Koordinatentransformationen in ArcGIS in das Koordinatenreferenzsystem DHDN Gauß-Krüger Zone 3 überführt.

Topologie: Geometrien wurden auf Überlappungsbereiche und Lücken hin überprüft und bereinigt. Durch die geometrischen Anpassungen, Generalisierungen und topologischen Bereinigungen gibt der Datensatz flächendeckende Informationen über die Verbreitung der Modellhorizonte im Projektgebiet wieder. Eine vollständige Übereinstimmung mit den Geometrien der Eingangsdatensätze besteht nicht.

(2) Äolische Ablagerungen (Polygon)

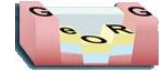
Auswahl und Attributierung: Um im Grabenbereich äolische Ablagerungen von Sedimenten der Grabenbildung differenzieren zu können, wurden aus den Eingangsdaten Objekte rein äolischen Ursprungs (i.W. Löss und Flugsande) abgefragt und zu einem Datensatz zusammengestellt. Fluvial oder gravitativ umgelagerte äolische Ablagerungen gingen nicht in den Datensatz ein.

Im hessischen Anteil des Projektgebiets wurden die Informationen aus der Geologischen Karte 1 : 25 000 Hessen mit Flächen aus der Digitalen Geologischen Übersichtskarte 1 : 300 000 (2004) ergänzt.

Koordinatentransformation: Eingangsdaten aus Frankreich und der Schweiz wurden mit den in Kap. 3.1.3.1 beschriebenen Methoden der Koordinatentransformationen in ArcGIS in das Koordinatenreferenzsystem DHDN Gauß-Krüger Zone 3 überführt.

Topologie: Geometrien wurden auf Überlappungsbereiche hin bereinigt. Der Datensatz gibt damit Informationen über die Verbreitung äolischer Ablagerungen im Projektgebiet wieder. Eine vollständige





Übereinstimmung mit den Geometrien der Eingangsdatensätze besteht nicht.

(3) Störungen (Linien)

Auswahl und Attributierung: Störungen und geologische Linienobjekte wurden aus den Eingangsdaten mit einem zusätzlichen Attribut belegt, um Hauptstörungen separieren und die Daten maßstabsabhängig besser visualisieren zu können. Zusätzliche Attribute der Eingangsdaten wurden nicht mitgeführt. Zur eindeutigen Beschreibung und Identifikation erhielten wichtige Hauptstörungen regional etablierte Benennungen. Die Störungen dienten als Eingangsdatensatz für die 3D-Modellierung. Als Layer für das Atlasblatt 1.5 wurde der Datensatz im Grabenbereich mit den aus dem geologischen 3D-Modell erstellten Störungsverläufen aktualisiert.

Koordinatentransformation: Eingangsdaten aus Frankreich und der Schweiz wurden mit den in Kap. 3.1.3.1 beschriebenen Methoden der Koordinatentransformationen in ArcGIS in das Koordinatenreferenzsystem DHDN Gauß-Krüger Zone 3 überführt.

Topologie: keine topologische Überprüfung.

Die Datensätze wurden als wichtige Zusatzinformation bei der geologischen 3D-Modellierung sowie zur Erstellung der Atlasblätter 1.4 (Geologische Karte GeORG) und 1.5 (Tektonische Übersichtskarte GeORG) verwendet. Als weiteres Produkt wurde unter Verwendung der Daten die Geologische Karte des Oberrheingrabens im Bearbeitungsgebiet des GeORG-Projekts im Maßstab 1 : 300 000 erstellt und veröffentlicht.

Literaturhinweise

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (2012), Regierungspräsidium Freiburg - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2012)

Atlasblatt

1.4, Geologische Karte des Oberrheingrabens im Bearbeitungsgebiet des GeORG-Projekts im Maßstab 1 : 300 000



3.2.2.1.3 Weiterführende Kartendarstellungen

Ziel: Sammlung und Aufbereitung von Informationen aus weiterführenden geologischen Kartendarstellungen

Kurzbeschreibung

Auflistung von verwendeten weiterführenden geologischen Kartendarstellungen (zusätzlich zu Eingangsdaten der Geologischen Karte (s. Kap. 3.2.2.1), Aufbereitungsschritte zur Digitalisierung

Eingangsdaten

s. Beschreibung

Beschreibung

Ergänzend zur Geologischen Karte des GeORG-Projektgebiets (s. Kap. 3.2.2.1) wurden weitere Kartendarstellungen zur Beurteilung der geologischen Situation genutzt, u.a.:

- analoge geologische Karten (GK25, GK50)
- Subcropkarten für die Tertiärbasis (GLA/BRGM 1979, GLA 1981)
- tertiäre Steinsalzvorkommen im Südteil des Projektgebiets (Lutz & Cleintuar 1999)
- geophysikalische Karten: Darstellung der Bouguer-Anomalien (Skiba et al. 2010) und der Magnetfeldanomalien (Gabriel et al. 2010)

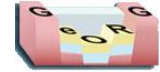
Aufbereitung:

- Scan, Ablage im *.jpg oder *.tif Format
- Georeferenzierung in ArcGIS
- im Bedarfsfall Digitalisierung von Störungsspuren und Grenzen geologischer Einheiten
- Import in Gocad (als georeferenziertes Voxet und bei vorheriger Digitalisierung als Shapefile)
- Ablage der georeferenzierten Kartendarstellungen, Shapefiles und Gocadobjekte

Literaturhinweise

GLA/BRGM (1979), GLA (1981), Lutz & Cleintuar (1999), Skiba et al. (2010), Gabriel et al. (2010)





3.2.2.2 Profilschnitte und Line Drawings

Ziel: Sammlung und Aufbereitung von Informationen aus Profilschnitten und Auswertungen geophysikalischer Messungen

Kurzbeschreibung

Auflistung von verwendeten Profilschnitten und Auswertungen geophysikalischer Messungen (Geoelektrik, Altseismik)

Eingangsdaten

s. Beschreibung

Beschreibung

Profilschnitte spielen für die Darstellung des tektonisch komplexen Aufbaus des Oberrheingrabens eine zentrale Rolle. Folgende Profilschnitttypen wurden im Rahmen des GeORG-Projekts aufbereitet:

- Geologische Profilschnitte: Vertikal orientierte Profilschnitte spielen für die Darstellung des tektonisch komplexen Aufbaus des Projektgebiets eine zentrale Rolle.
- Auswertungen geophysikalischer Messungen (v.a. geoelektrische Messungen, Homilius et al. 2003)
- Sog. "Line Drawings" (interpretierte Störungen und Horizonte aus Altseismik, etwa 600 Line Drawings auf baden-württembergischer Seite)

Die Line Drawings liegen in der Regel in der Tiefendomäne in Papierform vor. Für ihre Aufbereitung kam folgender Workflow zur Anwendung:

- Scan der Papiervorlage und Ablage im *.jpg oder *.tif Format
- Zuschnitt auf die innere Profilschnittbegrenzung
- Gocadimport als Bild und Georeferenzierung (s. 3.5.2.4)
- Digitalisierung von Fault sticks und Horizonten als Gocad Linienobjekte
- Umrechnung von Line Drawings von Teufe in Zeit mit dem kampagnenspezifischem Bezugsniveau und Geschwindigkeitsangaben
- Andere Profilschnitte außer Line Drawings wurden zunächst in der Tiefendomäne belassen und nur im Bedarfsfall in die Zeitdomäne mit dem Geschwindigkeitsmodell 1 (s. Kap. 3.5.8.1) konvertiert.
- Im Schweizer Teilgebiet wurden geologische Profile aus folgenden Arbeiten verwendet: Della Valle (1981), Gürler et al. (1987), Laubscher (2005). Die Profile wurden teilweise mit neuen Daten überarbeitet, angepasst und für den Import nach Gocad aufbereitet
- Ablage der Profilschnitte, Line Drawings und digitalisierten Elemente im Gocadformat (Voxets und PLines)

Literaturhinweise

Della Valle (1981), Gürler et al. (1987), Homilius et al. (2003), Laubscher (2005)



3.2.2.3 Schichtlagerungskarten

Ziel: Sammlung und Aufbereitung von Informationen aus Schichtlagerungskarten

Kurzbeschreibung

Workflow für die Aufbereitung von Schichtlagerungskarten als Datengrundlage für die geologische 3D-Modellierung

Eingangsdaten

Schichtlagerungskarten aus der Literatur und Projekten der GeORG-Partner

Beschreibung

Für das GeORG-Projekt wurden u.a. folgende Isohypsenkarten genutzt:

- Geothermische Synthese des Oberrheingrabens (GLA/BRGM 1979, GLA 1981)
- Boigk, H. & Schöneich, H. (1970)
- Pflug (1982)
- Wirsing & Luz (2007)

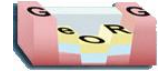
- Schichtlagerungskarten in Verbindung mit Seismikkampagnen (hauptsächlich für ältere Kampagnen mit Line Drawings)

- Schichtlagerungskarten aus weiteren geophysikalischen Erkundungen (Archive des LGRB, BRGM)

Die Schichtlagerungskarten liegen meistens in Papierform vor. Bei hausinternen Projekten stehen zudem digitale Daten (i.d.R. Shapefiles) zur Verfügung. Für Papierkarten gilt folgender Workflow:

- Zuordnung der auf der Karte abgebildeten geologischen Raumlageinformation zur GeORG-Schichtenfolge
- Scannen und Georeferenzierung in ArcGIS und ggf. Umrechnung ins Referenzkoordinatensystem (s. Kap. 3.1.3 Koordinatensysteme)
- Digitalisierung in ArcGIS:
 - Isohypsen im Referenzsystem (m unter Gelände oder m NN) als Linien
 - Störungen als Linien oder Polygone
 - Belegpunkte als Punkte
 - Verbreitung des Horizonts / Datenlücken als Polygon
 - zusätzliche geologische Informationen wie Faziesverteilungen etc.
- optional: Griderzeugung aus Isohypsen vor Gocadimport in ArcGIS oder ArcView 3.3
- Import der Shapefiles, Grids und georeferenzierten Karten in Gocad
- ggf. Anpassung des vertikalen Bezugssystems von m unter Gelände in m über NN mit Hilfe des digitalen Geländemodells
- bei Grids: Erstellen von Flächenobjekten durch direkte Triangulation der Gridpunkte (*Surface - New - From PointsSet*)
- falls Verbreitungspolygone vorhanden sind, Verschnitt der Gocadflächen (*Surface - Tools - Cut By Curves*)
- falls Belegpunkte vorhanden sind, Überprüfung der Schichtlagerung und ggf. lokale Modifizierung





- die Schichtlagerungskarten und abgeleiteten Gocadobjekte wurden zunächst in der Tiefendomäne belassen und nur im Bedarfsfall in die Zeitdomäne mit dem Geschwindigkeitsmodell 1 (s. Kap. 3.5.8.1) konvertiert

- Ablage der georeferenzierten Schichtlagerungskarten, der digitalisierten Shapefiles und der digitalisierten Elemente im Gocadformat

Literaturhinweise

Boigk & Schöneich (1970), Pflug (1982), Wirsing & Luz (2007)



3.2.2.4 Mächtigkeitsverteilungen

Ziel: Sammlung und Aufbereitung von Informationen aus Mächtigkeitsverteilungen

Kurzbeschreibung

Workflow für die Aufbereitung von Mächtigkeitsverteilungen als Datengrundlage für die geologische 3D-Modellierung

Eingangsdaten

Mächtigkeitdarstellungen aus hausinternen Projekten und der Literatur

Beschreibung

Die Mächtigkeitsverteilungen geologischer Einheiten werden häufig in Isopachenform dargestellt. Für das GeORG-Projekt wurden u.a. folgende Quellen genutzt:

- Bartz (1974)
- Boigk & Schöneich (1970), Boigk & Schöneich (1974)
- Rupf & Nitsch (2008)
- Wirsing & Luz (2007)

Die Mächtigkeitsverteilungen liegen meistens in Papierform vor. Bei hausinternen Projekten stehen zudem digitale Daten (i.d.R. Shapefiles) zur Verfügung. Für Papierkarten gilt folgender Workflow:

- Scan und Georeferenzierung
- Digitalisierung in ArcGIS (Isopachen als Linien, synsedimentäre Störungen als Linien oder Polygone, Belegpunkte als Punkte, Verbreitung/Nichtverbreitung, Datenlücken als Polygone)
- optional: Griderzeugung in GIS-Software, Umwandlung in ein Punktshape
- Import von Isolinien und Gridpunkten als Shapefile in Gocad (*Import Objects - Cultural Data - ArcView Shape*)
- für die weitere Verarbeitung der Mächtigkeitinformationen Zuweisung der Mächtigkeitwerte der Punkte bzw. der Isopachenwerte der Linien zur Z-Koordinate
- Erstellen von Flächenobjekten durch direkte Triangulation der Gridpunkte (*Surface - New - From PointsSet*)
- falls Verbreitungspolygone vorhanden sind, Verschnitt der Gocadflächen (*Surface - Tools - Cut By Curves*)
- falls Belegpunkte vorhanden sind, Überprüfung der Mächtigkeitangaben und ggf. lokale Modifizierung

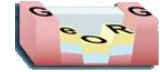
Im Schweizer Teilgebiet wurden Mächtigkeitverteilungskarten aus folgenden Arbeiten verwendet: Bitterli (1992) und Reisdorf et al. (2011). Die Karten wurden mit neuen Daten überarbeitet, angepasst und für den Gocadimport aufbereitet.

- Ablage des georeferenzierten Scans, der digitalisierten Shapefiles und der Gocadobjekte (TSurfs)

Literaturhinweise

Bartz (1974), Bitterli (1992), Boigk & Schöneich (1974), Reisdorf et al. (2011), Rupf & Nitsch (2008), Wirsing & Luz (2007)





3.2.3 Digitale Geländemodelle

Ziel: Sammlung und Aufbereitung von Informationen aus digitalen Geländemodellen

Kurzbeschreibung

Auflistung und Aufbereitung von verwendeten digitalen Geländemodellen

Eingangsdaten

SRTM (Auflösung: 77,6 m), BW: Digitales Geländemodell Baden-Württemberg (Auflösung: 1 m), Digitales Geländemodell Rheinland-Pfalz (Auflösung: 20 m), Schweizer Teilmodell: DHM25 – Matrixmodell (Auflösung 25 m)

Beschreibung

Als Basisgeländemodell für den gesamten Projektraum wurden aufbereitete SRTM-Daten (Bezugsquelle CGIAR: <http://srtm.csi.cgiar.org/>) mit einer Pixelgröße von 77,6 m verwendet.

Für verschiedene Aufgabenstellungen innerhalb des Workflows ist ein Resampling der Daten auf folgende Pixelgrößen erforderlich:

- 100 m: Grundlage für Produktgrids
- 500 m: Grundlage für das geostatistische Temperaturmodell
- 1000 m: Grundlage für die geologische 3D-Modellierung (Ausnahmen s.u.)

Für Teilbereiche des geologischen 3D-Modells, v.a. im Randschollengebiet mit verstärkter Geländemorphologie, kamen länderspezifische DGM mit höherer Auflösung zum Einsatz:

- Schweizer Teilmodell: DHM25 (Bezugsquelle swisstopo: <http://www.swisstopo.admin.ch/>) auf der Grundlage Topographischer Karten im Maßstab 1 : 25 000; Auflösung 25 m, Genauigkeit: mittlere Abweichung 1,5 m)
- Baden-Württemberg: Digitales Geländemodell Baden-Württemberg (Bezugsquelle LGL: <http://www.lgl-bw.de/> auf der Grundlage von Laserscan-Befliegungen mit einer horizontalen Auflösung von 1 m) umgerechnet auf 25 m Rasterweite für das Gebiet des Istein-Blocks sowie 90 m und 200 m auf den Kartenblättern 8110 bis 8413 auf SRTM-Grundlage
- Rheinland-Pfalz: Digitales Geländemodell Rheinland-Pfalz (Bezugsquelle LV RLP: <http://www.lvermgeo.rlp.de/>) mit einer horizontalen Auflösung von 20 m. Für die geologische 3D-Modellierung in Rheinland-Pfalz wurde ein Resampling des Geländemodells auf eine Rasterweite von 120 m durchgeführt

Die digitalen Geländemodelle liegen in der Regel als ArcInfo-Grids vor. Für den Import in Gocad ist eine vorherige Umwandlung in ein Shapefile oder einen AsciiDatensatz notwendig.

In Gocad lassen sich die DGM-Punktobjekte mit Hilfe direkter Interpolation zu Flächen (*Surface - New - From PointsSet*) triangulieren.

Externe Links

<http://srtm.csi.cgiar.org/>

<http://www.swisstopo.admin.ch/>

<http://www.lgl-bw.de/>

<http://www.lvermgeo.rlp.de/>



3.2.4 Geologische 3D-Modelle

Ziel: Sammlung und Aufbereitung von Informationen aus geologischen 3D-Modellen

Kurzbeschreibung

Auflistung und Aufbereitung von verwendeten geologischen 3D-Modellen

Eingangsdaten

Geologische 3D-Modelle

Beschreibung

Für Teilbereiche des GeORG-Projektgebiets liegen bereits geologische 3D-Modelle vor:

- Baden-Württemberg: Landesmodell (Gocad-Horizontmodell, Rupf & Nitsch 2008, LGRB), ISONG1 Modell (Gocad-Horizontmodell, Rupf & Armbruster 2008, bis 400m Tiefe)
- Frankreich: Soultz sous Forêts (Geomodeller-Horizontmodell, Dezayes et al 2009, BRGM), Dannemariebecken (Gocad-Horizontmodell, Ford et al. 2007, ENSG Nancy)
- Schweiz: Basel (Zechner et al. 2001), MuttENZ-Pratteln (Spotke et al. 2005), Gempen (Butscher & Huggenberger 2007)
- Rheinland-Pfalz: Bienwaldmodell (LGB RLP 2010)
- Hessen3d im Nordosten an das GeORG-Gebiet angrenzend (Gocad-Horizontmodell, Arndt et al. 2011, TU Darmstadt im Auftrag des HLUg)

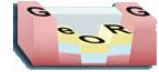
Vor der Nutzung in Gocad sind ggf. folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Umwandlung GeoModeller-Modells von Soultz-sous-Forêts in das Gocadformat (in GeoModeller)
- für Deutschland und Frankreich: Koordinatentransformation der Gocadobjekte in das Gauß-Krüger System Zone 3 (s. Kap. 3.1.3.2)
- da das Störungsmuster des französischen und deutschen Teils des GeORG-Modells in der Zeitdomäne modelliert wurde, war für den Abgleich von Störungen eine Konvertierung der Störungen und Horizonte mit dem Geschwindigkeitsmodell 1 (s. Kap. 3.5.8.1) notwendig

Im Schweizer Teilgebiet wurden alle Modelle evaluiert und die für GeORG verwendeten Horizonte und Störungen anhand neuer Daten aktualisiert.

Technische und inhaltliche Restriktionen:

- Die Modellhorizonte unterscheiden sich teilweise von den GeORG ausgewerteten geologischen Einheiten. Teilweise setzen die Modelle auf einen inhomogenen Bohrdatenbestand auf, was zu bereichsweisen Inkonsistenzen führt.
- Die französischen Detailmodelle beruhen auf der Auswertung von Seismikdaten und wurden daher zunächst in der Zeitdomäne erstellt und nachfolgend in die Tiefendomäne konvertiert. Da das Geschwindigkeitsmodell für die Konvertierung im Detail nicht bekannt ist, ist eine Rückführung der Modelle in die Zeitdomäne in der Regel fehlerbehaftet.
- Übersichtsmodelle sind in der Regel zu grob für einen direkten Vergleich der Horizontpositionen und des strukturgeologischen Inventars



- Die Auflösung der Detailmodelle, insbesondere des tektonischen Inventars, ist häufig genauer, als die Eingangsdatensätze des GeORG-Modells zulassen. Die tektonischen Strukturen sind daher nicht validierbar und führen im Übergang zum GeORG-Modell zu Problemen.

Literaturhinweise

Arndt et al. (2011), LGB RLP (2010), Butscher & Huggenberger (2007), Dezayes et al. (2009), Ford et al. (2007), Rupf & Armbruster (2008), Rupf & Nitsch (2008), Spottke et al. (2005), Zechner et al. (2001)



3.2.5 Seismikprozessierung

Ziel: Digitalisierung, Homogenisierung und Migration von gestapelten 2D-reflexionsseismischen Abspielungen sowie Reprozessierung von 2D-reflexionsseismischen Rohdaten für einen vergleichbaren, digitalen Datenbestand

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Arbeitsschritte für eine Digitalisierung, Homogenisierung und Migration von 2D-reflexionsseismischen Abspielungen aus Deutschland und Reprozessierung von 2D-reflexionsseismischen Rohdaten aus Frankreich für einen vergleichbaren, digitalen Datenbestand

Eingangsdaten

Deutschland: Papiervorlagen von 2D-reflexionsseismischen Abspielungen (gestapelt oder migriert), Frankreich: Rohdaten von 2D-reflexionsseismischen Abspielungen

Beschreibung

Für das GeORG-Projekt wurden rund 5350 km 2D-reflexionsseismische Abspielungen aus den Archiven der Projektpartner aufbereitet. Voraussetzung für eine gemeinsame Interpretation von 2D-Seismikdaten ist eine Homogenisierung des Eingangsdatenbestands. Aufgrund der unterschiedlichen Datenlage in Deutschland und Frankreich gestalten sich die Arbeitsabläufe je nach Herkunft der Seismikprofile unterschiedlich.

Aufbereitung deutscher Seismikprofile

- Eingangsdatenbestand: 201 Profile (1928 km) für Baden-Württemberg, 217 Profile (1736 km) für Rheinland-Pfalz als Papiausdruck; Profile sind entweder gestapelt oder bereits migriert

- Vorbereitende Arbeitsschritte:

- Scan und Ablage im *.tif Format
- Scan der Lagepläne, Digitalisierung der Seismiklinien und Berechnung von CM-Punkten
- Ermittlung der statischen Parameter (Bezugsniveau, Korrekturgeschwindigkeit)
- Ermittlung der Stapelgeschwindigkeiten (nur für gestapelte Profile)

- Digitalisierung der gestapelten Profile mit CMP-Koordinaten und Ablage im SEG-Y Format

- Homogenisierung der Seismiklinien:

- Homogenisierung auf ein Bezugsniveau von 150 m NN
- Filterung zur Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses
- Amplitudenhomogenisierung für ein einheitliches Amplitudenbild

- Migration der Seismiklinien (nur gestapelte Profile)

- nachfolgendes Versetzen der Linien um 500 ms nach unten, um bei Geländehöhen über 150m NN negative Z-Werte zu verhindern

Aufbereitung französischer Seismikprofile

- Eingangsdatenbestand: digitale Rohdaten von 61 Profilen (726 km) sowie 81 Profile (963 km), die einem Vorgängerprojekt aufbereitet und zu 25 Regionalprofilen zusammengefasst wurden

- Aktualisierung der Geometrie (CMP-Koordinaten in Lambert 2 etendu sowie im Gauß-Krüger 3 System)

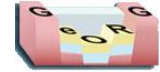
- manuelle Korrektur ungültiger oder gestörter Profile

- Kompensation der sphärischen Divergenz (Amplitudenkorrektur)

- Abschwächung von Störsignalen

- Minimum-Phase Filter für Vibratoren





- Dekonvolution
- Korrektur der Grundstatik mit einem geologischen Modell
- zwei Iterationen von dynamischen Geschwindigkeitsmessungen und statische Korrekturen
- Verbesserung der Kohärenz
- DMO-Geschwindigkeitsanalyse zur Korrektur der räumlichen Verzerrung
- Entfernen von Störsignalen mit der Mutfunktion
- Amplitudenausgleich
- DMO-Stapelung
- Bandpassfilter
- Poststack-Migration
- nachfolgendes Versetzen der Linien um 500 ms nach unten, um bei Geländehöhen über 150m NN negative Z-Werte zu verhindern
- Zusammensetzen von Regionalprofilen

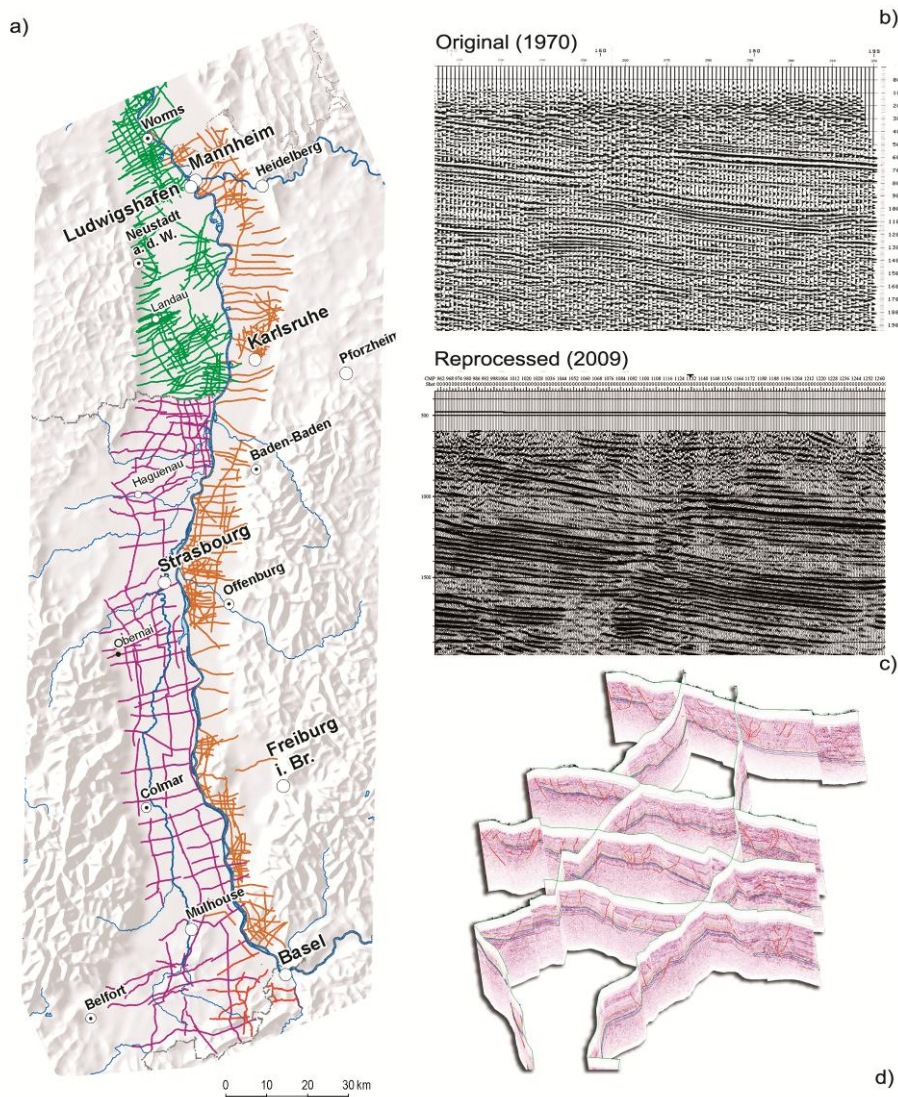


Abb. 3.2.5-1: Processed seismic profiles, examples of original and reprocessed seismic profiles, seismic profiles in 3d-space

Literaturhinweise

Yilmaz (1987)



Das vorliegende Dokument ist Teil des „Fachlich-Technischen Abschlussberichts - Teil 3“ des INTERREG IV-Projekts „GeORG – Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“.

Der komplette Bericht (Teil 1-4) ist unter www.geopotenziale.eu zum Download bereit gestellt.



3.2.6 Hydrogeologische Daten

Ziel: Erstellung einer homogenen Datenbasis für die Auswertung hydrogeologischer Daten

Kurzbeschreibung

Sammlung und Aufbereitung relevanter Daten für die Geopotenzialbewertung (Temperaturen, Hydrochemie, Porositäten und Permeabilitäten, Wärmeleitfähigkeiten), unter Verwendung einer Access Datenbank

Eingangsdaten

Temperatur-, Poro/Perm-, Hydrochemie- und Wärmeleitfähigkeitsdaten der Projektpartner (soweit vorhanden)

Beschreibung

Für eine Bewertung von Geopotenzialen im tieferen Untergrund spielen eine Reihe von Parametern eine wichtige Rolle, u. a. hydrogeologische Daten. Die von den Projektpartnern bereitgestellten Daten zu

- Temperatur
- Porosität und Permeabilität
- Hydrochemie
- Wärmeleitfähigkeit

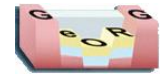
wurden erfasst, homogenisiert und in einer projektinternen Access-Datenbank abgelegt.

Das Kapitel 3.2.6 beschreibt für jeden Datentyp die Datengrundlage sowie Aufbau und Logik der Datenbank.

Kapitelverweise

3.3 (Auswertung hydrogeologischer Daten)





3.2.6.1 Datenbank

Ziel: Schaffung einer Struktur zur Verwaltung der umfangreichen Datenquellen und -typen und zur Homogenisierung der Auswertung

Kurzbeschreibung

Aufbau einer Access-Datenbank mit hydrogeologischen Daten um die Auswertung der Daten zu erleichtern.

Eingangsdaten

Temperatur-, Hydrochemie-, Porositäts-, Permeabilitäts- und Wärmeleitfähigkeitsdaten

Beschreibung

Entwicklung eines logischen Datenbankmodells und Erstellung eines physischen Datenbankschemas in MS Access für hydrogeologische Daten und dazu gehörige Stammdaten (Temperaturen, Hydrochemie, Porositäten, Permeabilitäten, Wärmeleitfähigkeiten).

Erläuterung der Eingangsdatensätze, des physischen Datenbankschemas und der Aufbereitung der Daten für die Auswertung.



3.2.6.1.1 Struktur und Logik

Ziel: Erstellung einer Datenbankstruktur für hydrogeologische Daten

Kurzbeschreibung

Entwicklung eines logischen Datenbankmodells und Erstellen des physischen Datenbankschemas in MS Access für hydrogeologische Daten und deren Stammdaten

Eingangsdaten

Stammdaten der Bohrungen mit Messungen, Messwerte Temperatur, Hydrochemie, PoroPerm, Wärmeleitfähigkeit

Beschreibung

Logisches Datenbankmodell: Abtrennung von grundlegenden Informationen der Bohrungen in Stammdaten und der Daten der eigentlichen Messwerte, Festlegung von Pflichtfeldern, Datentypen und Wertebereiche aufgrund der Eingangsdaten.

Physisches Datenbankschema in MS Access:

Tabelle Stammdaten: ID (eindeutige fortlaufende Nummer als Schlüsselfeld für die Temperatur- bzw. Chemie-Tabellen), Name (eindeutiger Name der Bohrung), Partner-ID (Datenlieferant), Rechtswert, Hochwert, Koordinatensystem, Lage der Bohrung (Bundesland/Kanton/Departement), Höhe ([m NN]), Endteufe ([m]), Zweck der Bohrung, Freigabe, Bemerkung; TK25-Blattnummer (bei Daten aus BW und RP), ADB-Nummer (Bohrdatenbank des LGRB, bei Daten aus BW), FIS-GP Nummer (Fachinformationssystem Geophysik des LIAG), KW-DB Nummer (Kohlenwasserstoff-Datenbank des LIAG), BSS-Nummer (ID der französischen Bohrdatenbank „infoterre“)

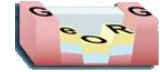
Datenübernahme:

- Definition Koordinatensystem als Gauß-Krüger Zone 3: nur die im Schweizer Koordinatensystem gelieferten Daten mussten umgerechnet werden
- Import der Daten mit Angabe der Quell-Dateien sichern die Rückverfolgbarkeit
- Zusammenführen der mehrfach vorhandenen Bohrungen: grundsätzlich wurden die Daten behalten, die im dem Land des Datenlieferanten liegen. Bei Inkonsistenzen zwischen den Geologie- und Hydrogeologie-Stammdaten wurden die Werte der ersteren verwendet. Die Schlüssel-Nummern der Originaldaten wurden ebenfalls gespeichert.

Kapitelverweise

- Aufbereitung von Bohrdaten (3.2.1)
- Aufbereitung von Temperaturdaten (3.2.6.1.2)
- Aufbereitung von Hydrochemiedaten (3.2.6.1.3)





3.2.6.1.2 Temperatur

Ziel: Beschreibung der Datenquellen, Erfassung der Temperaturdaten in der Datenbank, Aufbereitung der Daten für die 3D-Temperaturmodellierung

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Datenquellen, Nennung der Parameter, Vorstellung Workflow zur Aufbereitung des Datensatzes zur Weiterverwendung für die 3D-Modellierung

Eingangsdaten

Temperaturdaten der Projektpartner aus unterschiedlichen Quellen

Beschreibung

Datenquellen:

- Baden-Württemberg: Daten aus dem Fachinformationssystem Geophysik (Kühne 2006) (Stand 10/2011), Daten aus Bohrarchiv und Labordatenbank des LGRB, Daten aus anderen Projekten (GeoTool, unveröffentlicht)
- Rheinland-Pfalz: Daten aus dem Fachinformationssystem Geophysik (Kühne 2006) (Stand 08/2010, ergänzt 03/2012)
- Frankreich: Carré (2011), Bohrarchiv des BRGM
- Schweiz: Temperaturdaten aus Literaturrecherchen BGA Region Basel 15 (2011)

Physisches Datenbankschema in MS Access:

Pflichtfelder: ID (Schlüsselfeld zu den Stammdaten-ID), Messtiefe [m u Geländeoberfläche], Ort der Datenquelle, Messart (Log, BHT, Fördertest usw.), Datenherr

Weitere Felder: Datum der Messung, Roh Temperatur, korrigierte Temperatur bzw. Temperatur die nicht korrigiert wird (Endtemperatur), Standzeit, Art der Korrektur, Bohrdurchmesser ([inch] bzw. [m]), Rohrdurchmesser ([inch] bzw. [m]), Logart, Freigabe/Vertraulichkeit, Oberflächentemperatur (aus FIS-GP), Datenquelle, Bemerkung

Datenübernahme:

- Import der Daten mit Angabe der Quell-Dateien sichern die Rückverfolgbarkeit
- Zusammenführen der mehrfach vorhandenen Bohrungen (gleicher Wert in gleicher Messtiefe, meist mit gleichem Zeitstempel): Entfernen von Temperaturwerten mit „<“ oder „>“-Angaben, Übernahme der französischen Daten wie geliefert, Übernahme eines beliebigen Rohwertes bei Vorliegen unterschiedlicher Rohwerte, aber einheitlichem Endwert und gleicher Messtiefe, Übernahme nur der BHT-Werte, wenn Temperaturwerte aus gestörten Logs und korrigierten BHTs nicht plausibel zusammenpassen.

Literaturhinweise

Carré (2011), Kühne (2006), BGA Region Basel 15 (2011)



3.2.6.1.3 Hydrochemie

Ziel: Beschreibung der Datenquellen, Erfassung der Hydrochemiedaten in der Datenbank, Aufbereitung der Daten für die Auswertung

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Datenquellen, Nennung der Parameter

Eingangsdaten

Hydrochemiedaten der Projektpartner aus unterschiedlichen Quellen

Beschreibung

Datenquellen:

- Baden-Württemberg: Labordatenbank des LGRB, ergänzend Daten aus weiteren Projekten (Speicher-Kataster, GeotIS etc.)
- Rheinland-Pfalz: Werte aus Grundwasser- und Mineralwasserdatenbank des LGB
- Frankreich: Daten aus dem Projekt GeotIS (Jodocy & Stober 2007), ergänzend Daten aus der Geothermieanlage Saultz-sous-Forêts (Sanjuan et al. 2010)
- Schweiz: keine Daten vorhanden

Physisches Datenbankschema in MS Access:

- Chemische Stammdaten:

Pflichtfelder: ID (Schlüselfeld zu Stammdaten-ID), Chemie-ID, Stratigraphie, Nummer der Stratigraphie im neuen geologischen Symbolschlüssel, Messtiefe

Weitere Felder: Messdatum, weitere Stratigraphie-Felder, Bemerkung

- Messdaten: Chemie-ID (Schlüselfeld zu den chemischen Stammdaten), Bemerkung, 99 Parameter

Datenübernahme:

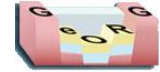
- Definition der Parameter/Elementverbindungen und Einheiten der Labordatenbank als Ziel

- Import der Daten mit Angabe der Quell-Dateien sichern die Rückverfolgbarkeit

- Zusammenführen der mehrfach vorhandenen Bohrungen: grundsätzliche Übernahme der Daten aus der Labordatenbank, Zusammenfassung aller Parameter in einen Datensatz bei doppelten Datensätzen, Umrechnung von Einheiten, Übernahme der GeotIS-Projektdateien als „mg/l“ bei Angabe „mg/kg“

Literaturhinweise

Sanjuan (2010), Jodocy & Stober (2007)



3.2.6.2 Wärmeleitfähigkeiten

Ziel: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Festgesteinsproben aus Kernbohrungen

Kurzbeschreibung

Messung der Wärmeleitfähigkeit trockener und wassergesättigter Festgesteinsproben von 148 Kernbohrungen aus dem Projektgebiet (System Popov)

Beschreibung

Anhand der Messvorrichtung „Thermoscanner“ (System Popov, Popov et al. 1999) wurde die Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsproben jeweils im trockenen und wassergesättigten Zustand und zur Berücksichtigung der Anisotropie jeweils in zwei Raumrichtungen gemessen.

I. Aufbereitung des Probenmaterials

- Sägen eines Probenwürfels - Einheitsgröße der Probenkörper $d/\varnothing = 5$ cm mit $l \geq d$ bzw. \varnothing ($l:d \geq 1:1$)
- Segment wird längs zur Bohrkernachse abgesägt und muss eine glatte Oberfläche aufweisen
- Anstrich des Probekörpers mit schwarzem Lack; Dicke des Anstriches: mind. 7 mm

Probenaufbereitung für die Messung im trockenen Zustand:

Trocknen der Probenkörper bei $T = 70^\circ\text{C}$ (entsprechend den einschlägigen DIN(-EN) Normen für Natursteinprüfung bis zur Massenkonstanz)

Probenaufbereitung für die Messung im wassergesättigten Zustand:

Sättigung der Probenkörper mit Leitungswasser unter atmosphärischem Druck entsprechend den einschlägigen DIN(-EN) Normen für Natursteinprüfung bis zur Massekonstanz

Probenkörper werden mit Leitungswasser 60 ± 5 min bis zur halben Höhe, anschließend 60 min bis dreiviertel der Probenhöhe und schließlich unter 25 ± 5 cm Wasserüberdeckung vollständig gelagert.

Nach 48 ± 2 h werden die Probenkörper entnommen, mit einem feuchten Tuch oberflächlich abgewischt und umgehend auf 0,01 g genau gewogen.

Wiederholung der Vorgehensweise alle 24 ± 2 h bis Massenkonstanz der Wassersättigung erreicht ist, d.h. dass die Differenz zwei aufeinanderfolgender Wägungen innerhalb von $24 \text{ h} \leq 0,1 \text{ M.-%}$ beträgt

II. Beschreibung des Messverfahrens

- Auswahl der Standards entsprechend den zu erwartenden λ -Werten
- Sensorjustierung: Vermessung des Standards mit dem höheren λ -Wert mit dem „hot“ und „cold sensor“
- Auflegen des Standards mit dem höheren λ -Wert am Beginn und des Standards mit dem niedrigeren λ -Wert am Ende der Messstrecke
- Entnahme der Probekörper aus dem Wasserbad, oberflächliches Abwischen mit einem feuchten Tuch und Auflegen auf der Messstrecke zwischen den beiden Standards
- Zur Berechnung von λ wird ein auszuwertender Messbereich des Signals der Probe gewählt, welcher charakterisierend für seine Struktur steht. Anfang und Ende des Signals werden aufgrund von „Randeffekten“ nicht berücksichtigt.

Literaturhinweise

Popov et al. (1999)



3.2.6.3 Porositäten und Permeabilitäten

Ziel: Bestimmung der Parameter „Porosität“ und „Permeabilität“

Kurzbeschreibung

Darstellung der Bestimmungsmethoden für die Parameter „Porosität“ sowie „Permeabilität“ aus Bohrkernen

Beschreibung

Der Datenbank liegen insgesamt 2989 Messwerte (1850 Mittelwerte, 546 Min-Werte, 593 Max-Werte) aus 176 Messpunkten zu dem Parameter „Porosität“ und 1763 Messwerte (1196 Mittelwerte, 236 Min-Werte, 331 Max-Werte) aus 117 Messpunkten zu dem Parameter „Permeabilität“ vor. Die Messwerte wurden im Rahmen des Projektes aus verschiedenen Quellen zusammen getragen und homogenisiert; eigene Messungen und erneute Berechnungen wurden im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt.

Diese Parameter wurden auf verschiedene Art und Weise ermittelt (Kurzdarstellung s.u.); auf die einschlägige Fachliteratur wird verwiesen. Eine Zuordnung zu den einzelnen Messverfahren ist jedoch nicht in allen Fällen gegeben bzw. nachvollziehbar. Hinweise, ob In-Situ-Messungen über eine größere Messtrecke oder punktuelle Messungen mit Laborverfahren vorliegen, ergeben sich teilweise aus den angegebenen Messverfahren oder lassen sich teilweise aus den angegebenen Probenahmetiefen ableiten.

Zur Porosität ist darauf hinzuweisen, dass je nach Messverfahren nicht der gesamte Hohlraumanteil erfasst werden kann, sondern nur eine Teilmenge davon bis hin zur lediglichen Ermittlung des durchflusswirksamen Hohlraumanteiles.

Zur Permeabilität ist darauf hinzuweisen, dass je nach Messverfahren die Gesteinsdurchlässigkeit (Matrixporosität, durch Laborverfahren) oder Gebirgsdurchlässigkeit (Doppelporosität, i.d.R. durch In-Situ-Messverfahren) erfasst wird

A Porosität:

1. In-Situ-Messungen im Bohrloch

a. Logs

- Sonic-Log
- Dichte-Log
- Neutron-Log
- Widerstand-Log
- Mikrolateral-Log

b. Hydraulische Tests

2. Labormessungen

- a.- Wägung von Proben im trockenen und wassergesättigten Zustand
- b. Quecksilber- und Gaspyknometrie

B Permeabilität

1. In-Situ-Messungen im Bohrloch

- 1.1 Pumpversuche/Pumptests
- 1.2 Slug-Bail-Test
- 1.3 Drill-Stem-Test

2. Labormessungen

- 2.1 Permeabilitätsmessungen mit k_f - Zelle, KD-Gerät bzw. Triaxialzelle





3.3 Auswertung hydrogeologischer Daten

Ziel: Aussagen zum Geopotenzial im Projektgebiet

Kurzbeschreibung

Einleitung zum Kapitel über die Auswertung hydrogeologischer und geothermischer Daten im Projektgebiet (Temperatur, Hydrochemie, Poro/Perm, Wärmeleitfähigkeit)

Eingangsdaten

Temperatur, Hydrochemie, Porosität, Permeabilität, Wärmeleitfähigkeit

Beschreibung

Für die Abschätzung der Geopotenziale im Projektgebiet wurden unterschiedliche hydrogeologische und geothermische Daten ausgewertet. Nach der Aufbereitung der Daten (siehe Kapitel 3.2.6) standen umfangreiche Datensätze zur Auswertung zur Verfügung. Den umfangreichsten Datensatz stellen dabei die Temperaturdaten da, deren Auswertung im Zuge der Erstellung des Geothermischen 3D-Modells erfolgte, und daher ausführlich in Kapitel 3.6 (Geothermisches 3D-Modell) beschrieben wird.

Neben den Temperaturdaten wurden Daten zur Hydrochemie, zu Porositäten und Permeabilitäten sowie zu Wärmeleitfähigkeiten ausgewertet.

Eine Auswertung hydraulischer Rohdaten fand in diesem Projekt nicht statt, da bereits umfangreiche Arbeiten u. a. im Projekt GeotIS erfolgten (Stober & Jodocy 2009).

Literaturhinweise, Externe Links

Stober & Jodocy (2009)

Kapitelverweise, Interne Links

3.2.6





3.3.1 Temperatur

Ziel: Aussagen über die geothermischen Verhältnisse im Untergrund

Kurzbeschreibung

Auswertung von Temperaturdaten

Eingangsdaten

Temperaturdatensatz aus der Projekt-Datenbank

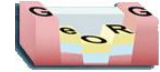
Beschreibung

Die Auswertung der Temperaturdaten erfolgte im Rahmen der Erstellung des 3D-Temperaturmodells und ist daher ausführlich im Kapitel „Geothermisches 3D-Modell“ beschrieben.

Kapitelverweise, Interne Links

3.6





3.3.2 Hydrochemie

Ziel: Aussagen über die hydrochemischen Verhältnisse im Untergrund

Kurzbeschreibung

Auswertung von Hydrochemiedaten

Eingangsdaten

Hydrochemiedatensatz aus Projekt-Datenbank

Beschreibung

Die hydrochemische Auswertung ist fokussiert auf die Grundwässer in verschiedenen möglichen Nutzhorizonten, und zwar in den Schichten des Tertiärs, des Mitteljuras (Hauptrogenstein), des Oberen Muschelkalks, des Buntsandsteins und Perms sowie die Grundwässer im Grundgebirge. Da sowohl in den Schichtfolgen des Tertiärs als auch des Muschelkalks Einschaltungen von Steinsalz vorhanden sind, liegen häufig hochmineralisierte Wässer (Solen) vor, die ihre wesentliche Charakteristik hauptsächlich aus der Lösung von Steinsalz beziehen.

Die vorliegenden chemischen Analysen wurden von verschiedenen Laboren überwiegend an tiefen Grundwässern ausgeführt. Die untersuchten Wässer wurden je nach Fragestellung nicht in allen Fällen mit höchster Präzision durchgeführt. Teilweise sind sie als Übersichtsanalysen zu bewerten. Einzelne chemische Bestandteile wurden teilweise nicht bestimmt oder lediglich zusammengefasst dokumentiert. Ionenbilanzen ($\text{Fehler (\%)} = \frac{|\sum \text{Kationen} - \sum \text{Anionen}|}{(\sum \text{Kationen} + \sum \text{Anionen})} \cdot 100$) können daher nicht oder nur eingeschränkt erstellt werden. Bei vollständigen Analysen zeigen sich teilweise bemerkenswerte Bilanzabweichungen, die einer zuverlässigen Bestimmung des Wassertyps entgegenstehen. Für die Auswertung wurden daher ganz überwiegend Analysen verwendet, die hinsichtlich der Ionenbilanz als vertrauenswürdig anzusehen sind. Nach LAWA (1993) wird bei Wässern mit einer Ionensumme von ≥ 5 mmol(eq)/l ein akzeptabler Bilanzfehler von ± 5 % empfohlen.

Die chemische Beschaffenheit der Wässer wurde für die einzelnen Nutzhorizonte in jeweils einem SCHOELLER-Diagramm dargestellt. Die Anzahl der synoptisch dargestellten Analysen wurde auf maximal 15 begrenzt, um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Die Variationsbreite der hydrochemischen Beschaffenheit der dargestellten Wässer ist daraus klar ersichtlich (siehe Tab. 3.3.2-1).



Tab. 3.3.2-1: Übersichtstabelle Ionenbilanz / Wassertyp

Bohrung (Kurzbezeichnung)	Datum	Ionenbilanz [%]	Ionenbilanz (Betrag) [%]	Wassertyp
Tertiär				
Leopoldshafen 1	08.04.1954	-2.01	2.01	Na-Cl
Leopoldshafen 2	16.07.1957	-4.22	4.22	Na-Cl
Leopoldshafen 3	18.08.1957	-3,01	3,01	Na-Cl
Leopoldshafen 4	04.05.1959	0.06	0.06	Na-Cl
Leopoldshafen 5 A	01.02.1980	-0.43	0.43	Na-Cl
Leopoldshafen 13	22.06.1959	-0.27	0.27	Na-Cl
Leopoldshafen 14a	04.03.1959	-0.41	0.41	Na-Cl
Neureut 2 H	04.09.1954	0.05	0.05	Na-Cl
Weingarten 306	12.05.1960	-0.25	0.25	Na-Cl
Sandhausen 3	12.01.1959	-0.94	0.94	Na-Cl
Sandhausen 3	24.01.1959	-0,13	0,13	Na-Cl
Sandhausen 3	24.01.1959	-6.65	6.65	Na-Cl
Hauptrogenstein				
Blodelsheim Hardt Nord 1	28.10.1953	-0.03	0.03	Na-Cl
Galtingue 1	31.03.1957	-0.04	0.04	Na-Cl
Krafft 1	12.06.1955	-0.03	0.03	Na-Cl
Meistratzheim 2	08.07.1974	3.12	3.12	Na-Cl
Rixheim 1	19.05.1959	1.38	1.38	Na-Ca-Cl
Schaeffersheim 2	08.03.1971	-1.01	1.01	Na-Ca-Cl
Staffelfelden 1	31.08.1960	-5.85	5.85	Na-Cl
Zimmersheim 1	19.04.1956	-9.14	9.14	Na-Cl
Offenburg 9	19.09.1982	-0.02	0.02	Na-Cl
Tb Efringen-Kirchen 1970	08.06.2006	-2.79	2.79	Na-Cl
Freiburg TB 3 Moos 2 neu	11.02.1997	-1.29	1.29	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -SO ₄
Schliengen 1	19.06.1980	-0.17	0.17	Na-Ca-Cl-HCO ₃
Markusqu Bad Bellingen 1	11.04.2002	-0.96	0.96	Na-Ca-Cl
Leodegar Bad Belling II	08.10.2001	-1.08	1.08	Na-Ca-Cl
Bad Bellingen III	08.10.2001	-0.71	0.71	Na-Ca-Cl
Oberer Muschelkalk				
Eschau 1	07.05.1955	46.13	46.13	Na-Cl
Staffelfelden 9	17.03.1955	-0.03	0.03	Na-Cl
St. Lambertus Schönborn	13.12.1974	-1.28	1.28	Na-Cl
Tb 1 Bad Krozingen Kath	20.03.1961	-2.76	2.76	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃
Tb 2 Bad Krozingen Ther	28.01.1964	-0.94	0.94	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃





Tb 3 Bad Krozingen	27.05.2008	-0.85	0.85	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃
Tb 4 Bad Krozingen	27.05.2008	-0.77	0.77	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃
Freiburg TB 2 Mooswald 1	27.05.2008	-0.41	0.41	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃
Bad Bellingen III	10.07.1973	-6.08	6.08	Ca-Cl-HCO ₃
Tb II Badenweiler	27.10.2003	1.59	1.59	Ca-SO ₄ -HCO ₃
Buntsandstein Perm				
Geothermie Bruchsal 1a	01.10.2004	-3.37	3.37	Na-Cl
Geothermie Bruchsal 2	27.10.2005	-0.49	0.49	Na-Cl
Cronenbourg 1	19.11.1980	0.04	0.04	Na-Cl
Eschau 1	25.05.1955	-0.06	0.06	Na-Cl
Meistratzheim 2	08.07.1974	-0.16	0.16	Na-Cl
Muntzenheim 1	01.04.1978	-1.36	1.36	Na-Cl
Maxquelle Bad Dürkheim	09.08.1957	-0.22	0.22	Na-Cl
Maxqu (Neu) Bad Dürkhe	10.02.1987	-2.02	2.02	Na-Cl
Thermalb III Badenweiler	11.05.2009	0.53	0.53	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄
Marienbronn 101	06.04.1982	11.47	11.47	Na-HCO ₃ -SO ₄
Grundgebirge				
Geothermiebohrung Bühl 1		2.99	2.99	Na-Cl
Soultz GPK2	16.11.1997	-5.39	5.39	Na-Ca-Cl
Pflutterloch 1/1965	16.07.2003	-3.55	3.55	Na-Cl
Pflutterloch 2/1966	16.07.2003	-2.79	2.79	Na-Cl
Tb 1/73 Berghaupten	23.03.1973	-0.20	0.20	Na-Cl-HCO ₃ -SO ₄

Literaturhinweise

LAWA (1993)



Das vorliegende Dokument ist Teil des „Fachlich-Technischen Abschlussberichts - Teil 3“ des INTERREG IV-Projekts „GeORG – Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“.

Der komplette Bericht (Teil 1-4) ist unter www.geopotenziale.eu zum Download bereit gestellt.

3.3.3 Porosität und Permeabilität

Ziel: Statistische Auswertung der für das Projektgebiet vorhandenen Porositäts- und Permeabilitätsdaten

Kurzbeschreibung

Die für den Projektbeginn vorhandenen Porositäts- und Permeabilitätsdaten wurden hinsichtlich einer stratigraphischen, petrographischen, flächenhaften bzw. teufenbezogenen Zuordnung statistisch ausgewertet.

Eingangsdaten

Porositätswerte, Permeabilitätswerte

Beschreibung

Für das Projektgebiet liegen insgesamt zur Porosität 1878 Messungen in Form von Mittelwerten aus 51 Probenahmestellen und 1196 Messungen zur Permeabilität in Form von Mittelwerten aus 101 Probenahmestellen vor. Etwa 34 Prozent der gemessenen Probekörper/Messstrecken stammen aus Kernstücken aus Tiefbohrungen, 12 Prozent aus LOG-Aufzeichnungen und für etwa 51 Prozent der Bohrungen liegen keinerlei Informationen zur Probeart vor. Die restlichen Messwerte wurden an Hand von Proben aus Bohrklein (Cuttings) oder einer Mischung aus Bohrkernen und LOG-Aufzeichnungen entnommen.

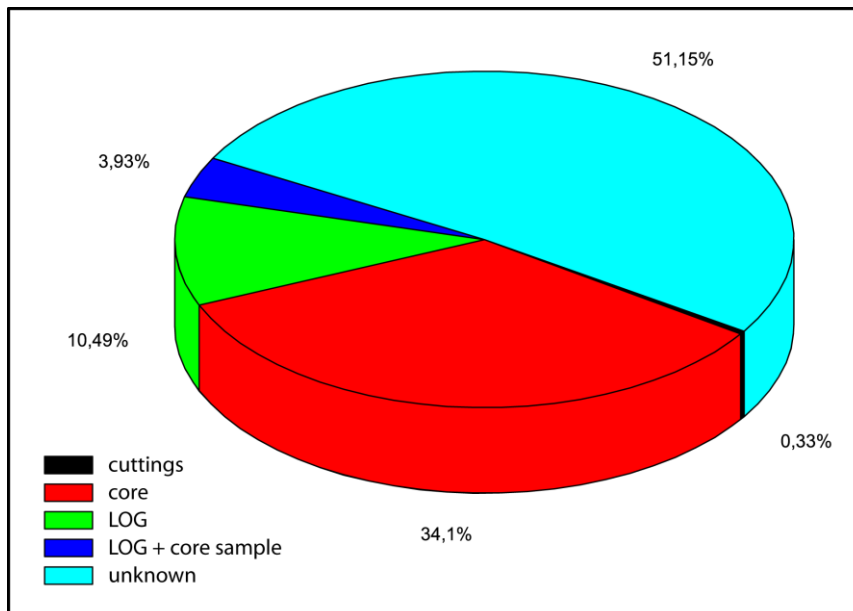


Abb. 3.3.3-1: Probenahmestellen/Messstrecken – Aufschlusstyp

Für 98 Prozent der Probekörper/Messstrecken ist die Probenahmetiefe bekannt (s. Abb. 3.3.3-2). 66 Prozent der Messungen stammen aus Frankreich, 19 Prozent aus Baden-Württemberg und 15 Prozent aus Rheinland-Pfalz; aus dem schweizerischen Landesteil liegen keine Messwerte vor. Allerdings sind die Belegpunkte im Projektgebiet ungleich verteilt, und in vielen Bohrungen wurden mehrfache Messwerte teilweise innerhalb einzelner stratigraphischer Abfolgen ermittelt. So konzentrieren sich 1852 Messwerte in Frankreich auf 238 Aufschlüsse, in Baden-Württemberg 535 Messwerte auf 36 Aufschlüsse und in Rheinland-Pfalz 403 Messwerte auf 31 Aufschlüsse (s. Abb. 3.3.3-3).

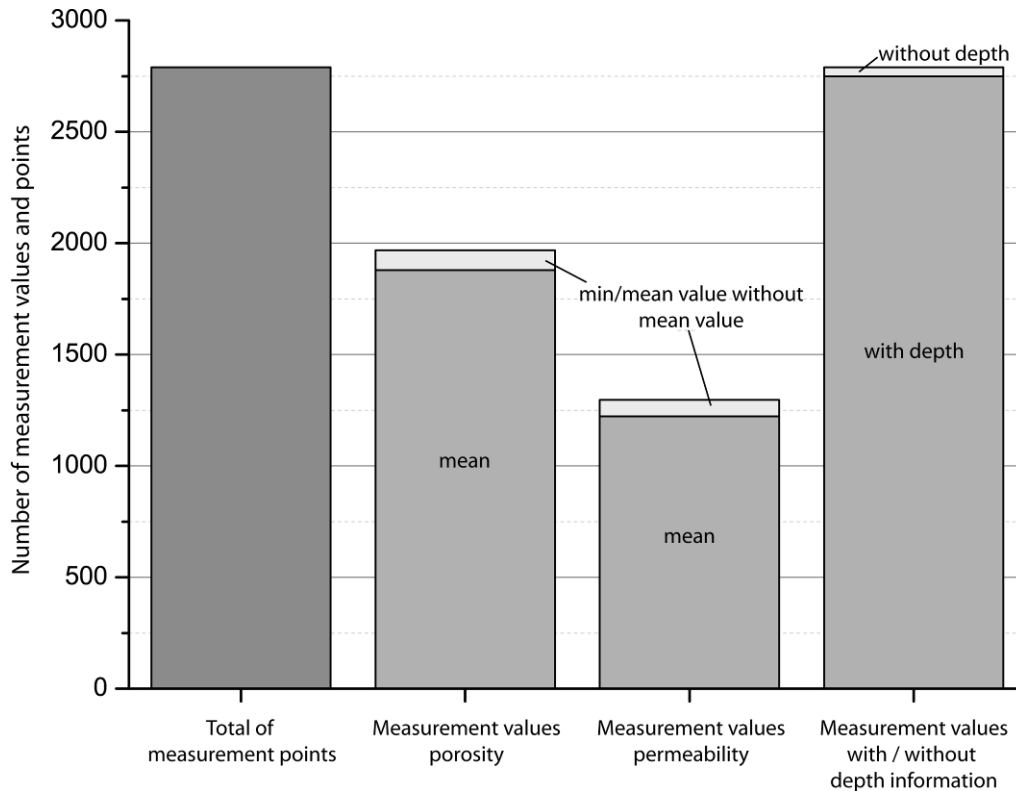
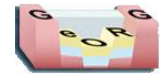


Abb. 3.3.3-2: Qualität der Messwerte

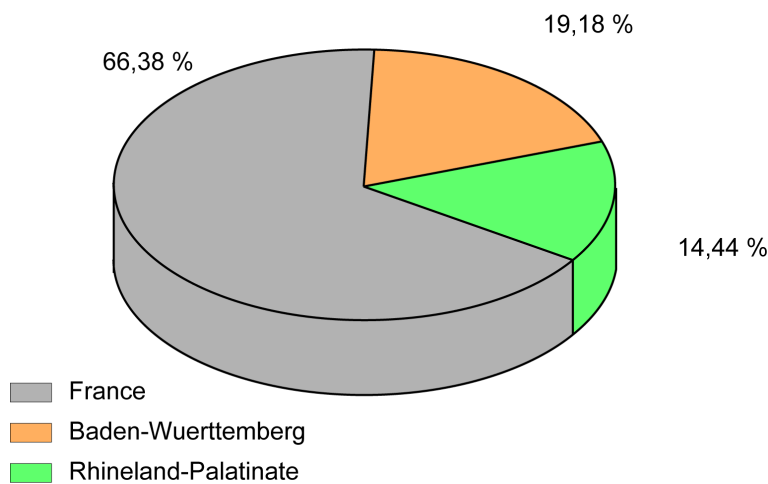


Abb. 3.3.3-3: Verteilung der Messwerte auf die einzelnen Landesflächen im Projektgebiet.

Bei der Betrachtung der Messwerte ist zu beachten, dass die Messungen in verschiedenen Messverfahren durchgeführt wurden (siehe Kapitel 3.2.6.3); vielfach liegen jedoch keine Informationen zum verwandten Messverfahren vor, was die Vergleichbarkeit erschwert.

Je nach Messverfahren (Labor bzw. In-Situ-Messung) und Probenart (gestört/ungestört) werden Matrixporosität oder Gesamthohlraumvolumen (Porenvolumen und Kluftvolumen) bestimmt. Eine Differenzierung ist mangels oftmals fehlender Angaben über die Messmethode vielfach nicht möglich; vereinfacht wird, wo nicht ausdrücklich abweichend gekennzeichnet, daher im Rahmen des Projektes und der Umgangssprache („PorPerm“) folgend undifferenziert von Porosität gesprochen.



Abhängig von der Lithologie der Gesteine, der Kompaktion, der Zementation sowie des Gefüges schwanken die Porositätsmesswerte (nur Mittelwerte) zwischen 0,02 und 45,4 % bei einem Median von 11,4 % (s. Abb. 3.3.3-4a). Zu beachten ist, dass sich die Gesamtporosität von dem durchflusswirksamen Hohlraumvolumen unterscheidet, wobei der durchflusswirksame Hohlraumanteil je nach Haftwasseranteil und Adsorptionswasseranteil um Größenordnungen geringerer Werte aufweisen kann.

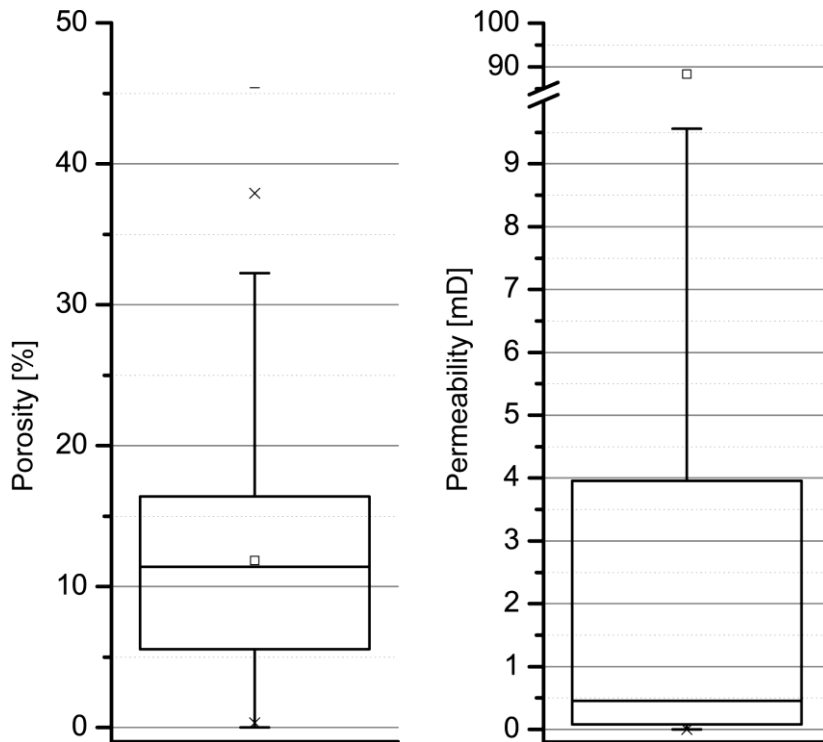


Abb. 3.3.3-4: Spannbreiten der Porositäts- (4a) und Permeabilitätswerte (4b).

Die Permeabilitätsmesswerte schwanken zwischen $9 \cdot 10^{-6}$ mD und 6905 mD (s. Abb. 3.3.3-4; der Maximalwert von 6905 mD wurde zur besseren Darstellung in das Diagramm nicht mit aufgenommen).

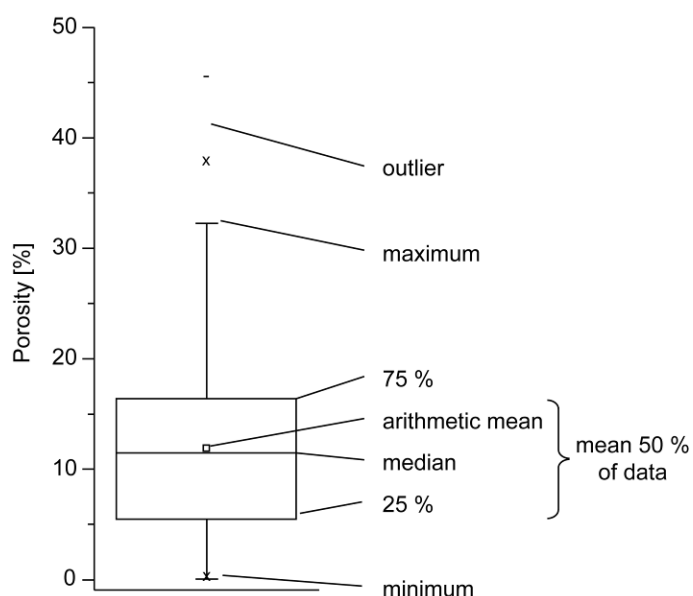
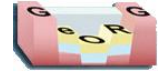


Abb. 3.3.3-5: Erläuterungen der Kastengrafiken (Box-Whisker-Plot).



Auch hier ist die Probenart sowie die Messmethode entscheidend, inwieweit rein die Gesteinsdurchlässigkeit (Matrixdurchlässigkeit) oder die Gebirgsdurchlässigkeit (Gesteinsdurchlässigkeit und Trennflächendurchlässigkeit, basierend auf Doppelporosität) ermittelt wurde; eine Differenzierung ist jedoch auch hier wegen vielfachen Mangels an Kennung oftmals nicht möglich.

Die Porositäts- und Permeabilitätswerte wurden nach Einspeisung in die Datenbank statistisch ausgewertet. Folgende statistische Auswertungen/Darstellungen wurden hierbei erstellt.



Verteilung der Porositäts- und Permeabilitätswerte in der Tiefe

Abb. 3.3.3-6a und 3.3.3-6b zeigen die Verteilung der Porositäts- und Permeabilitätswerte in der Tiefe.

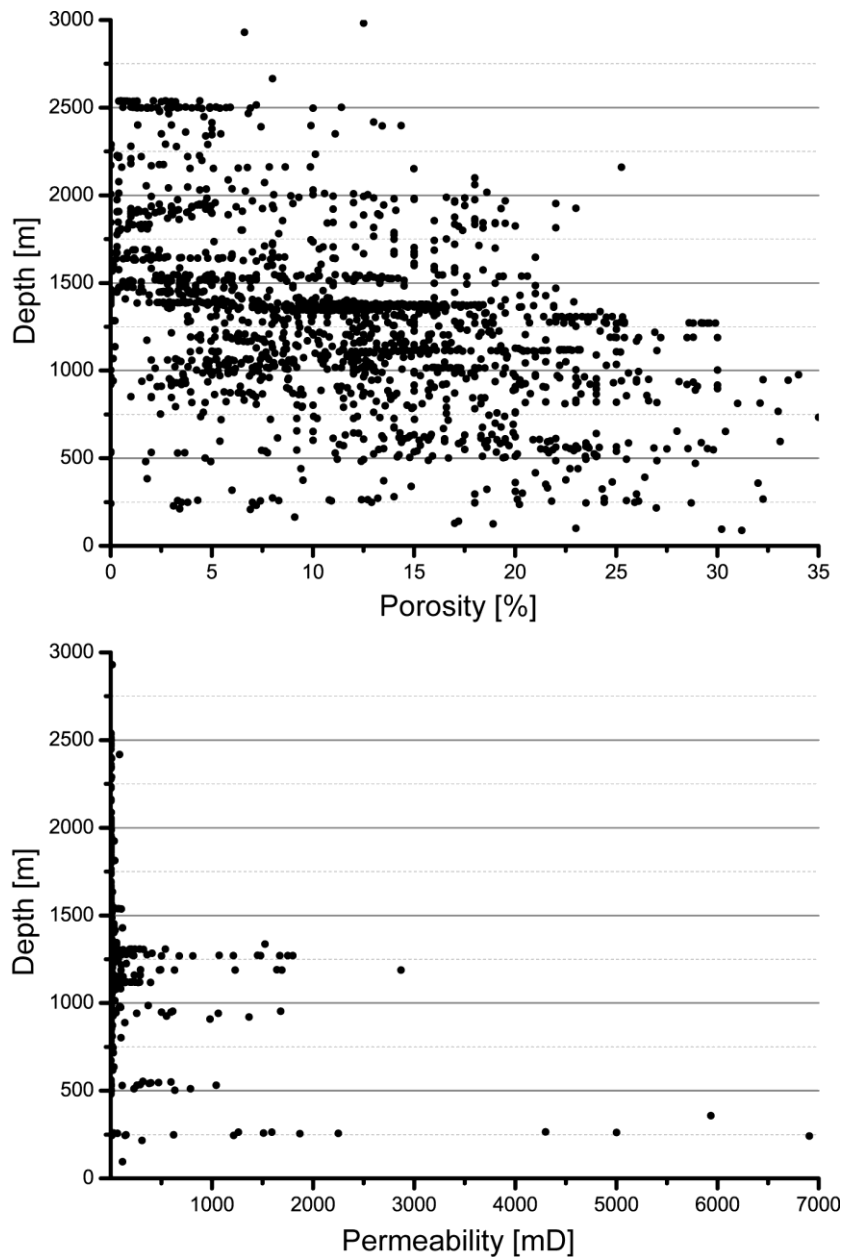
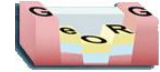


Abb. 3.3.3-6: Verteilung der Messwerte nach Tiefeninformation für Porosität (6a) sowie Permeabilität (6b).

Für die größeren Tiefen über 3500 m liegen keine Messwerte vor. Deutlich erkennbar ist die Abnahme der Porosität mit zunehmender Teufe. Hinsichtlich der Permeabilität liegen für mittlere Teufenbereiche von ca. 300 bis ca. 1000 m verhältnismäßig wenige Messwerte vor. Die Permeabilitäten in den flachsten beprobten Bereichen bei ca. 250 m weisen eine deutlich größere Spanne mit einem höheren Mittelwert und deutlich höheren Maximalwerten auf.



Verteilung der Porositäts- und Permeabilitätswerte auf die einzelnen stratigraphischen Einheiten

Die insgesamt 2790 Messwerte sind auf die einzelnen stratigraphischen Einheiten äußerst ungleichmäßig verteilt (s. Abb. 3.3.3-7 und Abb. 3.3.3-8). Die meisten Messwerte liegen aus dem Mitteljura (522 Messwerte für Porosität und 454 für Permeabilität) vor, gefolgt vom Oligozän (409 Messwerte für Porosität und 213 für Permeabilität), vom Buntsandstein (257 Messwerte für Porosität und 212 für Permeabilität) sowie dem Eozän (286 Messwerte für Porosität und 107 für Permeabilität) vor. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass diese Verteilung keine Rückschlüsse auf die räumliche Abdeckung zulässt. Die Gesteine weisen, natürlich bedingt, stark unterschiedliche Flächenanteile auf. Die Messaktivitäten in den einzelnen Ländern waren unterschiedlich stark ausgeprägt. Darüber hinaus sind die Gesteine mit zunehmender Tiefenlage für eine Probenahme zunehmend schwerer erreichbar. Die Aufschlüsse der KW-Industrie, über deren Aktivitäten der Großteil der Probekörper gewonnen und der überwiegende Teil der Messungen durchgeführt wurde, beschränken sich auf die für die Exploration interessanten Bohrteufen. In gewissen geologischen Einheiten wurde aus wissenschaftlichem Interesse heraus in einzelnen Probenahmestellen eine Vielzahl von Probenahmekörpern gemessen, woraus sich eine Vielzahl an Messungen an wenigen Lokalitäten ergibt.

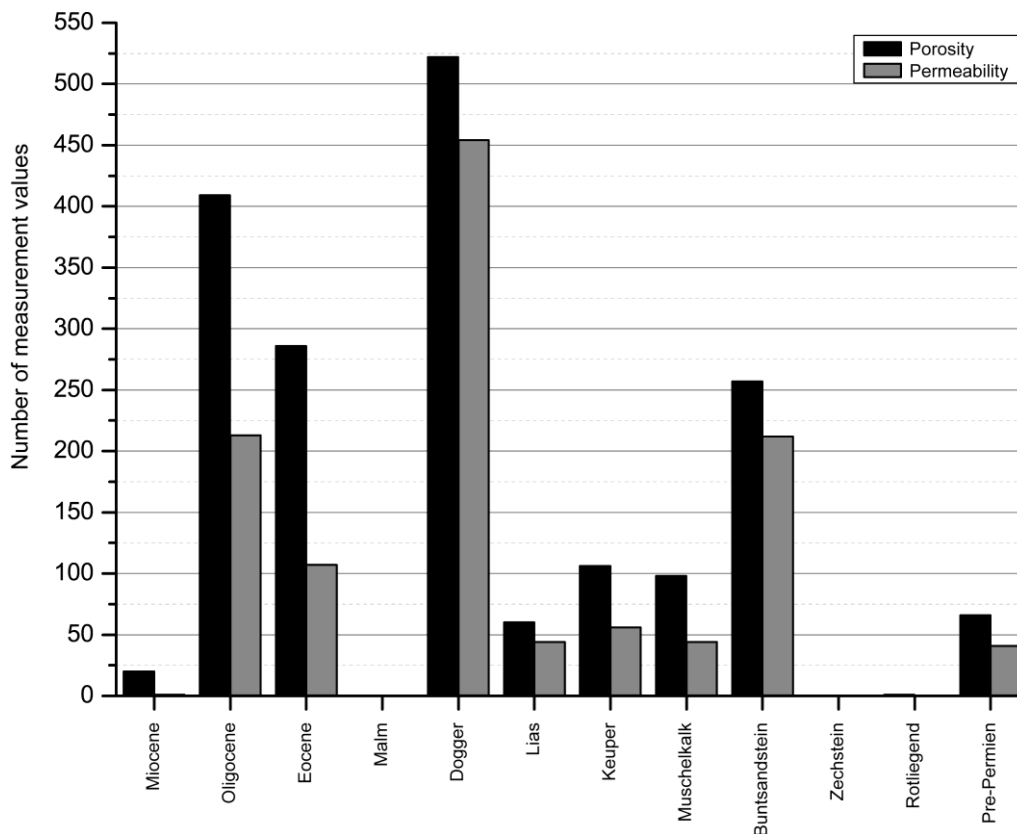


Abb. 3.3.3-7: Verteilung der Messwerte auf die einzelnen stratigraphischen Einheiten.



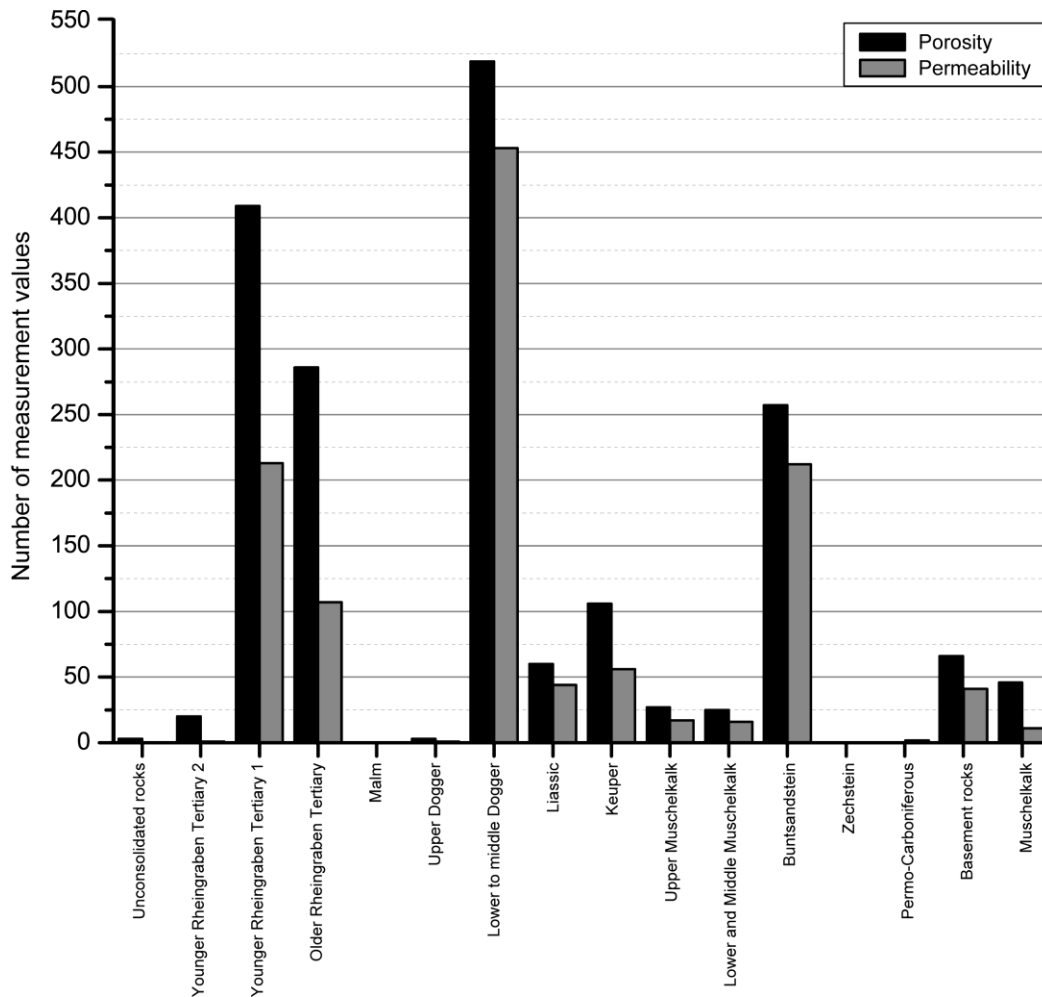


Abb. 3.3.3-8: Verteilung der Messwerte auf die einzelnen GeORG-Modelleinheiten.

Eine ausgesprochen hohe Messwertdichte liegt für die Modelleinheiten Basis Landau-Formation bis Basis Froidefontaine-Formation, Basis Froidefontaine bis Basis Tertiär, Top Hauptrogenstein bis Basis Mitteljura sowie Basis Muschelkalk bis Basis Trias vor. Für die Modellhorizonte Basis Tertiär bis Basis Oberjura, Basis Trias bis Basis spätpermischer Sandsteine sowie Basis spätpermischer Sandsteine bis Basis Zechstein liegen keine Messwerte vor. Für den Modellhorizonte Basis Zechstein bis Basis Permokarbon existiert nur ein Porositätswert. 57 Messungen sind darüber hinaus dem Muschelkalk zuzuordnen, ohne dass die Probekörper der GeORG-Untergliederung zugeordnet werden können.

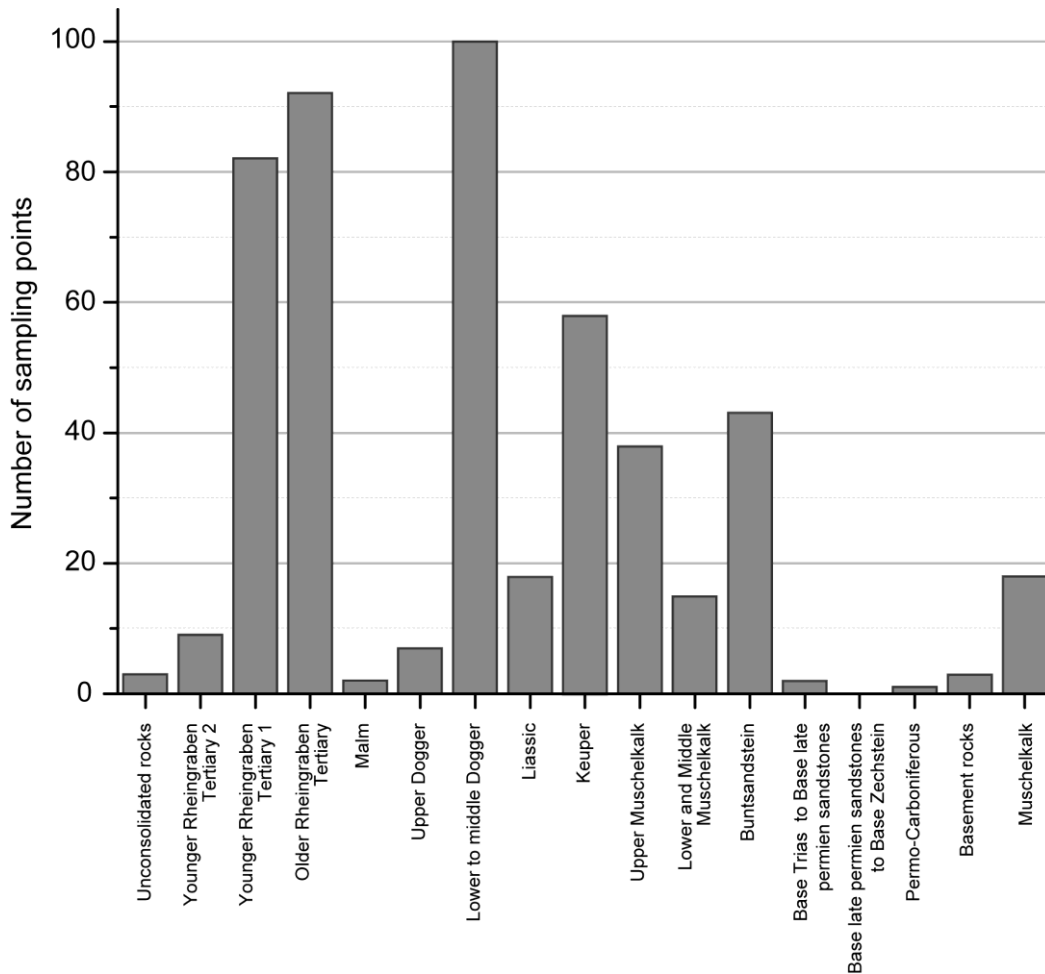
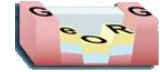


Abb. 3.3.3-9: Verteilung der Messwerte auf die einzelnen GeORG-Modelleinheiten.

Die Anzahl der Aufschlüsse (Abb. 3.3.3-9) sind in den Einheiten Basis Landau-Formation bis Basis Froidefontaine-Formation (82 Probenahmestellen), Basis Froidefontaine-Formation bis Basis Tertiär (92 Probenahmestellen) sowie Top Hauptrogenstein bis Basis Mitteljura (100 Probenahmestellen) zahlreich und gut verteilt. Bei den Einheiten Oberfläche bis Basis Lockergesteine (3 Probenahmestellen), Basis Tertiär bis Basis Oberjura (2 Probenahmestellen), Basis Oberjura bis Top Hauptrogenstein (7 Probenahmestellen), Basis Trias bis Basis spätpermischer Sandsteine (2 Probenahmestellen), Basis Zechstein bis Basis Permokarbon (1 Probenahmestelle) und Top Grundgebirge bis Modellbasis (3 Probenahmestellen) ist eine gute räumliche Abdeckung nicht gegeben; für die Modelleinheit Basis spätpermischer Sandsteine bis Basis Zechstein ist gar überhaupt keine Probenahmestelle vorhanden. Eine belastbare flächenhafte Extrapolation ist in diesen zuletzt genannten Einheiten nicht durchführbar.

Kapitelverweise

3.2.6.3



3.3.4 Wärmeleitfähigkeit

Ziel: Statistische Auswertung der für das Projektgebiet vorhandenen Wärmeleitfähigkeitsdaten

Kurzbeschreibung

Die für das Projektgebiet vorhandenen Wärmeleitfähigkeitsdaten wurden hinsichtlich einer stratigraphischen, petrographischen, flächenhaften bzw. teufenbezogenen Zuordnung statistisch ausgewertet.

Eingangsdaten

Wärmeleitfähigkeit, Porosität, Schichtenverzeichnisse, Gesteinschemismus

Beschreibung

Für das Projektgebiet liegen insgesamt 921 Messungen für 520 Probekörper aus 46 Probenahmestellen zur Wärmeleitfähigkeit (WLF) vor. Etwa 70 Prozent der gemessenen Probekörper stammen aus Kernstücken aus Tiefbohrungen im Grabeninneren, 30 Prozent der Probekörper aus Oberflächenaufschlüssen, vornehmlich aus den Grabenschultern und dem angrenzenden Pfälzer Wald (s. Abb. 3.3.4-1, s. auch Kap. 3.2.6.2).

Sampling points - types of exposure

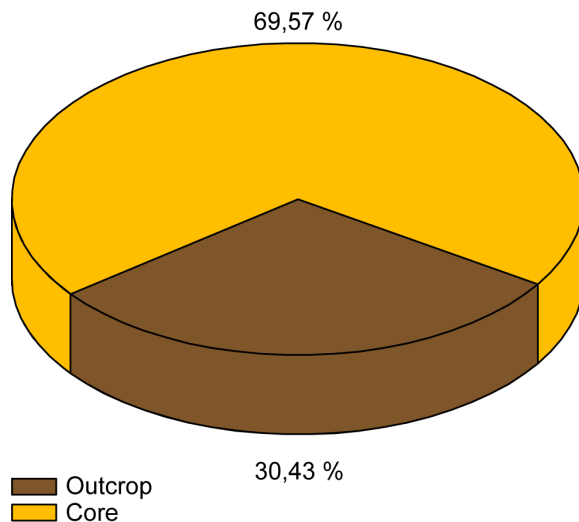
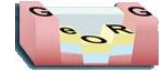
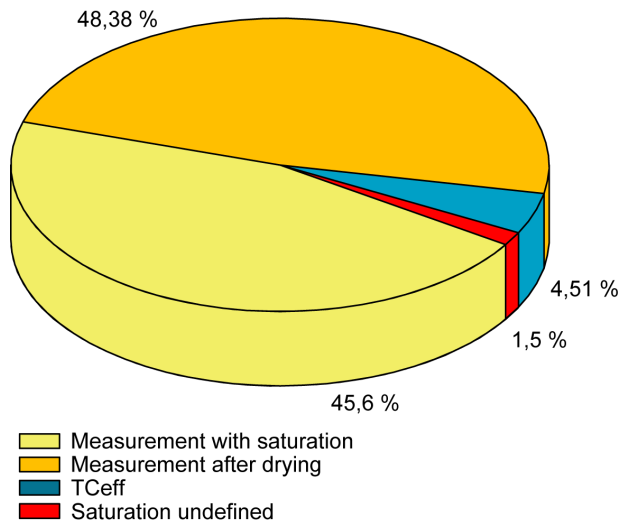


Abb. 3.3.4-1: Probenahmestellen – Aufschlusstyp



Distribution of measuring values: Saturation



Distribution of measuring values: depth information

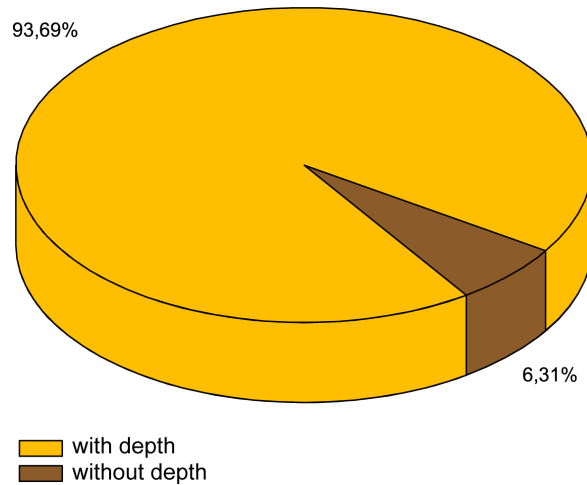


Abb. 3.3.4-2: Verteilung der Messwerte nach Sättigung (2a, links) sowie Tiefeninformation (2b, rechts).

Vielfach wurden die Proben mehrfach bei verschiedenen Wassergehalten (trocken, wassergesättigt) gemessen (s. Abb. 3.3.4-2a), teilweise bei nur einem Sättigungsgrad (wassergesättigt, trocken, Wassergehalt unbekannt). Über die 921 Messungen hinaus wurden zwecks Berücksichtigung der Anisotropie der Gesteine die Proben teilweise in zwei Raumrichtungen vermessen. Aus den Messungen in den beiden Raumrichtungen wurde dann jeweils ein Mittelwert für den wassergesättigten Zustand sowie für den trockenen Zustand ermittelt. Für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeitswerte für das schweizer Projektgebiet wurden Messungen am Bohrklein von Bohrungen durchgeführt und diese Werte anschließend unter Verwendung von Porositätswerten und unter Annahme einer 100-%igen Wassersättigung korrigiert. Die Werte wurden in den statistischen Auswertungen systematisch getrennt von den messtechnisch erfassten Werten aufgeführt, können aber je nach Fragestellung mit den Wärmeleitfähigkeiten im wassergesättigten Zustand gleichgesetzt werden. Auffällig erscheint, dass der Median dieser rechnerisch ermittelten Werte grundsätzlich erkennbar tiefer ist, als der Median der durch den Thermoscanner ermittelten Messwerte im wassergesättigten Zustand und bis auf eine Ausnahme (Modelleinheit Perm und Buntsandstein) grundsätzlich in den einzelnen stratigraphischen Einheiten kleinere Minimalwerte als die Minimalwerte der durch den Thermoscanner im wassergesättigten Zustand gemessenen Proben liefert. Für circa 93 Prozent der Probekörper ist die Probenahmentiefe bekannt. 25 Prozent der Messungen stammen aus Frankreich, 44 Prozent aus Baden-Württemberg, 26 Prozent aus Rheinland-Pfalz und 5 Prozent aus der Schweiz. Allerdings sind die Belegpunkte im Projektgebiet ungleich verteilt, und in vielen Bohrungen wurden Wärmeleitfähigkeiten, teilweise innerhalb einzelner stratigraphischer Abfolgen, mehrfach gemessen. So konzentrieren sich die 231 Messwerte in Frankreich auf lediglich einen Aufschluss, in Baden-Württemberg die 402 Messwerte auf 8 Aufschlüsse, in der Schweiz die 44 Messwerte auf einen Aufschluss und in Rheinland-Pfalz die 242 Messwerte auf 36 Aufschlüsse (s. Abb. 3.3.4-3).



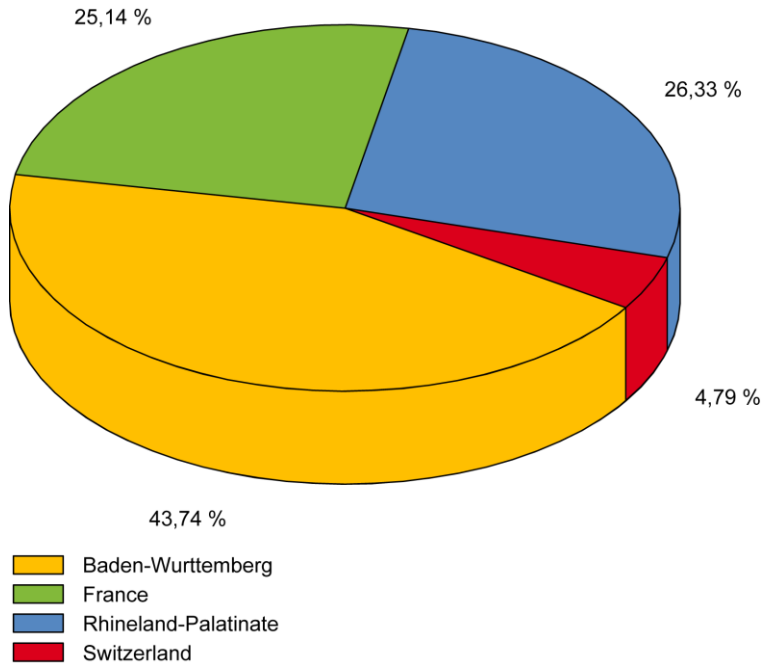


Abb. 3.3.4-3: Verteilung der Messwerte auf die einzelnen Landesflächen im Projektgebiet.

Bei der Betrachtung der Messwerte ist zu beachten, dass die Messungen in verschiedenen Messverfahren durchgeführt wurden (Halbraumsonden, Thermoscanner (siehe Kapitel 3.2.6.2)); vielfach liegen jedoch keine Informationen zum verwandten Messverfahren vor, was die Vergleichbarkeit erschwert. Darüber hinaus existieren zurzeit noch keine Erkenntnisse zur Divergenz der Messwerte bei den verschiedenen Messverfahren sowie entsprechende Korrekturverfahren.

Abhängig von der Petrographie der Gesteine und der Porosität schwanken die Messwerte für den wassergesättigten Bereich zwischen 1,2 und 6,1 W/m²K bei einem Median von 3,4 W/m²K. Im trockenen Bereich bewegen sich die Messwerte zwischen 1,1 und 5,9 W/m²K bei einem Medianwert von 2,6 W/m²K (s. Abb. 3.3.4-4). Entsprechend der deutlich höheren Wärmeleitfähigkeit von Wasser gegenüber Luft ist die mittlere Wärmeleitfähigkeit im wassergesättigten Zustand abhängig vom Hohlraumvolumen somit gegenüber dem trockenen Zustand im Mittel um 0,5 W/m²K höher. Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit durch den erhöhten Lösungsinhalt der regelmäßig hochsalinaren Tiefenwasser im Vergleich zum im Labor verwandten Leitungswasser sind zu vernachlässigen (s. Kap. 2.4.4 in Teil 2).

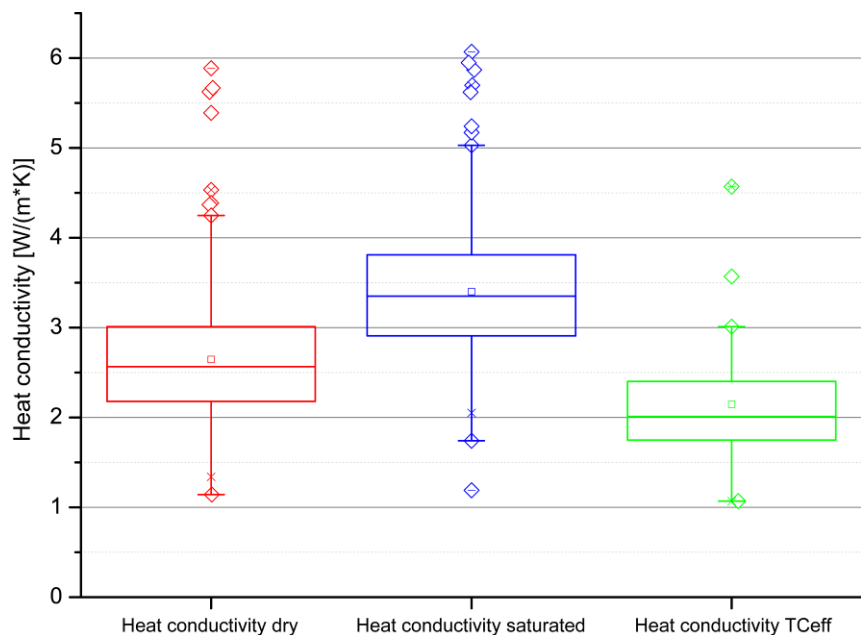


Abb. 3.3.4-4: Spannweiten der Wärmeleitfähigkeitswerte im trockenen und wassergesättigten Zustand.

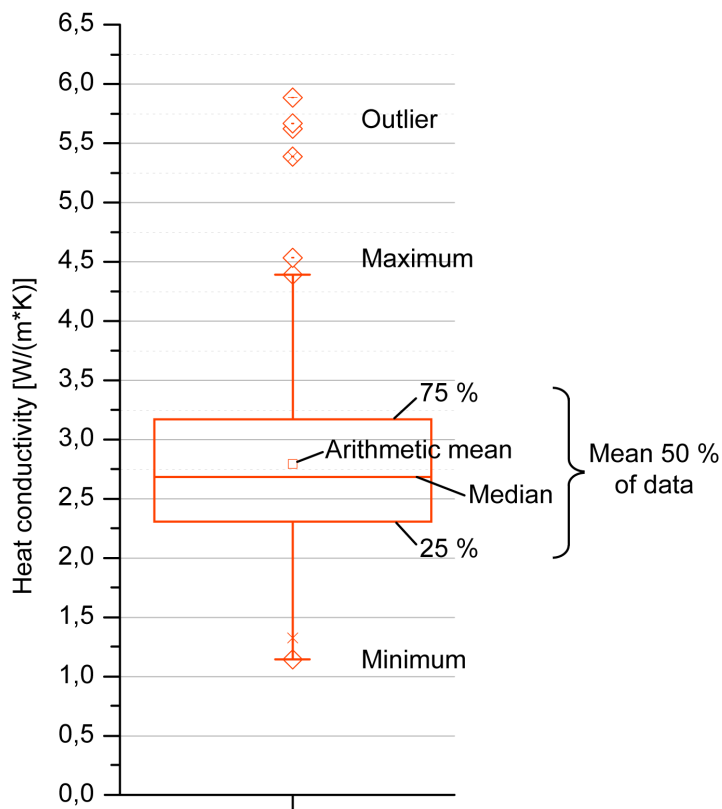


Abb. 3.3.4-5: Erläuterungen der Kastengrafiken (Box-Whisker-Plot).

Diese Werte wurden anschließend statistisch ausgewertet. Folgende statistische Auswertungen/Darstellungen wurden hierbei erstellt.



Verteilung der WLF-Werte in der Tiefe

Abb. 3.3.4-6 und Abb. 3.3.4-7 zeigen die Verteilung der Wärmeleitfähigkeitswerte in der Tiefe im trockenen sowie im wassergesättigten Zustand. Für den Teufenbereich von ca. 2200 m bis 3200 m liegen über 1000 m Länge keine Informationen vor. Die Maximalwerte in den flacheren Bereichen entsprechen denen der tieferen Bereiche; die Minimalwerte liegen in den flacheren Bereichen deutlich tiefer. Auch der Mittelwert der Messwerte ist in den flacheren Bereichen deutlich geringer als in den tieferen Bereichen. Grund ist zum einen die erhöhte Verbreitung von tonigen Gesteinen in den tertiären Sedimentgesteinen und die Häufung silikatischer Gesteine insbesondere im Buntsandstein, Rotliegend und im Kristallin, zum andern nimmt der Hohlraumanteil mit der Tiefe durch Kompaktion ab. Für die größeren Tiefen über 3500 m liegen keine Messwerte im wassergesättigten Zustand vor. Erwartungsgemäß zeigen die Messwerte in den größeren Tiefen aufgrund des geringen Porenanteils keinen nennenswerten Auswirkungen durch die Wasseraufsättigung.

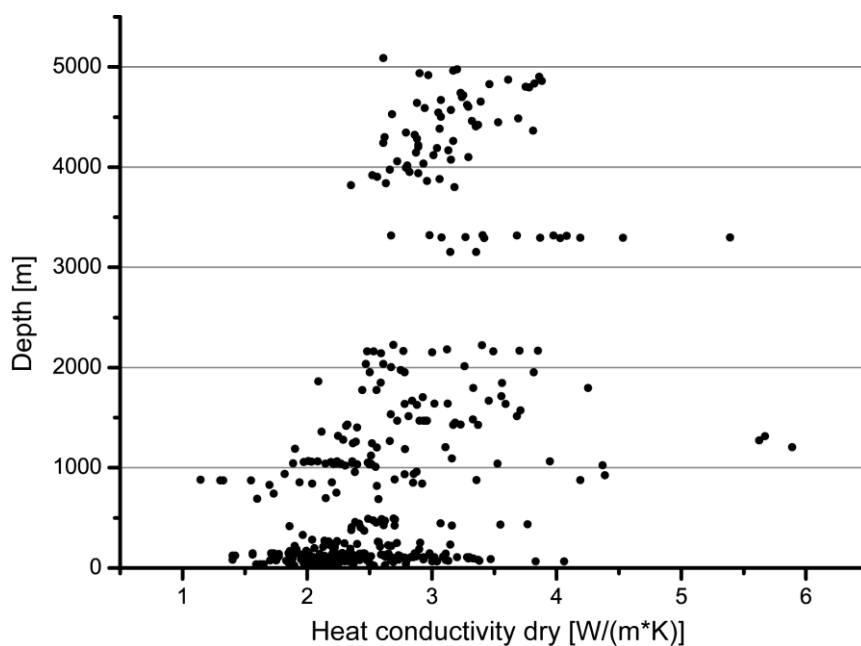


Abb. 3.3.4-6: Wärmeleitfähigkeitswerte im trockenen Zustand in der Tiefe.

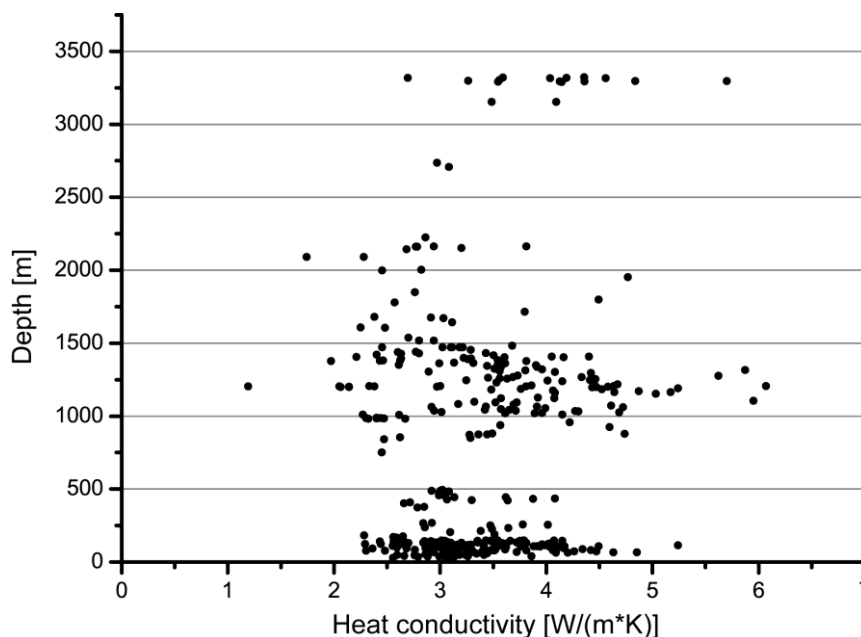


Abb. 3.3.4-7: Wärmeleitfähigkeitswerte im wassergesättigten Zustand in der Tiefe.



Verteilung der Wärmeleitfähigkeit-Werte auf die einzelnen stratigraphischen Einheiten

Die insgesamt 921 Messwerte sind auf die einzelnen stratigraphischen Einheiten äußerst ungleichmäßig verteilt (s. Abb. 3.3.4-8 u. Abb. 3.3.4-9). Die meisten Messwerte liegen aus dem Buntsandstein (281 Messwerte) vor, gefolgt vom Tertiär (151 Messwerte), vom Kristallin (149 Messwerte) sowie dem Oberjura (125 Messwerte). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass diese Verteilung keine Rückschlüsse auf die räumliche Abdeckung zulässt. Die Gesteine weisen, natürlich bedingt, stark unterschiedliche Flächenanteile auf. Die Messaktivitäten in den einzelnen Ländern waren unterschiedlich stark ausgeprägt. Darüber hinaus sind die Gesteine mit zunehmender Tiefenlage für eine Probenahme zunehmend schwerer erreichbar. Die Aufschlüsse der KW-Industrie, über deren Aktivitäten eine Vielzahl der Probekörper gewonnen wurde, beschränken sich auf die für die Exploration interessanten Gesteinsformationen und Bohrteufen. In gewissen geologischen Einheiten, insbesondere im Kristallin, wurde aus wissenschaftlichem Interesse heraus in einzelnen Probenahmestellen eine Vielzahl von Probenahmekörper gemessen, so dass eine Vielzahl an Messungen an wenigen Lokalitäten vorliegt.

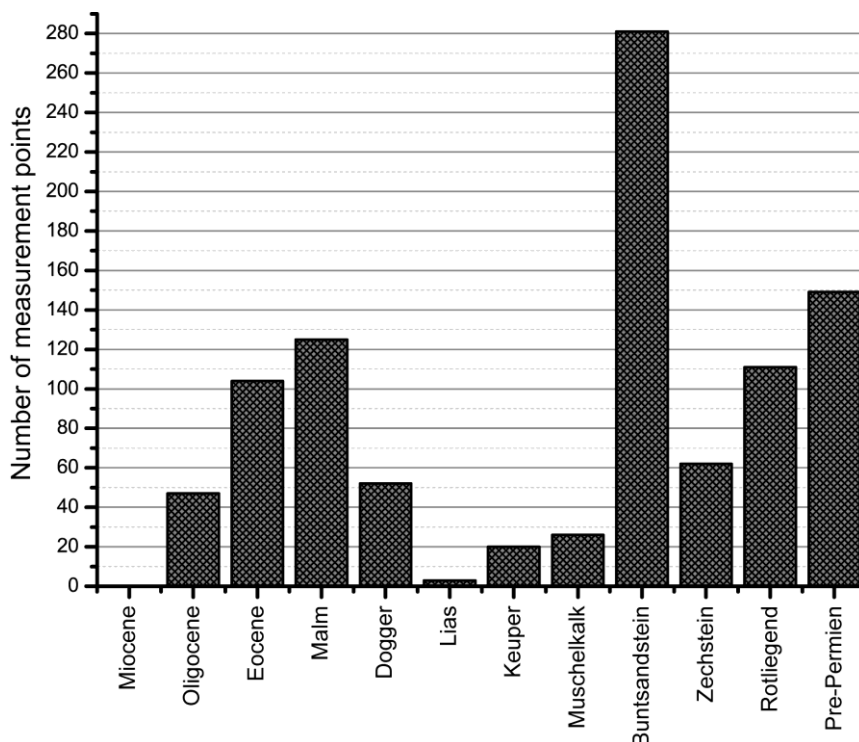


Abb. 3.3.4-8: Verteilung der Messpunkte auf die einzelnen stratigraphischen Einheiten.



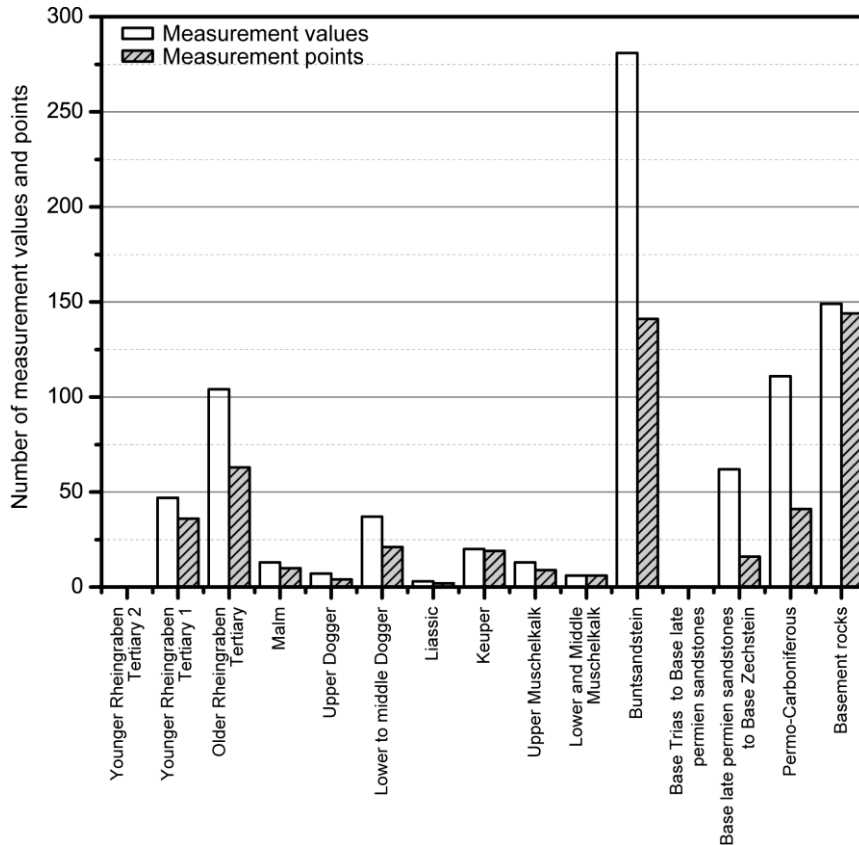


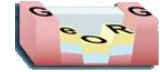
Abb. 3.3.4-9: Verteilung der Messpunkte und Messwerte auf die einzelnen GeORG-Modelleinheiten.

Eine ausgesprochen hohe Messwertdichte liegt für die Modellhorizonte Kristallin, Basis Permokarbon bis Basis Zechstein, Basis Trias bis Basis Muschelkalk sowie Basis Tertiär bis Basis Froidefontaine-Formation vor. Lediglich für die flachgründigen Formationen Pleistozäne und Pliozäne Lockergesteine sowie für die tertiäre Landau-Formation liegen keine Messwerte vor. 7 Messungen aus Frankreich sind darüber hinaus dem Muschelkalk zuzuordnen, ohne dass die Probekörper der GeORG-Untergliederung zugeordnet werden können. Die Probenahmepunkte sind in den Einheiten Basis Landau-Formation bis Basis Froidefontaine-Formation (10 Probenahmestellen), Basis Froidefontaine-Formation bis Basis Tertiär (12 Probenahmestellen), Basis Unterjura bis Basis Keuper (7 Probenahmestellen) und Basis Unterer Muschelkalk bis Basis Trias (20 Probenahmestellen) zahlreich und gut verteilt. Bei den Einheiten Basis Tertiär bis Basis Oberjura (3 Probenahmestellen), Basis Oberjura bis Top Hauptrogenstein (1 Probenahmestelle), Top Hauptrogenstein bis Basis Mitteljura (2 Probenahmestellen), Basis Keuper bis Top Muschelkalk Evaporite (3 Probenahmestellen), Basis Trias bis Basis Zechstein (1 Probenahmestelle) und Top Grundgebirge bis Modellbasis (3 Probenahmestellen) ist eine gute räumliche Abdeckung nicht gegeben; eine belastbare flächenhafte Extrapolation ist in diesen Einheiten nicht durchführbar.

Kapitelverweise

3.2.6.2

2.4.4



3.4 Seismikinterpretation

Ziel: Workflows für die Seismikinterpretation mit Hilfe verschiedener Programme

Kurzbeschreibung

Beschreibung des Workflows für die Seismikinterpretation mit Hilfe verschiedener Programme

Eingangsdaten

Reprozessierte 2D-Reflexionsseismik (SEG-Y-Format, Zeitdomäne)

Beschreibung

Die Interpretation reflexionsseismischer Profile im SEG-Y-Format besteht aus folgenden Arbeitsschritten:

- Detektierung seismischer Horizonte anhand ihrer seismischen Signatur
- Zuordnung der seismischen Horizonte zu geologischen Grenzflächen
- Detektierung von Störungen

Die Interpretation der seismischen Horizonte muss mit den Bohrdaten und an den Kreuzungspunkten der Linien konsistent sein. Seismische Horizonte lassen sich durch ihre seismische Signatur charakterisieren und erkennen. Dazu gehören Merkmale wie z.B. Amplitude, Frequenz und Reflektorkontinuität. Für Informationen zur Interpretation reflexionsseismischer Profile sei auf die gängigen Lehrbücher verwiesen (z.B. Badley 1985, Veeken 2007).

Im deutschen Anteil konzentrierte sich die Interpretation auf die känozoischen Horizonte und eine mesozoische Grenzfläche mit detektierbarer seismischer Charakteristik (Süden und Mitte: Oberfläche Haupttrogenstein, Norden: Basis Keuper). Daneben fanden Störungen und Salzstockumrisse in der Interpretation Eingang. Aufgrund der prozessierungsbedingt besseren Eingangsdatenqualität wurden in der Schweiz und in Frankreich insgesamt 10 Horizonte, Störungen und Umrisse von Salzstockstrukturen in der Seismik detektiert und interpretiert. Doch auch in diesen Gebieten zeigte die anschließende Kombination der Seismik- und Bohrdaten im geologischen 3D-Modell bereichsweise Fehlinterpretationen der präkänozoischen Horizonte, die im Nachgang repositioniert werden mussten.

Die Seismik-Interpretation wurde von verschiedenen Bearbeitern entweder innerhalb der Software SeisVision (GeoGraphix, Landmark) oder Gocad 9.x (Paradigm) durchgeführt.

Im Schweizer Projektgebiet lagen, abgesehen von der Flusseismik auf dem Rhein (Wirsing et al. 2007), nur Papierausdrucke der Seismikabspielungen (x-y-twt -> Zweiwegelaufzeit) vor. Die Interpretation wurde manuell auf Papier durchgeführt und mittels Intervallgeschwindigkeiten in x-y-z-Daten umgerechnet. Anschließend wurden die tiefenkonvertierten Datenpunkte in Gocad importiert.

Literaturhinweise

Badley (1985), Veeken (2007), Wirsing et al. (2007)



3.4.1 Seismikinterpretation im SeisVision Modul

Ziel: Seismikinterpretation von Horizonten, Störungen und Salzstockumrissen in SeisVision

Kurzbeschreibung

Workflow für die Seismikinterpretation von Horizonten, Störungen und Salzstockumrissen in SeisVision

Eingangsdaten

- reprozessierte 2D-Seismik (SEG-Y-Datensätze, Zeitdomäne)
- Bohrdaten (Tiefendomäne)
- weitere geologische Daten (Karten, Seismikinterpretationen aus der Literatur etc.)

Beschreibung

Die Interpretation der 2D-Seismiklinien wurde im französischen Projektgebiet in der Zeitdomäne (Zweiwegelaufzeit) mit Hilfe des SeisVision-Moduls der GeoGraphix Software (Landmark Software) durchgeführt. Die Bohrdaten werden im WellBase-Modul verwaltet. Die interpretierten Seismiklinien werden in zwei Dimensionen visualisiert.

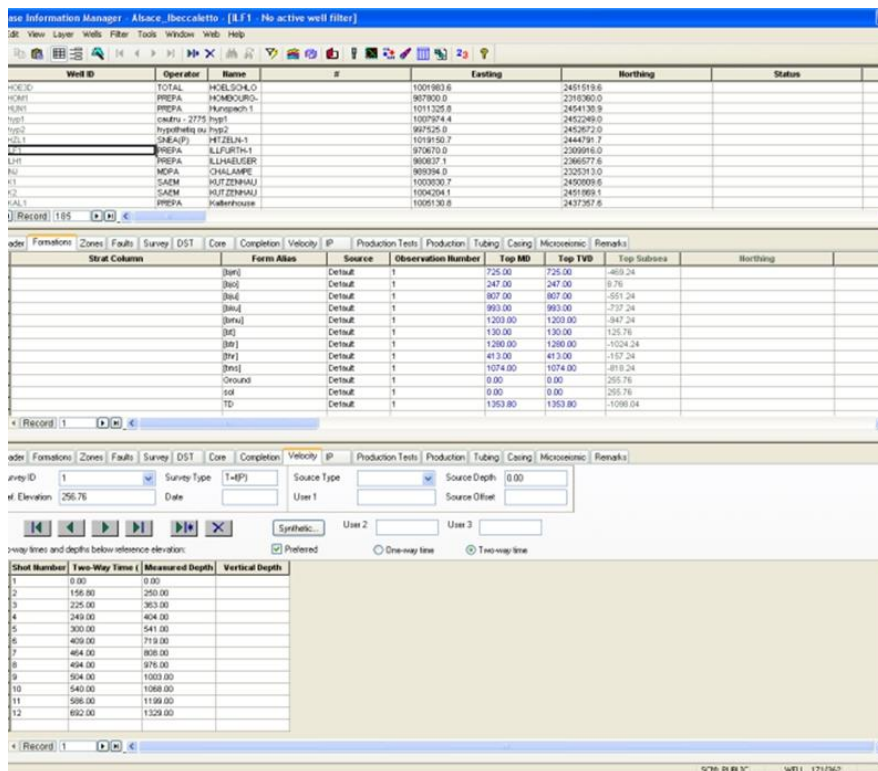
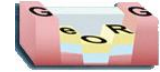


Abb. 3.4.1-1: SeisVision Window

Vor Beginn der Seismikinterpretation sind folgende Vorbereitungsschritte notwendig:

1. Festlegen des Koordinatensystems im neu erstellten GeoGraphix Projekt
2. Import der reprozessierten SEG-Y-Dateien in die GeoGraphix Software und Transformation in von SeisVision lesbare 2ds Dateien
3. Festlegen des Bezugsniveaus (datum plane) und der Korrekturgeschwindigkeit (replacement velocity) für alle Seismikprofile
4. Einladen und Visualisierung aller Seismikprofile in SeisVision
5. Visualisierung der Bohrungen in SeisVision:



- Bohrdatenerfassung (Metadaten, Tiefe geologischer Marker, Geschwindigkeiten aus Geophonversenkungsmessungen) in spezifischen Exceltabellen
- Import der Exceltabellen in das WellBase-Modul
- Einladen der Bohrdaten in SeisVision

Wenigstens eine Geschwindigkeitsmessung ist für die Tiefen-Zeit-Konvertierung der Bohrdaten in SeisVision notwendig.

Die seismischen Horizonte werden im Horizon Manager verwaltet, die Störungen sind im Fault Manager abgelegt. In den Managern können Horizonte und Störungen erstellt, gelöscht und ihre Visualisierungsattribute verändert werden.

Die Horizonte lassen sich mit verschiedenen Methoden picken (polygon, auto-picking etc.). Die Horizonte sind durch ihre seismische Signatur erkennbar. (z.B. durch ihre seismische Fazies: Amplitude, Frequenz, Kontinuität etc.)

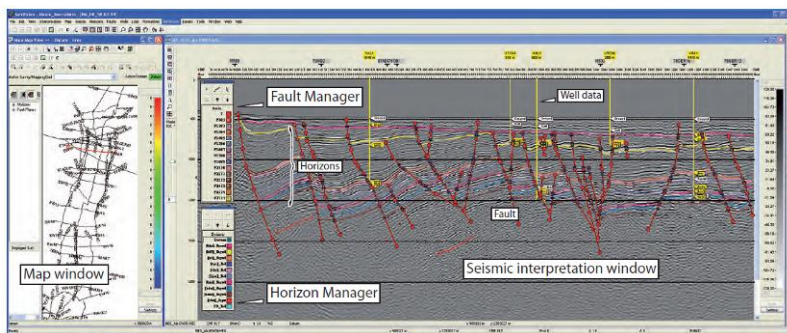


Abb. 3.4.1-2: Wellbase Window

Verschiedene Tricks helfen beim Interpretationsprozess:

- unterschiedliche Displayparameter der Seismikprofile machen Horizonte und Störungen besser erkennbar.
- die Nutzung verschiedener SeisVision-Werkzeuge wie correlation polygons und composite lines verbessern die Qualität der Interpretation.

Nach Fertigstellung der Interpretation können die Horizonte, Störungen und Salzstockumrisse als Ascii-Datensätze exportiert werden.



3.4.2 Seismikinterpretation in Gocad

Ziel: Seismikinterpretation von Horizonten, Störungen und Salzstockumrissen in Gocad

Kurzbeschreibung

Workflow für die Seismikinterpretation von Horizonten, Störungen und Salzstockumrissen in Gocad

Eingangsdaten

- reprozessierte 2D-Reflexionsseismik (SEG-Y-Format, Zeitdomäne)
- Bohrungen (konvertiert in Zeitdomäne)
- zusätzliche geologische Informationen (Karten, Profilschnitte und interpretierte Seismiklinien aus der Literatur)

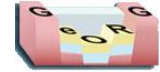
Beschreibung

Die Interpretation erfolgte in der Zeitdomäne. Die Bohrungen wurden mit dem Geschwindigkeitsmodell 1 (siehe Kap. 3.5.8.1) in die Zeitdomäne konvertiert.

2D-Seismiklinien im SEG-Y-Format können in Gocad im 3D-Fenster oder als 2D-Profilschnitt (einzeln oder als zusammengesetztes Profil) betrachtet werden. Im Profilschnitt kann die Seismikinformation in Form von Wiggles, als Density Plot oder einer Kombination beider Typen dargestellt werden. Im 3D-Fenster wird die Seismikinformation ausschließlich als Density Plot angezeigt. Der Mauszeiger ist zwischen beiden Ansichten synchronisierbar.

Das Picken der Horizonte oder Störungen erfolgte manuell. Störungen, Horizonte und Salzstockumrisse liegen als Gocad Curve-Objekte vor.

Zusätzliche geologische Informationen wie Karten, geologische Profile oder (interpretierte) Seismiklinien, die als Shapes oder georeferenzierte Rasterdaten (z.B. GeoTiff) vorliegen, können als Interpretationshilfe hinzugeladen werden. In der 3D-Ansicht lassen sich schnell und leicht vereinfachte Flächen z.B. aus den interpretierten Fault sticks erstellen, die einen ersten Überblick über mögliche räumliche Zusammenhänge geben.



3.5 Geologische 3D-Modellierung

Ziel: Definition von Methodenklassen für die geologische 3D-Modellierung

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Methodenklassen für die geologische 3D-Modellierung

Beschreibung

Die geologische 3D-Modellierung erfolgte einheitlich in der 3D-Modellierungssoftware Gocad (Paradigm). Dieses Programmpaket ist speziell für die Interpretation geologischer Daten konzipiert. Es erlaubt die Verarbeitung inhomogen verteilter und teilweise inkonsistenter Eingangsdatensätze. Kernstück der Software ist der Interpolationsalgorithmus DSI (Discret Smooth Interpolation Method, Mallet 1992). Übersichtsbeschreibungen zur 3D-Modellierung finden sich u.a. in Groshong (2006), Tearpock & Bischke (2003) und speziell zur Modellierung mit Gocad bei Caumon et al. (2009).

Das Kapitel Geologische 3D-Modellierung beschreibt den Arbeitsablauf für die Erstellung des geologischen 3D-Modells. Es setzt sich aus folgenden Unterkapiteln zusammen:

- 3.5.1 "Methodische Grundlagen": Grundlegende Arbeitsprinzipien und die Unterteilung des Modellgebiets in Teilbereiche
- 3.5.2 "Vorbereitende Arbeitsschritte": vorbereitende Generierung von Mächtigkeits- und Faziesverteilungen sowie Verbreitungspolygonen als Grundlagen für die 3D-Modellierung und den Import der Eingangsdaten in die Modellierungssoftware Gocad
- 3.5.3 "Modellierung von Störungen": Methodik der Störungskorrelation auf Grundlage der interpretierten 2D-Seismik und verschiedene Modellierungstechniken für Störungen differenziert nach Eingangsdatentypen
- 3.5.4 "Modellierung von Horizonten": Modellierung von Horizonten unterteilt in direkte Modellierung auf der Grundlage der interpretierten 2D-Seismik in der Zeitdomäne und der Ableitung der Raumlage von Horizonten in der Tiefendomäne mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen; Sonderkapitel zur Modellierung der Lockergesteinsbasis
- 3.5.5 "Modellierung von Salzstockstrukturen": Arbeitsablauf für die Modellierung der Salzstockstrukturen aus der 2D-Seismik in der Zeitdomäne
- 3.5.6 "Abgrenzung des Kaiserstuhls"
- 3.5.7 "Kombination zum Gesamtmodell": Regeln für die Konsistenzprüfung und den Verschnitt zwischen den Objekten des geologischen 3D-Modells
- 3.5.8 "Geschwindigkeitsmodellierung": Beschreibung von Modellen für die Tiefen-Zeitkonvertierung für Eingangsdaten und die Zeit-Tiefenkonvertierung von Gocad-Modellobjekten
- 3.5.9 "Darstellung der Datendichte und Abweichungen": Workflow für die Berechnung der Eingangsdatendichte (Bohrungen, Seismik, Aufschluss) und die Evaluierung von Abweichungen zwischen dem geologischen 3D-Modell und neu erhobenen Bohrungen
- 3.5.10 "Ableitung von Produkten aus dem geologischen 3D-Modell": Beschreibung des Workflows für die Ableitung von 2D-Informationen aus dem geologischen 3D-Modell und die Weiterverarbeitung im GIS



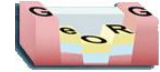


- 3.5.11 "Unsicherheiten": Übersicht über bei Eingangsdaten und bei der Modellierung auftretende Unsicherheitsfaktoren

Literaturhinweise

Mallet (1992), Groshong (2006), Tearpock & Bischke (2003), Caumon et al. (2009)





3.5.1 Methodische Grundlagen

Ziel: Beschreibung des grundlegenden Arbeitsablaufs für die Erstellung des geologischen 3D-Modells

Kurzbeschreibung

Beschreibung des grundlegenden Arbeitsablaufs für die Erstellung des geologischen 3D-Modells

Beschreibung

Die methodischen Grundlagen der geologischen 3D-Modellierung beschreiben den grundlegenden Arbeitsablauf und die Unterteilung des Modellgebiets in Teilbereiche.





3.5.1.1 Workflow 3D-Modellierung (*Workflow 3d-modeling*)

Ziel: Workflow für die geologische 3D-Modellierung

Kurzbeschreibung

Übersicht über die Arbeitsmethoden für die Erstellung des geologischen 3D-Modells

Eingangsdaten

Zeitdomäne:

- interpretierte 2D-Seismik

Tiefendomäne:

- Bohrungen
- 2D-Darstellungen: Geologische Karte (GeORG, Literatur), Profilschnitte, Schichtlagerungskarten, Verbreitungsinformationen, Mächtigkeitsverteilungen, geophysikalische Auswertungen
- 3D-Modelle

Beschreibung

Der Workflow untergliedert sich in Arbeitsschritte in der Zeit- und Tiefendomäne (*Time domain, Depth domain*).

Vorbereitende Arbeitsschritte (*Data preparation*), d.h. die Konstruktion von Mächtigkeits- und Faziesverteilungen sowie die Erstellung von Verbreitungspolygonen findet in der Tiefendomäne statt.

Diese Datensätze sowie weitere Eingangsdaten (Bohrungen, Schichtlagerungsinformationen etc.; *Input data depth domain*) werden mit einem einfachen ersten Geschwindigkeitsmodell (*Velocity modeling 1*) von der Tiefen- in die Zeitdomäne konvertiert (*Depth-time conversion*).

Die Konstruktion der grundlegenden Modellstrukturen wie Störungen (*Fault modeling*), Horizonte (*Horizon modeling 1*) und Salzstockstrukturen (*Modeling of salt structures*) erfolgt mit Hilfe der interpretierten 2D-Seismik in der Zeitdomäne. Die im vorherigen Arbeitsschritt in die Zeitdomäne konvertierten Eingangsdatensätze sowie die Ergebnisse der vorbereitenden Arbeitsschritte ergänzen die Seismikinformationen.

Für die nachfolgende Überführung der Modellobjekte in die Tiefendomäne wird ein zweites, detailliertes Geschwindigkeitsmodell erzeugt (*Velocity modeling 2*). Für die Zeit-Tiefenkonvertierung (*Time-depth conversion*) ist ein wasserdichter Verschnitt der Gocadobjekte notwendig (*Waterproof cut of objects*), da ansonsten Lücken oder Überschneidungen in der Tiefendomäne auftreten.

Einige Modellhorizonte sind in der Seismik nicht zuverlässig detektierbar und müssen in der Tiefendomäne im Modell mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen ergänzt werden (*Horizon modeling 2*).

Die Abgrenzung von vulkano-sedimentären Bereichen im Kaiserstuhlgebiet (*Modeling of Kaiserstuhl area*) vervollständigt das geologische 3D-Modell.

Nachfolgend können aus dem 3D-Modell 2D-Produktdarstellungen abgeleitet werden (*Product assessment*).

Für das Schweizer Teilmodell wurden aufgrund der besonderen Datenlage (kaum Abdeckung durch reflexionsseismische Profile) die Störungen und Horizonte direkt in der Tiefe modelliert.





3.5.1.1 Workflow 3d-modeling

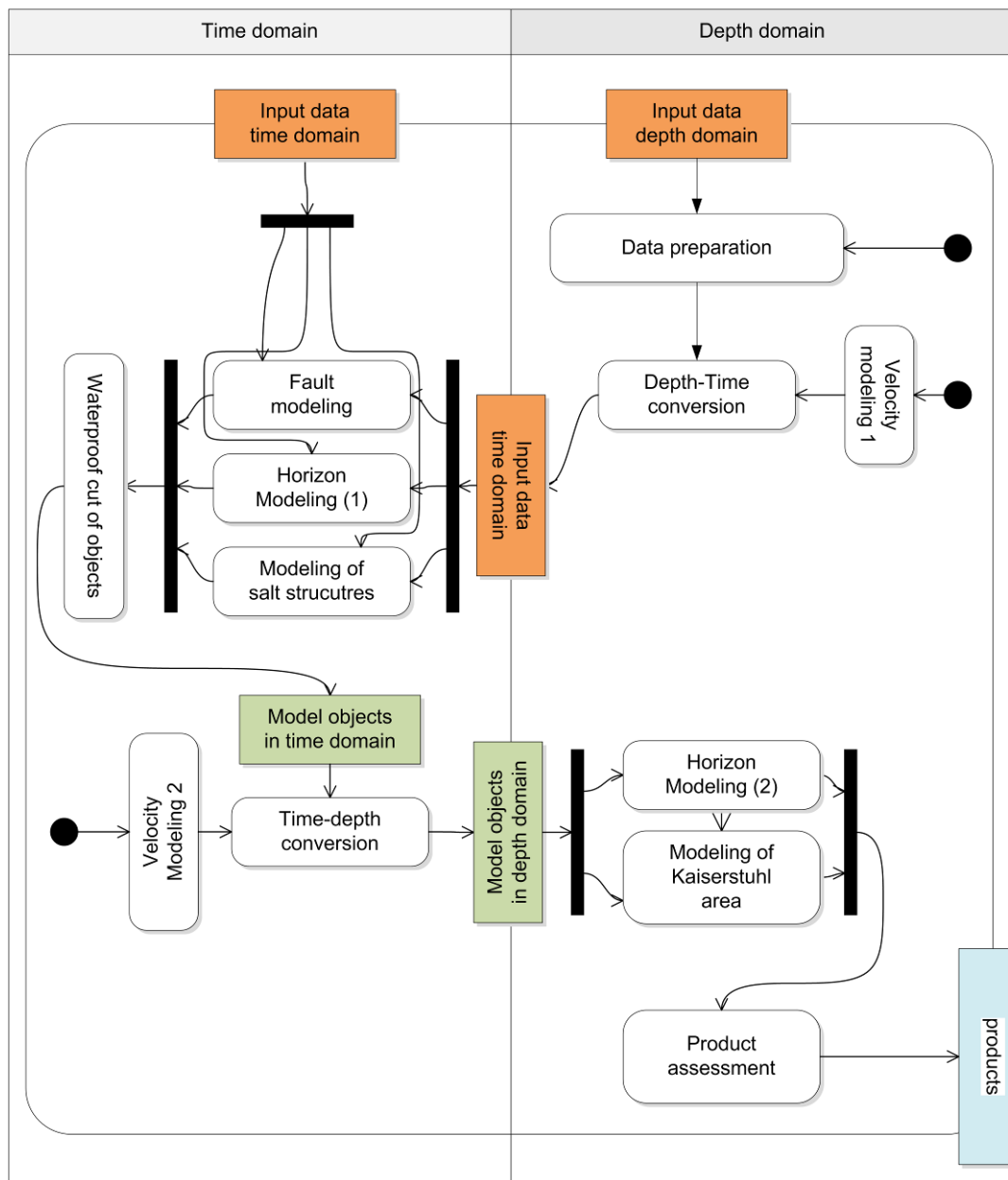


Abb. 3.5.1.1-1: UML diagram - Workflow geological 3d-modeling



3.5.1.2 Begrenzung und Teilbereiche des Modells

Ziel: Abgrenzung des Projektgebiets und Untergliederung in Teilbereiche des Modells

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Modellgrenzen und Teilbereiche des Projektgebiets

Beschreibung

Das GeORG - Projektgebiet liegt in der Grenzregion zwischen Deutschland, Frankreich und der Schweiz und umfasst den südlichen und mittleren Oberrheingraben mit den benachbarten Gebieten der Vogesen und des Schwarzwalds bzw. Odenwalds. Es hat eine SSW-NNE orientierte Längserstreckung von 270 km und ist durchschnittlich 90 km breit. Das Projektgebiet gliedert sich in folgende Teilbereiche:

- Äußeres Modellgebiet
- Inneres Modellgebiet
- Pilotgebiet Modellierung (als Teil des inneren Modellgebiets)
- Modellgebiet Schweiz (als Teil des inneren Modellgebiets)
- CUS-Projektgebiet (als Teil des inneren Modellgebiets)

Äußeres Modellgebiet

Das äußere Modellgebiet erstreckt sich über die Grenzen des Oberrheingrabens nach Osten und Westen in die benachbarten Mittelgebirgsregionen der Vogesen, des Schwarzwalds und des Odenwalds. Für dieses Areal wurden Eingangsdaten, insbesondere Bohrungen, zusammen getragen und aufbereitet. Die Geologische Karte des Projekts (Atlasblatt 1.4) überdeckt das gesamte äußere Modellgebiet.

Inneres Modellgebiet

Das innere Modellgebiet orientiert sich an der geologischen Struktur des Oberrheingrabens. Es hat wie das gesamte Projektgebiet eine SSW-NNE orientierte Längserstreckung von 270 km und ist im Norden durchschnittlich 40 km breit. Die Breite nimmt im zentralen Bereich bis auf 26 km ab und weitet sich im Süden auf bis zu 70 km (inklusive Teilgebiet Schweiz) auf. Das geologische 3D-Modell und die geostatistische Temperaturmodellierung konzentrieren sich auf das innere Modellgebiet. Das Pilotgebiet Modellierung im Bereich Karlsruhe - Landau - Sultz-sous-Forêts, das Modellgebiet Schweiz sowie das CUS-Projektgebiet sind Teile des inneren Modellgebiets.

Das innere Modellgebiet wird im Westen und Osten im Wesentlichen durch die Grabenhaupttrandverwerfungen begrenzt. Im Bereich des Kaiserstuhls ist die Abgrenzung auf Grundlage tektonischer Strukturen nicht möglich. Hier erfolgte eine schematische Abgrenzung, die sich an der Morphologie des Kaiserstuhls orientierte und Bereiche miteinschloss, in denen reflexionsseismische Profile Intrusionen oder eine extreme tektonische Zerlegung vermuten lassen. Aufgrund der unzureichenden Abdeckung der Freiburger Bucht mit Seismik- und Bohrdaten konnte in diesem Bereich kein 3D-Modell erstellt werden.

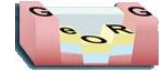
Die Nordgrenze verläuft in Rheinland-Pfalz südlich von Bechtheim und Hamm a. Rhein. Der Grenzverlauf zu Hessen stellt die Nordbegrenzung des baden-württembergischen Teils des Modells dar.

Die Südgrenze liegt im Bereich der Jura-Überschiebungsfront und wird durch nördlich einfallende, in das paläozoische Grundgebirge reichende, Abschiebungen markiert.

Pilotgebiet Modellierung

Das Pilotgebiet Modellierung befindet sich in der Grenzregion Baden-Württemberg - Rheinland-Pfalz - Frankreich. Es besitzt eine SSW-NNE orientierte Längserstreckung von 57 km und ist etwa 40 km breit. Im Pilotgebiet Modellierung wurden die Arbeitsabläufe für die geologische 3D-Modellierung getestet und danach in den anderen Bereichen implementiert. Des Weiteren wurde für diesen Abschnitt eine konduktive Temperaturmodellierung durchgeführt.





Modellgebiet Schweiz

Die Grenzen des Modellgebiets Schweiz werden durch Koordinaten markiert (Schweizer Koordinatensystem): SW-Ecke 597000 / 255000, NE-Ecke 626000 / 275000 (GK Zone 3 Koordinaten: SW-Ecke 3379316 / 5257611, NE-Ecke 3408714 / 5277026). Im Gegensatz zum übrigen Modellgebiet verläuft die östliche Haupttrandverwerfung (hier: Rheintalflexur) durch das Schweizer Teilmodell. Es umfasst somit sowohl Teile des Oberrheingrabens als auch der Grabenschulter (hier: Tafeljura).

Das Modellgebiet Schweiz weist teilweise eine höhere Auflösung, insbesondere der Lockergesteinsbasis, auf. Im Modellgebiet Schweiz wurden des Weiteren Fallbeispiele für die Nutzung des geologischen 3D-Modells als Werkzeug und Störungskorrelationstests durchgeführt sowie Abweichungen des Modells von neu erhobenen Bohrdaten evaluiert.

CUS-Projektgebiet

Das CUS-Projektgebiet zeigt die Lage der vom BRGM durchgeführten Pilotstudie im Stadtgebiet von Straßburg zur geothermischen Bewertung von drei mesozoischen Nutzhorizonten. Es hat eine SSW-NNE orientierte Längserstreckung von 27 km und ist durchschnittlich 12 km breit.

Atlasblätter

1.1



3.5.2 Vorbereitende Arbeitsschritte (*Data preparation*)

Ziel: Erstellung von Grundlagendatensätzen für die geologische 3D-Modellierung

Kurzbeschreibung

Methodenüberblick über die Erstellung von Grundlagendatensätzen für die geologische 3D-Modellierung

Eingangsdaten

- Bohrungen
- Karten und Profilschnitte aus Vorgängerprojekten und Literatur

Beschreibung

Vorbereitende Generierung von Mächtigkeits- und Faziesverteilungen (*Construction of thickness distributions*, *Construction of facies distributions*) sowie Verbreitungspolygonen (*Occurrence construction*) als Grundlagen für die geologische 3D-Modellierung und den Import der Eingangsdaten in die Modellierungssoftware Gocad (*Data import in Gocad*).

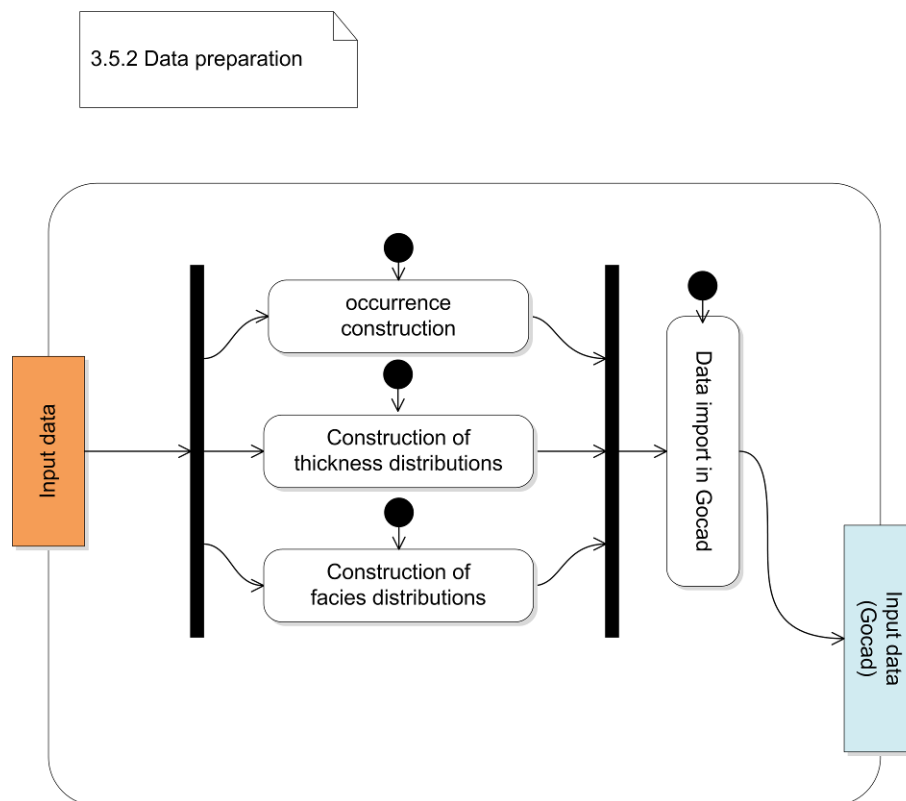
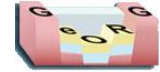


Abb. 3.5.2-1: UML diagram - Workflow data preparation



3.5.2.1 Verbreitungen (*Occurrence*)

Ziel: Übersicht über die Verbreitung von Modellhorizonten im Projektgebiet

Kurzbeschreibung

Methodik für die Erarbeitung von Verbreitungen von Modellhorizonten im Projektgebiet

Eingangsdaten

Bohrungen (*Wells*)

Ausstrich Geologische Karte (*Geological map*)

Verbreitungen aus anderen Datenquellen (Subcropkarten, Schichtlagerungskarten, Schnitte, 3D-Modelle; *Additional data sets*)

Beschreibung

- GIS-Arbeitsschritt, Tiefendomäne

- Aufgrund der Überdeckung weiter Teile des Modellgebiets mit Lockergesteinen lässt sich die Verbreitung der älteren geologischen Einheiten im Wesentlichen aus Bohrungen erschließen. Im Randschollenbereich wird zusätzlich der Ausstrich der gesuchten Einheit auf der geologischen Karte genutzt (*Occurrence from wells and outcrop*).

- Streichen auf der geologischen Karte ältere Gesteine als die gesuchte Einheit aus, ist die gesuchte Einheit nicht vorhanden (*Occurrence of older units on the geological map?*). Das Polygon muss in diesem Fall so beschnitten werden, dass die älteren Einheiten nicht mehr in die Verbreitung hineinragen (*Trim occurrence polygon*).

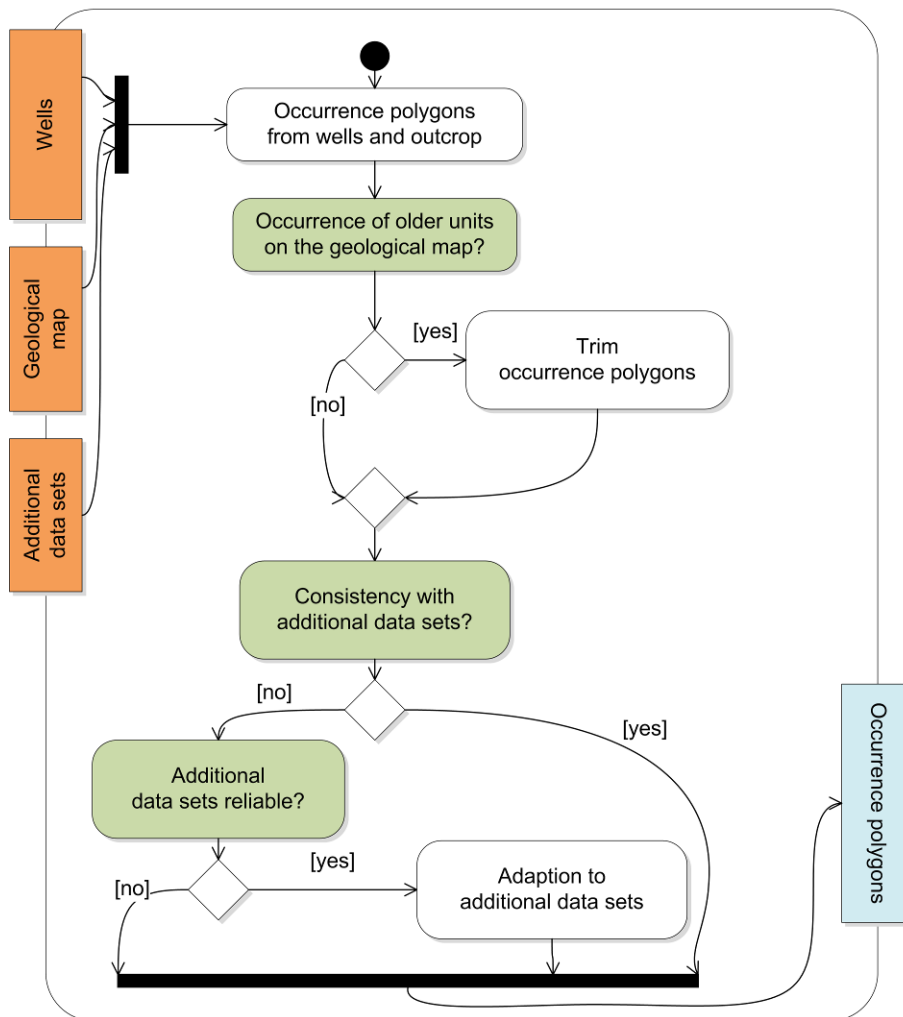
- Zusätzliche Informationen liefern Subcropkarten, Mächtigkeitsverteilungen und Profilschnitte. Gibt es Abweichungen zwischen dem konstruierten Verbreitungspolygon und den älteren Datenquellen (*Consistency with additional data sets?*) wird zuerst die Konsistenz der Datenquellen mit dem aktuellen Projekt-Bohrdatensatz geprüft (*Additional data sets reliable?*). Bei gegebener Konsistenz wird das neue Verbreitungspolygon an die externe Datenquelle angepasst (*Adaption with additional data sets*).

- Ergebnis: Verbreitungspolygone der zu modellierenden geologischen Einheiten (*Occurrence polygons*)

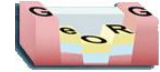
- Nach der Modellierung der Horizonte wird das Verbreitungspolygon durch Verschnitt von Horizonten, Einarbeiten tektonisch bedingter Schichtausfälle und Feinjustierung durch Seismikinterpretation an das geologische 3D-Modell angepasst.



3.5.2.1 Creation of occurrence polygons



3.5.2.1-1: UML diagram - Workflow creation of occurrence polygons



3.5.2.2 Präkämzoische Mächtigkeitsverteilungen (*Construction of Pre-Cenozoic thickness distributions*)

Ziel: Erstellung präkämzoischer Mächtigkeitsverteilungen

Kurzbeschreibung

Konstruktion von präkämzoischen Mächtigkeitsverteilungen als vorbereitenden Arbeitsschritt für die geologische 3D-Modellierung

Eingangsdaten

- Bohrungen (Mächtigkeit vollständig/unvollständig, bohrpfadkorrigiert, umgerechnet von scheinbaren auf wahre Schichtmächtigkeiten bei Kenntnis der entsprechenden Parameter; *Wells*)
- Mächtigkeitsverteilungen (Literatur; *Thickness distributions*)
- weitere Datenquellen (Mächtigkeitangaben aus benachbarten Gebieten, Verbreitungen, v.a. prätertiäre Subcropkarten)

Beschreibung

- kombinierter GIS- und Gocad Arbeitsschritt, Tiefendomäne

- Eine ungewichtete Übersichtsinterpolation der Bohrungen (vollständig) und Literaturangaben mit DSI in Gocad sorgt für eine erste Übersicht über deren Zusammenpassen (*Surface interpolation with DSI in Gocad*). Da die Mächtigkeiten der präkämzoischen Einheiten in der Regel nur sanft variieren, fallen nicht konsistente Eingangsdaten durch lokal stark schwankende Mächtigkeiten auf. Ausnahmen bilden lediglich prominente tektonisch bedingte synsedimentäre Schwankungen in den permokarbonen Molassesedimenten und den Salinarablagerungen im mittleren Muschelkalk.

- Für die weitere Bearbeitung im GIS Export von Isolinien gleicher Mächtigkeiten (*Derivation of isopachs*)

- Durch Glättung und Vereinfachung Feinjustierung der Isolinien (*Fine tuning of isopachs*)

- Da die Mächtigkeiten der Gesteinspakete stark von den paläogeographischen Gegebenheiten abhängen, ist zu prüfen, ob die Konstruktion zu den bekannten Elementen, wie Schwellen und Senken passt (*Consistency with paleogeographic elements?*). Im Bedarfsfall sind die Isolinien der Mächtigkeitverteilungen entsprechend anzupassen

- Die in Bohrungen angetroffenen meso- und paläozoischen Gesteinspakete sind stark von tektonisch bedingten postsedimentären Mächtigkeitsschwankungen betroffen, die in den Mächtigkeitverteilungen zu Artefakten führen können. Darum ist besonderem Maße auf die Konsistenz der Bohrungen zu achten (*Consistency with wells?*). Im Bedarfsfall sind mit Unsicherheiten behaftete Bohrungen aus dem Eingangsdatensatz zu entfernen oder die Isolinienkonstruktion entsprechend anzupassen (*Wells reliable?*). Des Weiteren ist sicherzustellen, dass die Mächtigkeitverteilungen die Mindestangaben aus Bohrungen mit unvollständigen Schichtprofilen überschreiten.

- Im prätertiären Subcrop treten Restmächtigkeiten auf. Diese konnten teilweise direkt während der Modellierung aus dem 3D-Modell bzw. der Seismikinterpretation ermittelt werden (*Modeling of incomplete parts in subcrop areas?*, *Thickness reduction in subcrop areas*). Aufgrund der großen Tiefenlage im nördlichen ORG war dies nicht möglich. Stattdessen wurden die Mächtigkeiten für folgende Schichtpakete:

- Keuper (RLP, in BW konstruiert)
- Muschelkalk
- Buntsandstein



gleichmäßig von 100% der Primärmächtigkeit im vollständig überdeckten Bereich auf 0% beim Ausstreichen der Basisfläche reduziert.

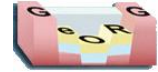
- Ein gleichmäßiges, in der GIS-Software erzeugtes Grid (Maschenweite 250 m) wird in Gocad durch direkte Triangulation vernetzt. Dadurch lassen sich bei DSI auftretende Überschwingungen im Randbereich umgehen (*Grid computation and direct interpolation in Gocad*).

- Im Schweizer Teilgebiet lagen für das Mesozoikum Karten mit Mächtigkeitsverteilungen aus der Literatur vor (s. Kap. 3.2.2.4)

Diese wurden digitalisiert und mit neuen Daten aus Bohrungen aktualisiert. An den Modellrändern des Schweizer Teilmodells fand nach Norden und Westen eine Harmonisierung mit dem übrigen Modellgebiet statt.

- Ergebnis: Mächtigkeitsverteilung als Gocadobjekte (*Thickness distributions*)





3.5.2.2 Construction of Pre-Cenozoic thickness distributions

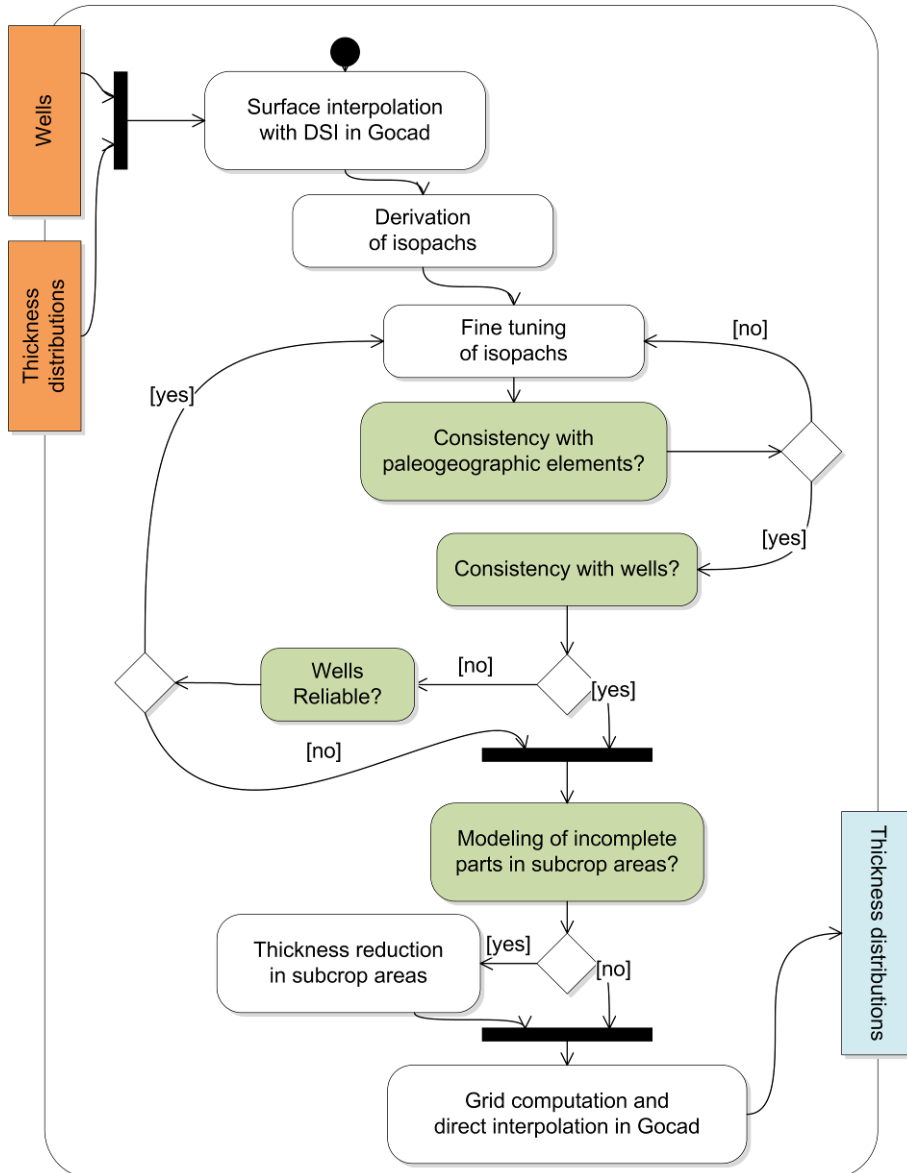


Abb. 3.5.2.2-1: UML diagram - Workflow creation of Pre-Cenozoic thickness distributions

Atlasblätter

3.3-3.5



3.5.2.3 Faziesverteilungen (*Facies distributions*)

Ziel: Erstellung von Faziesverteilungen

Kurzbeschreibung

Konstruktion von Faziesverteilungen als vorbereitenden Arbeitsschritt für die geologische 3D-Modellierung

Eingangsdaten

- Bohrungen mit verschiedenen Faziesseinheiten für die gesuchte geologische Einheit (*Wells*)
- Ausstrich der gesuchten Einheit auf der geologischen Karte (*Geological map*)
- weitere Datenquellen (Fazieskarten Literatur, Profilschnitte etc.; *Additional data sets*)

Beschreibung

- GIS-Arbeitsschritt, Tiefendomäne
- Hauptsächlicher Eingangsdatensatz sind Bohrungen. Im Randschollenbereich wird zusätzlich der Ausstrich der gesuchten Einheit auf der geologischen Karte genutzt (*Facies distributions from wells and outcrop*).
- Da die fazielle Ausprägung der Gesteine stark von paläogeographischen Gegebenheiten abhängt, ist zu prüfen, ob die Konstruktion zu den bekannten Elementen, wie Schwellen und Senken passt (*Does facies distribution correlate with paleogeography?*). Im Bedarfsfall ist die Faziesverteilung entsprechend anzupassen (*Adaption of facies distribution*).
- Zusätzliche Informationen liefern weitere Datenquellen, v.a. Angaben aus der Literatur (*Consistency with additional data sets?*). Falls diese Datenquellen nicht konsistent mit den erstellten Faziesverteilungen sind, ist zu prüfen, ob diese mit den für die Konstruktion genutzten Bohrungen und Ausstrichflächen in Einklang stehen (*Additional data sets reliable?*). Ist dies der Fall, werden die Faziesverteilungen entsprechend an die weiteren Eingangsdaten angepasst.
- Ergebnis: Verbreitungspolygone für verschiedene Faziesbereiche (*Facies distribution*)





3.5.2.3 Facies distributions

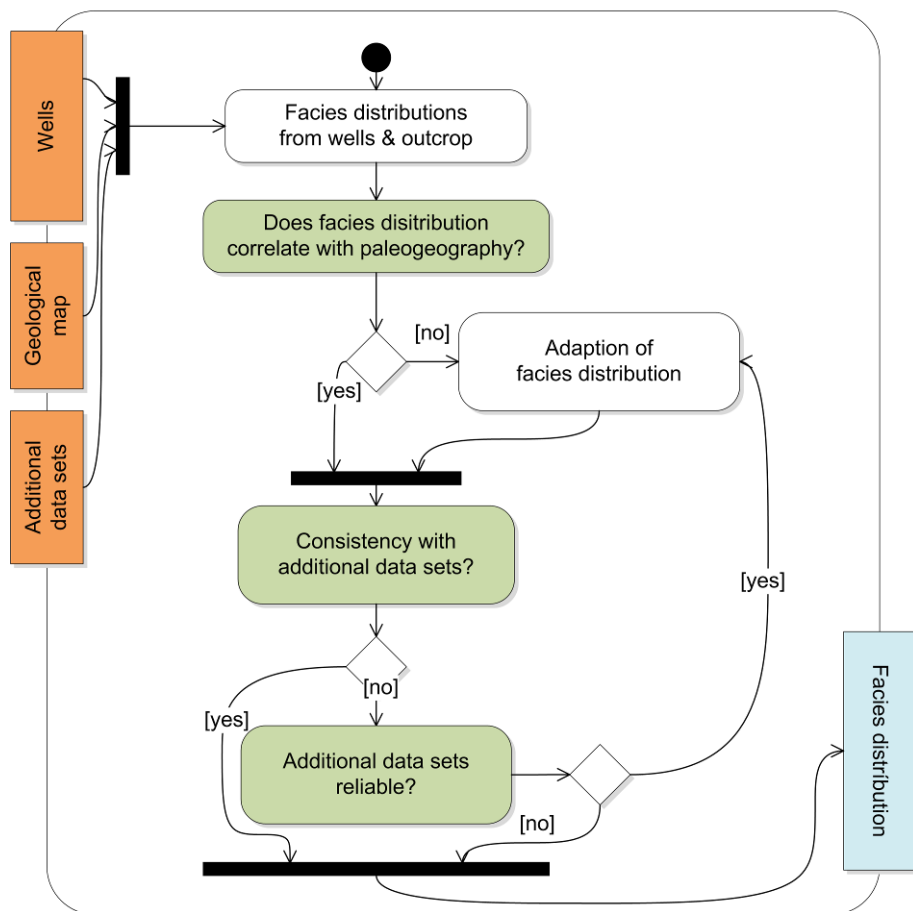


Abb. 3.5.2.3-1: UML diagram - Workflow construction of facies distributions

Atlasblätter

4.1-4.8



3.5.2.4 Datenimport in Gocad

Ziel: Import von Eingangsdatensätzen in Gocad

Kurzbeschreibung

Beschreibung des Imports von Eingangsdatensätzen (Bohrungen, Elemente geologischer Karten, Schichtlagerungskarten, Seismik, Bilder, Profilschnitte) in die 3D-Modellierungssoftware Gocad

Eingangsdaten

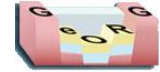
s. Tabelle

Beschreibung

Für den Datenimport stehen in der 3D-Modellierungssoftware Gocad zahlreiche programminterne Konverter zur Verfügung: s. Tab. 3.5.2.4-1

Tab. 3.5.2.4-1: Eingangsdatentypen und korrespondierende Gocadimportroutinen

	Typ	Importprozedur	Gocadobjekt
Bohrpfade	Ascii	<i>Import Objects - Well Data - Path - Column Based File</i>	Well
Bohrmarker (Stratigraphie, Tektonik)	Ascii	<i>Import Objects - Well Data - Markers - Column Based File</i>	Well
Bohrlogs (Temperaturen, Geschwindigkeiten...)	Ascii	<i>Import Objects - Well Data - Logs - Column Based File</i>	Well
Isolinien (SLK, Mächtigkeiten...)	Shapefile	<i>Import Objects - Cultural Data - ArcView Shape</i>	Curve
Ausstrichpolygone (GK, Subcrop,...)	Shapefile	<i>Import Objects - Cultural Data - ArcView Shape</i>	Curve
Verbreitungspolygone	Shapefile	<i>Import Objects - Cultural Data - ArcView Shape</i>	Curve
Störungsspuren	Shapefile	<i>Import Objects - Cultural Data - ArcView Shape</i>	Curve
ArcGIS Grids (Mächtigkeiten,...)	Ascii (Konvertierung im GIS)	<i>Import Objects - Fault Interpretations - PointsSets - Column Based File</i>	PointSet, 2D-Grid
Digitales Geländemodell	Ascii (Konvertierung im GIS)	<i>Import Objects - Fault Interpretations - PointsSets - Column Based File</i>	PointSet
Kartendarstellungen	Tiff (georeferenziert)	<i>Import Objects - Images - World File Image</i>	Voxet
Profilschnitte	Tiff	<i>Import Objects - Images - As 2D Voxet (Georeferenzierung: Voxet - Tools - Resize with Points)</i>	Voxet
Seismikinterpretation (SeisVision)	Ascii	<i>Import Objects Seismic Data - SEG-Y 3D as Voxet</i>	PointSet, Curve
2D-Seismiksektionen	SEG-Y	<i>Import Objects Seismic Data - SEG-Y 2D as Survey</i>	2D-Survey
3D-Seismik	SEG-Y		Voxet
3D-Modelle	3D-Modelle lagen bereits im Gocadformat vor oder wurden vor dem Import ins Gocadformat konvertiert.		



3.5.3 Modellierung von Störungen (*Fault modeling*)

Ziel: Modellierung des Verlaufs von Störungsflächen und Korrelation von Störungen zu einem Netzwerk in Gocad

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte für die Modellierung von Störungsflächen aus Informationen der Eingangsdaten und der Korrelation zu einem Störungsnetzwerk

Eingangsdaten

- Fault sticks aus interpretierter 2D-Seismik (*Seismics*)
- Störungsspuren aus der geologischen Karte (*Geological map*) und Schichtlagerungskarten (*Structural maps*)
- gestörte Bereiche in Bohrungen, relative Position von Horizontbohrmarkern als Indiz für Störungen (*Wells*)
- geologische 2D-Profile aus der Literatur (nur im Schweizer Teilmodell)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Zeitdomäne
- Das Störungsnetzwerk wurde auf der Grundlage der interpretierten 2D-Seismikschnitte korreliert (*Fault correlation*). Ergänzend liefern geologische Karten, Schichtlagerungskarten und Bohrungen Informationen für das Strukturmodell.
- Der Workflow unterscheidet sich je nach Verfügbarkeit des Eingangsdatenbestands (*Which type of input data sets?*). Standardmäßig werden die Störungen aus den Fault sticks der interpretierten 2D-Seismik erzeugt (*Modeling from seismics*). In einigen Fällen, z.B.: bei den Haupttrandverwerfungen, sind die Fault sticks auch mit Störungsspuren auf der Geologischen Karte oder mit tektonischen Elementen aus Schichtlagerungskarten korrelierbar. Diese werden dann als obere Begrenzung der Störung benutzt (*Modeling from seismics and geological map*). In einigen Fällen wurden auf Grundlage der geologischen Karten oder Bohrungen Störungen in das Modell eingefügt, die in den Seismikprofilen nicht erkennbar sind (*Modeling from geological maps or wells*).
- Vereinfachend wurden alle Störungen, deren Liegendbegrenzung in der Seismik nicht eindeutig identifizierbar ist, mit gleichbleibendem oder versteiltem Einfallen bis zum Top Kristallin modelliert
- Die Kombination aller Einzelelemente zu einem Störungsnetzwerk lässt eine inhaltliche und technische Konsistenzprüfung zu (*Combination & consistency check*).
- Da im Schweizer Teilmodell in der Tiefendomäne modelliert wurde und verwertbare reflexionsseismische Daten nur im Westteil des Schweizer Modellgebiets vorlagen, war das grundsätzliche Vorgehen zwar entsprechend, jedoch lag mehr Gewicht auf den bestehenden Kartenwerken und Bohrinformationen.
- Ergebnis: Netzwerk aus Einzelstörungen (Gocad-Surfaceobjekte; *fault model*)



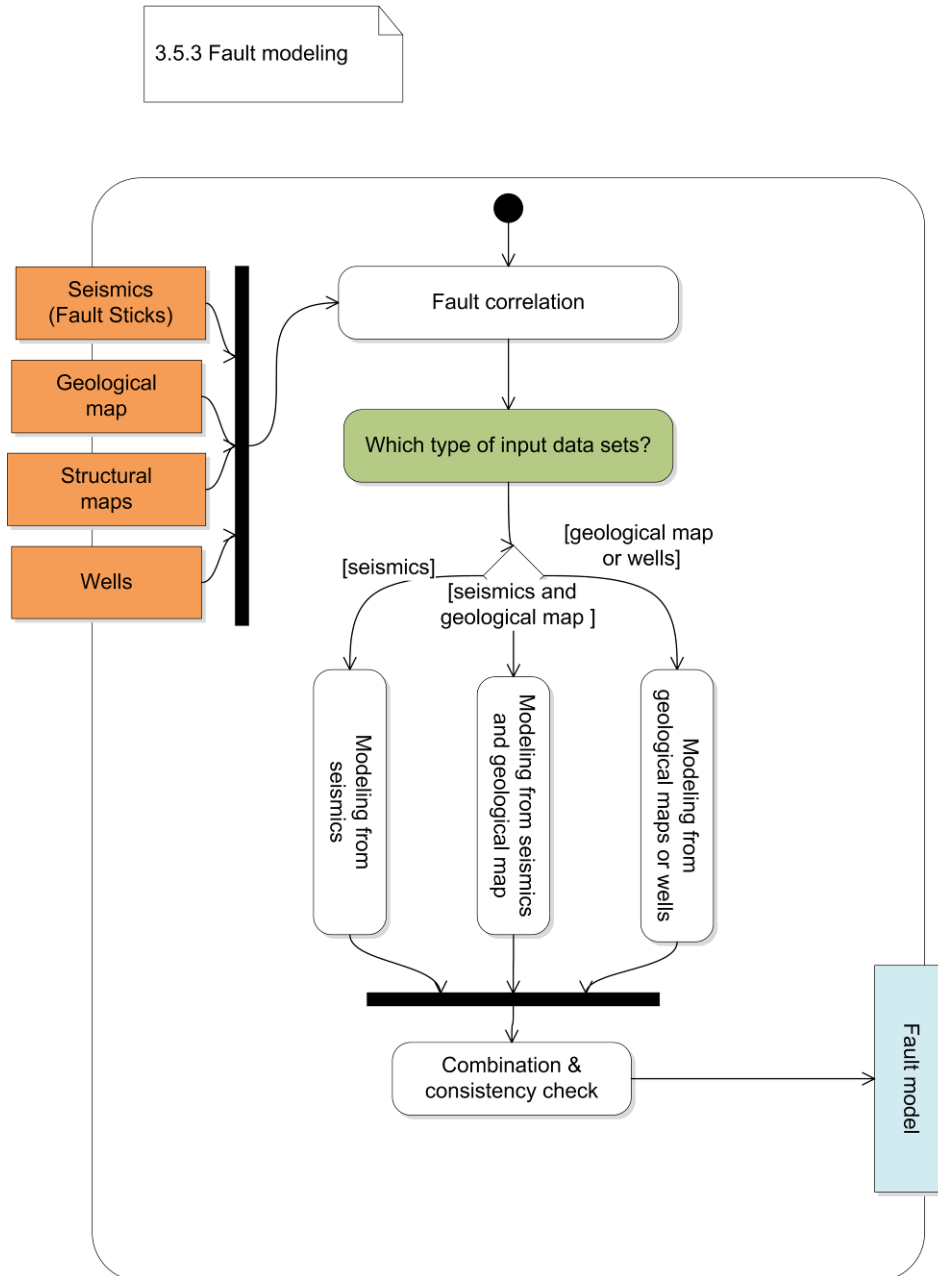
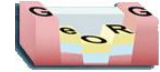


Abb. 3.5.3-1: UML diagram - Workflow fault modeling



3.5.3.1 Störungskorrelation (*Fault correlation*)

Ziel: Korrelation von Störungen zu einem Netzwerk in Gocad

Kurzbeschreibung

Korrelation von Fault sticks aus interpretierter 2D-Seismik zu vorläufigen Störungsverläufen und Überprüfung des Störungsverlaufs

Eingangsdaten

- Fault sticks aus interpretierter 2D-Seismik (*seismics*)
- Störungsspuren aus geologischer Karte (*Geological map*) und Schichtlagerungskarten (*Structural maps*)
- gestörte Bereiche in Bohrungen, relative Position von Horizontbohrmarkern als Indiz für Störungen (*Wells*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Zeitdomäne

Die auf Grundlage der 2D-Seismikinterpretation erfassten Fault sticks werden zu vorläufigen Störungsflächen korreliert (*Preliminary correlation of fault planes from fault sticks*) und mit folgenden Annahmen getestet:

Geometrie der Störungsfläche (*Consistency with internal fault geometry?*)

- Ist die Fläche möglichst verwindungsfrei?
- Bleibt die Versatzrichtung gleich?
- Nimmt der Versatzbetrag im lateralen Verlauf der Störung sinnvoll zu- und ab?
- Passen die Einfallswinkel einzelner Störungsabschnitte zusammen?

Beziehung zu benachbarten strukturgeologischen Elementen (*Consistency with neighbor faults?, Neighbor faults reliable?*)

- Steht die Störung in einem sinnvollen Zusammenhang mit benachbarten tektonischen Elementen? (z.B.: ähnlicher lateraler Verlauf, Zweigstörung eines übergeordneten tektonischen Elements?)
- Passt die Störung in das regionale genetisch-tektonische Konzept?
- Falls nicht, muss das regionale genetisch-tektonische Konzept revidiert werden?

Konsistenz mit Geologischer Karte und Schichtlagerungskarten (*Consistency with geological or structural map?*)

- Passen Modellstörungen zu den Datensätzen der geologischen Karte bzw. zu Schichtlagerungskarten?
- Falls nicht, ist die modellierte Störung zuverlässiger oder sind es die Strukturen der geologischen Karte bzw. der Schichtlagerungskarten? (*Geological or structural map reliable?*)
- > Falls die modellierte Störung als zuverlässiger eingestuft wird, wird die Information der geologischen Karte bzw. Schichtlagerungskarten verworfen.
- > Falls die Information der geologischen Karte bzw. Schichtlagerungskarten als zuverlässiger eingestuft wird, wird die Modellstörung verworfen.

Die Konsistenz mit detailliert auf Karten dargestellten tektonischen Strukturen konnte häufig nicht gewahrt werden, da das der Modellierung zugrunde liegende 2D-Seismiknetz zu große Lücken aufweist bzw. die Auflösungsgrenze der Reflektoren innerhalb eines Seismikprofils über dem vertikalen Versatzbetrag der in Karten und Schichtlagerungskarten dargestellten tektonischen Elemente liegt.

Konsistenz mit Bohrungen (*Consistency with wells?; Wells reliable?*)

- Stimmt der Versatzbetrag der Modellstörung mit dem Befund benachbarter Bohrungen?
- Lassen sich den Bohrfpfad schneidende Modellstörungen im Bohrbefund wiederfinden?



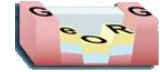


Die Konsistenz mit Bohrungen konnte im GeORG-3D-Modell häufig nicht zufriedenstellend gewahrt werden, da die Auflösungsgrenze der Bohrungen größer ist, als die im Wesentlichen auf der Seismikinterpretation beruhenden Modellelemente.

In einigen Fällen wurden auf Grundlage der geologischen Karten oder Bohrungen Störungen in das Modell eingefügt, die durch die Seismikinterpretation nicht zu erfassen sind. Ursachen hierfür sind einerseits Unstimmigkeiten in der Raumlage von Horizonten zwischen Bohrungen und Seismikinterpretation. Andererseits ließen sich in einigen Fällen Fault sticks benachbarter Seismiklinien trotz verschiedener Korrelationsansätze nicht zu einem struktureologisch konsistenten Bild verbinden, z.B. bei entgegengesetzt einfallenden Fault sticks. Bei diesen Problemen wurden zusätzliche Störungen eingefügt, die struktureologisch unterschiedliche Domänen abtrennen.

Ergebnis: Korrelationsschema für Störungen (*Correlation scheme for faults*)





3.5.3.1 Fault correlation

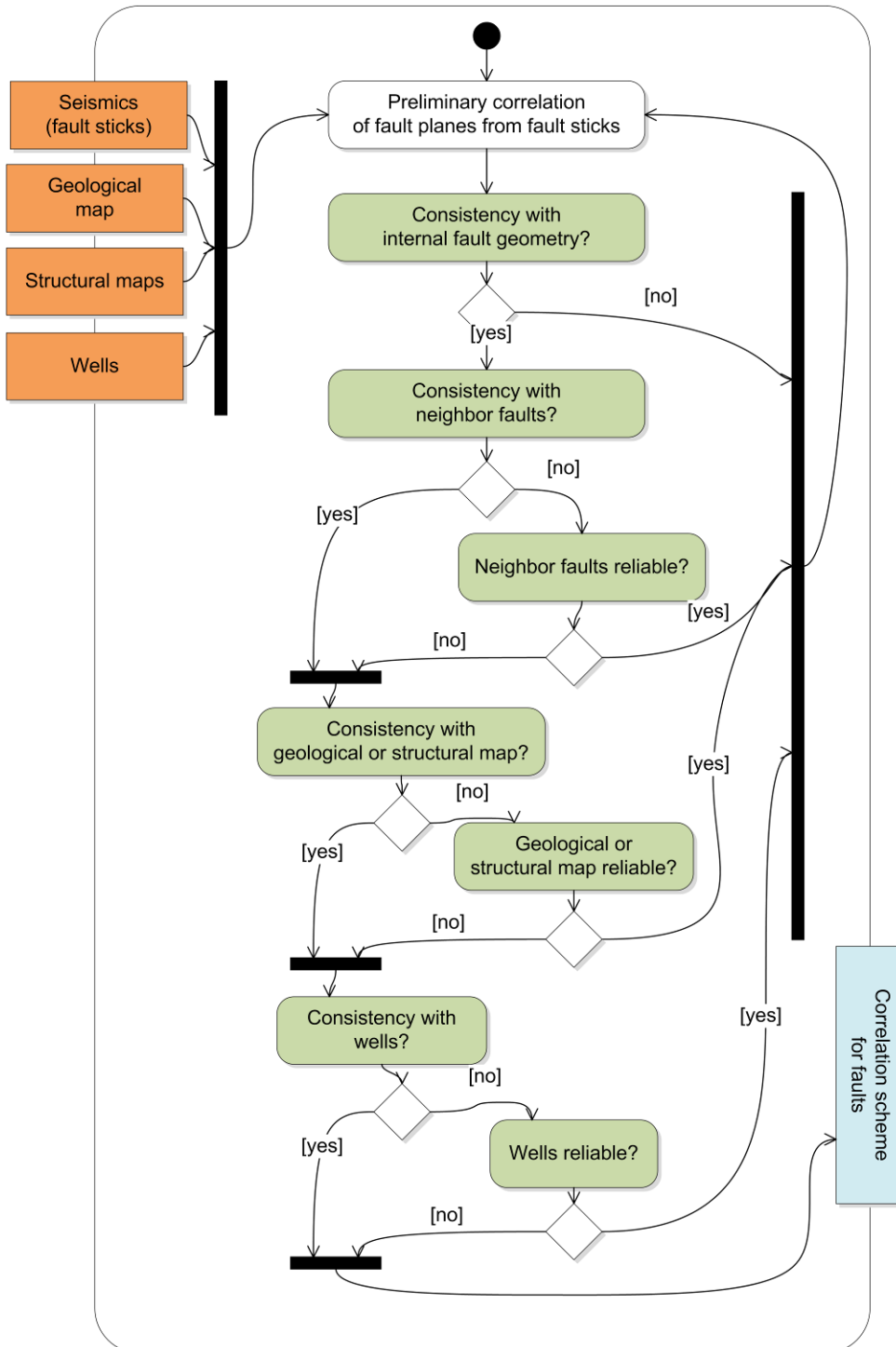


Abb. 3.5.3.1-1: UML diagram - Workflow fault correlation



3.5.3.2 Störungen aus der Seismik (*Faults from seismics*)

Ziel: Modellierung von Störungsflächen aus Fault sticks der interpretierten 2D-Seismik in Gocad

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte in Gocad zur Erzeugung von unverschnittenen Störungsflächen mit Fault sticks als Interpolationsbedingung

Eingangsdaten

- Fault sticks aus interpretierter 2D-Seismik (*seismics*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Zeitdomäne

- Die zu einer Störung gehörenden Fault sticks werden, wenn im Rahmen der Seismikinterpretation vertretbar, aufeinander abgestimmt und die Zahl der Stützpunkte erhöht, mit dem Ziel, eine möglichst glatte Fläche zu erhalten (*Fine tuning fault sticks*).

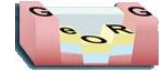
- Danach kann eine Hüllkurve auf der Grundlage der Fault sticks konstruiert werden (*Construction of boundary curve*). Die laterale Ausdehnung der unteren und oberen Störungsbegrenzung richtet sich nach der im Zuge der Korrelation festgelegten Störungshierarchie. Dabei werden Zweigstörungen zunächst über die abschneidenden Hauptstörungen hinaus modelliert, um im Nachgang einen wasserdichten Verschnitt der Zweigstörungen zu gewährleisten.

- Die Störungsfläche wird zunächst direkt aus der Hüllkurve erzeugt (*Surface - New - From Closed Curve; homogeneous triangulation*). Dabei ist auf eine gleichmäßige Dreiecksvermaschung zu achten (*Fault plane modeling*).

- Die Fault sticks werden nachfolgend als Interpolationsbedingung (*Surface - Constraints - Set Control Points; direction: Optimize shooting direction*) gesetzt und die Störungsfläche interpoliert. Die erzeugte Störung folgt somit den Fault sticks der Seismikinterpretation mit hoher Genauigkeit (*Fine tuning of fault stick geometry*).

- Ergebnis: Störungen (unverschnitten; *Faults*)





3.5.3.2 Faults from seismics

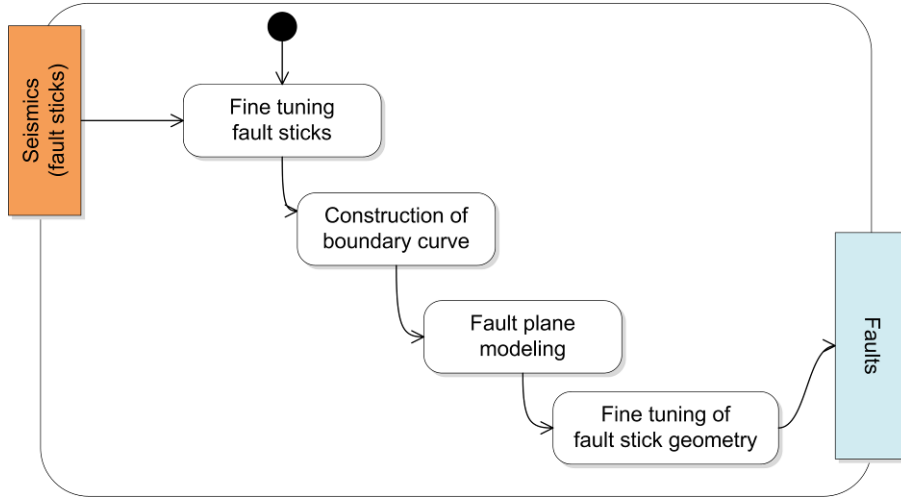


Abb. 3.5.3.2-1: UML diagram - Workflow fault modeling from seismics



3.5.3.3 Störungen aus Seismik und Geologischen Karten / Schichtlagerungskarten (*Faults from seismic and geological maps / structural maps*)

Ziel: Modellierung von Störungsflächen aus Fault sticks der interpretierten 2D-Seismik und Störungsspuren aus der Geologischen Karte bzw. aus Schichtlagerungskarten in Gocad

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte in Gocad zur Erzeugung von unverschnittenen Störungsflächen mit Störungsspuren aus Geologischer Karte / Schichtlagerungskarten und Fault sticks als Interpolationsbedingung

Eingangsdaten

- Fault Sticks aus interpretierter 2D-Seismik (*Seismics*)
- Störungsspuren aus Geologischer Karte und/oder Schichtlagerungskarten (*Geological map / structural maps*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Zeitdomäne
- Der Arbeitsablauf folgt in wesentlichen Teilen der im Kap. 3.5.3.2 beschriebenen Methodik.
- Abweichend jedoch wird zunächst die obere Begrenzung der Störung aus den Störungslinien, die zuvor auf das DGM projiziert wurden oder durch tektonische Elemente von Schichtlagerungskarten extrahiert (*Modeling of upper fault boundary*). Setzt sich die Störungsspur aus mehreren Teilobjekten zusammen, werden diese vor der weiteren Modellierung zu einem Objekt zusammengefasst.
- Der untere Teil orientiert sich wie in Kap. 3.5.3.2 bzw. 3.5.3.1 beschrieben an den unteren Enden der Fault sticks
- Während der Feinjustierung der Fault sticks ist darauf zu achten, dass deren Raumlage konsistent mit der vorher extrahierten Störungsspur ist. Im Zweifelsfall sollte die Geometrie der Fault sticks mit Hilfe der Seismikprofile nochmals geprüft und ggf. geändert werden (*Fine tuning fault sticks*).
- Die Störungsfläche wird zunächst direkt aus der Hüllkurve (*Construction of boundary curve*) erzeugt (*Surface - New - From Closed Curve; homogeneous triangulation*). Dabei ist auf eine gleichmäßige Dreiecksvermaschung zu achten (*Modeling of fault plane*).
- Die Fault sticks werden nachfolgend als Interpolationsbedingung (*Surface - Constraints - Set Control Points; Optimize shooting direction*) gesetzt und die Störungsfläche interpoliert. Die Störungsfläche folgt somit den Fault sticks der Seismikinterpretation mit hoher Genauigkeit (*Fine tuning of fault stick geometry*).
- Ergebnis: Störungen (unverschnitten; *Faults*)

3.5.3.3 Faults from seismics and geological map / structural maps

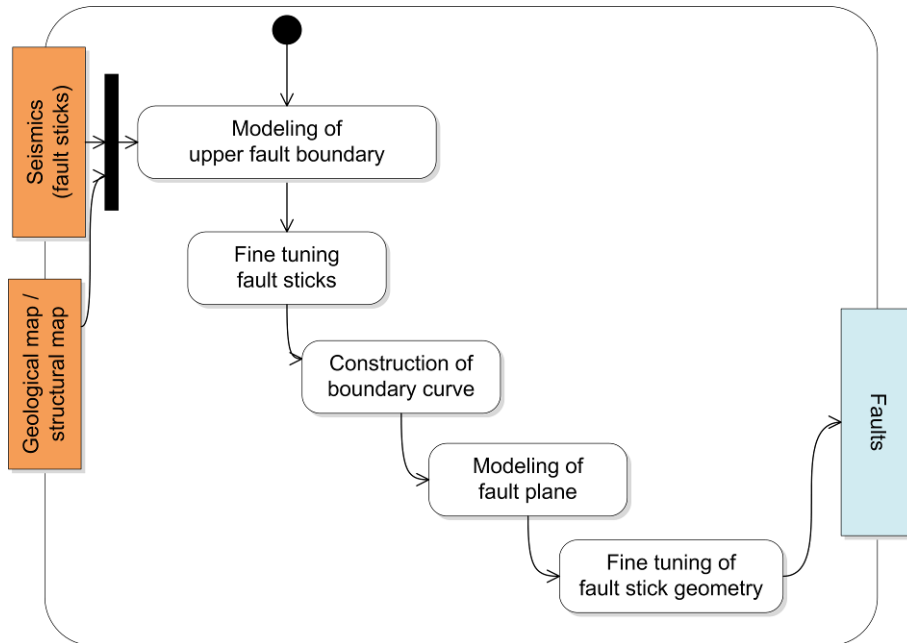


Abb. 3.5.3.3-1: UML diagram - Workflow fault modeling from seismics and geological maps / structural maps



3.5.3.4 Störungen aus der Geologischen Karte / Schichtlagerungskarten oder Bohrungen und/oder 2D-Profilen (*Faults from geological or structural maps or wells and/or 2d-cross-sections*)

Ziel: Modellierung von Störungsflächen auf der Grundlage von Störungsspuren aus der Geologischen Karte bzw. aus Schichtlagerungskarten in Gocad und / oder Bohrungsinformationen

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte in Gocad zur Erzeugung von unverschnittenen Störungsflächen mit Störungsspuren aus Geologischer Karte / Schichtlagerungskarten und / oder Bohrungsinformationen

Eingangsdaten

- Störungsspuren aus Geologischer Karte und Schichtlagerungskarten (*Geological & Structural maps*)
- gestörte Bereiche in Bohrungen, relative Position von Horizontbohrmarkern als Indiz für Störungen (*Wells*)
- geologisch interpretierte 2D-Profile (nur in der Schweiz; *2d-cross-sections*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Zeitdomäne

- In einigen Fällen wurden auf Grundlage der Geologischen Karte oder Bohrungen Störungen in das Modell eingefügt, die durch die Seismikinterpretation nicht zu erfassen sind. Für diese Störungen stehen keine Fault sticks zur Verfügung. Die Raumlage der Störungsfläche wird dadurch vollständig durch die Geometrie der Hüllkurve bestimmt. Demzufolge ist die Position dieses Störungstyps und dessen räumlicher Verlauf unsicher.

- Gibt es korrespondierende, auf das DGM projizierte Störungsspuren aus der Geologischen Karte oder tektonische Elemente auf Schichtlagerungskarten, werden diese zunächst als obere Begrenzung der Störung extrahiert (*Fault trace on map available?*). Setzt sich die Störungsspur aus mehreren Teilobjekten zusammen, werden diese vor der weiteren Modellierung zu einem Objekt zusammengefasst (*Modeling of upper fault boundary from map*).

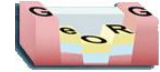
- Fehlen diese Hinweise auf Karten, muss die obere Störungsbegrenzung so gelegt werden, dass sie einerseits die aktuelle Datenlage, v.a. die Raumlage der Bohrmarker, berücksichtigt und andererseits ins allgemeine regionale Störungsbild passt, z.B.: möglichst parallel zu den in der Seismik nachgewiesenen Elementen verläuft (*Modeling of upper boundary from well markers*).

- Da in der Regel Hinweise auf die räumliche Störungsgeometrie fehlen, wird dieser Störungstyp als vertikal stehend angenommen. Die untere Begrenzung weist in diesem Fall die gleiche Raumlage auf, wie der obere Teil der Hüllkurve. In Einzelfällen wurden Einfallsrichtung und -winkel aber auch an das regionale tektonische Bild angepasst (*Modeling of lower fault boundary*).

- Die Störungsfläche wird direkt aus der Hüllkurve erzeugt (*Surface - New - From Closed Curve; homogeneous triangulation*). Dabei ist auf eine gleichmäßige Dreiecksvermaschung zu achten (*Modeling of fault plane*).

- Da im Schweizer Teilmodell größtenteils keine Informationen über die geometrische Form der einzelnen Störungen zur Tiefe hin vorlagen, wurden dort Störungen als ebene Flächen modelliert. Ausnahmen bilden die Allschwil-Verwerfungszone und die begrenzenden Störungen der Rheintalflexur. Sie wurden als listrische Abschiebungen modelliert. Für alle Störungen gilt: Einfallsrichtung und -winkel bzw. die listrische Ausbildung wurden aufgrund des geologischen Kontexts abgeschätzt bzw. aus der bestehenden Literatur (2D- Profile) übernommen. In wenigen Fällen konnte diese Informationen auch direkt aus den seismischen Linien übernommen werden.





- Ergebnis: Störungen (unverschnitten; *Faults*)

3.5.3.4 Faults from geological or structural maps or wells and/or cross-sections

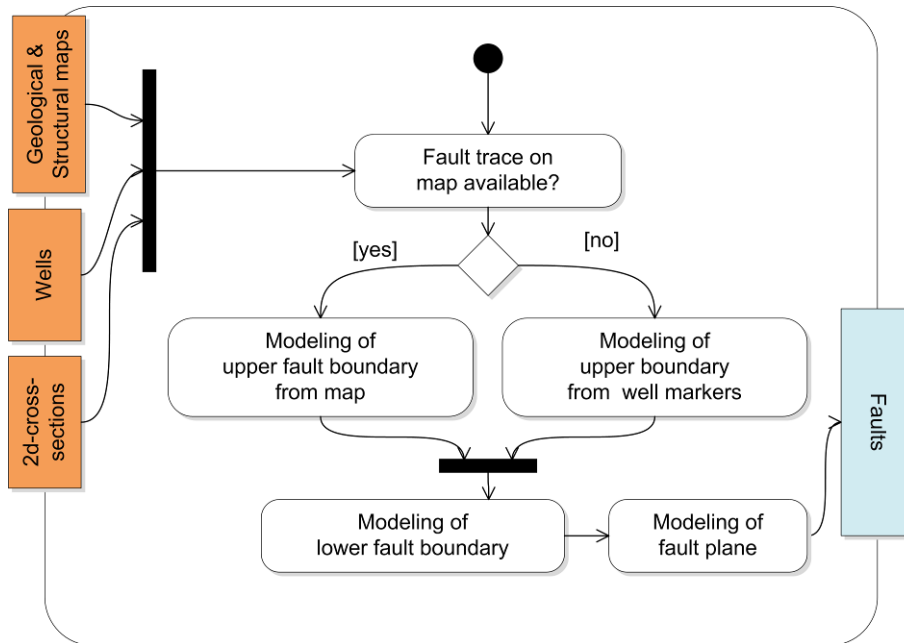


Abb. 3.5.3.4-1: UML diagram - Workflow fault modeling from geological or structural maps or wells and/or 2d-cross-sections



3.5.4 Modellierung von Horizonten (*Horizon modeling*)

Ziel: Modellierung von Horizontflächen auf der Grundlage von Seismik, Bohrungen, Schichtlagerungsinformationen und Mächtigkeitsverteilungen in Gocad

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte für die Modellierung von Horizonten aus Horizontinformationen aus der 2D-Seismik, Bohrungen, Schichtlagerungskarten, Mächtigkeitsverteilungen und Verbreitungspolygonen

Eingangsdaten

- interpretierte Horizonte aus der 2D-Seismik (Zeitdomäne, in der Schweiz auch in die Tiefendomäne konvertiert)
- Bohrungen (Tiefendomäne und konvertiert in der Zeitdomäne)
- Schichtlagerungsinformationen aus der Literatur
- Mächtigkeitsverteilungen, Verbreitungspolygone (s. vorbereitende Arbeitsschritte)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt in Zeit- und Tiefendomäne (*Time domain, Depth domain*)
- Die Modellierung der Horizonte erfolgte in Abhängigkeit von deren Erkennbarkeit in der 2D-Seismik und dem weiteren Eingangsdatenbestand mit verschiedenen Methoden:
 - Die direkte Modellierung von Horizonten erfolgt mit Hilfe von Bohrungen und der Seismikinterpretation in der Zeitdomäne (s. Kap. 3.5.4.1). Diese Methodik ist für alle zuverlässig in der Seismik erkennbaren Horizonte anwendbar. Dies sind v.a. die känozoischen Horizonte und einige mesozoische Grenzflächen. Aufgrund der tektonischen Zerlegung des Modellgebiets und den damit einhergehenden lokal schwankenden synsedimentären känozoischen Schichtmächtigkeiten ist die direkte Modellierung auf Grundlage der Seismikinterpretation die bevorzugte Methode (*Direct horizon modeling with wells and seismics*). Die direkt in der Zeitdomäne modellierten Horizonte werden nachfolgend in die Tiefendomäne konvertiert (*Time-depth conversion*).
 - Viele meso- und paläozoische Horizonte zeigen keine eindeutige seismische Charakteristik. Aus diesem Grund wurden diese Modelleinheiten nach der Zeit-Tiefenkonvertierung mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen in der Tiefendomäne aus den vorher in der Zeitdomäne modellierten Horizonten abgeleitet (s. Kap. 3.5.4.2). Diese Vorgehensweise ist nur für Schichtpakete mit vernachlässigbaren tektonisch bedingten synsedimentären Mächtigkeitschwankungen nutzbar (*Indirect horizon modeling with thicknesses*).
 - Abweichend zur direkten Modellierung in der Zeitdomäne wurden im Schweizer Teilmodell zunächst alle Eingangsdaten in die Tiefendomäne überführt und die Horizonte im Nachgang direkt modelliert (s. Kap. 3.5.4.3; *Direct horizon modeling*)
 - Die Modellierung der Lockergesteinsbasis unterscheidet sich aufgrund des regional stark variierenden Eingangsdatenbestands und der eingeschränkten Erkennbarkeit in der Seismik von den Arbeitsabläufen der anderen Horizonte (s. Kap. 3.5.4.4; *Modeling of base unconsolidated rocks*).
 - Nach Modellierung der Horizonte konnten alle Einzelelemente kombiniert und auf Konsistenz geprüft werden (*Combination and consistency check*).
- Ergebnis: Horizontmodell (*Horizon model*)



Tabelle 3.5.4-1: Modellhorizonte und deren Modellierungsmethodik

Kürzel	Name	Methodik BW/RLP/FR	Methodik CH
010_blg	Basis Lockergesteine	Regional verschiedene Methoden in der Tiefendomäne	
020_bhy	Basis Landau-Formation	nur in BW und RLP, direkte Modellierung Zeitdomäne	nicht vorhanden
040_bff	Basis Froidefontaine-Formation	direkte Modellierung Zeitdomäne	direkte Modellierung bzw. Anpassung bestehender Abschnitte aus Vorgängermodell Tiefendomäne
050_bt	Basis Tertiär	direkte Modellierung Zeitdomäne	direkte Modellierung Tiefendomäne
060_bjo	Basis Oberjura	indirekt abgeleitet aus 070_thr in Tiefendomäne	direkte Modellierung bzw. Anpassung bestehender Abschnitte aus Vorgängermodell Tiefendomäne
070_thr	Oberfläche Hauptrogenstein	direkte Modellierung Zeitdomäne	direkte Modellierung bzw. Anpassung bestehender Abschnitte aus Vorgängermodell Tiefendomäne
090_bju	Basis Unterjura (nicht in Rheinland-Pfalz)	indirekt abgeleitet aus 070_thr o. 100_bku in Tiefendomäne	direkte Modellierung bzw. Anpassung bestehender Abschnitte aus Vorgängermodell Tiefendomäne
100_bku	Basis Keuper	z.T. direkte Modellierung Zeitdomäne o. indirekt abgeleitet aus 090_bju in Tiefendomäne	direkte Modellierung bzw. Anpassung bestehender Abschnitte aus Vorgängermodell Tiefendomäne
110_tms	Oberfläche Muschelkalksalinar	indirekt abgeleitet aus 100_bku in Tiefendomäne	direkte Modellierung bzw. Anpassung bestehender Abschnitte aus Vorgängermodell Tiefendomäne
120_bmu	Basis Muschelkalk	indirekt abgeleitet aus 100_bku in Tiefendomäne	direkte Modellierung Tiefendomäne
130_btr	Basis Trias	indirekt abgeleitet aus 120_bmu in Tiefendomäne	direkte Modellierung Tiefendomäne
170_tkr	Oberfläche Grundgebirge	indirekt abgeleitet aus 130_btr in Tiefendomäne	direkte Modellierung Tiefendomäne



3.5.4 Horizon modeling

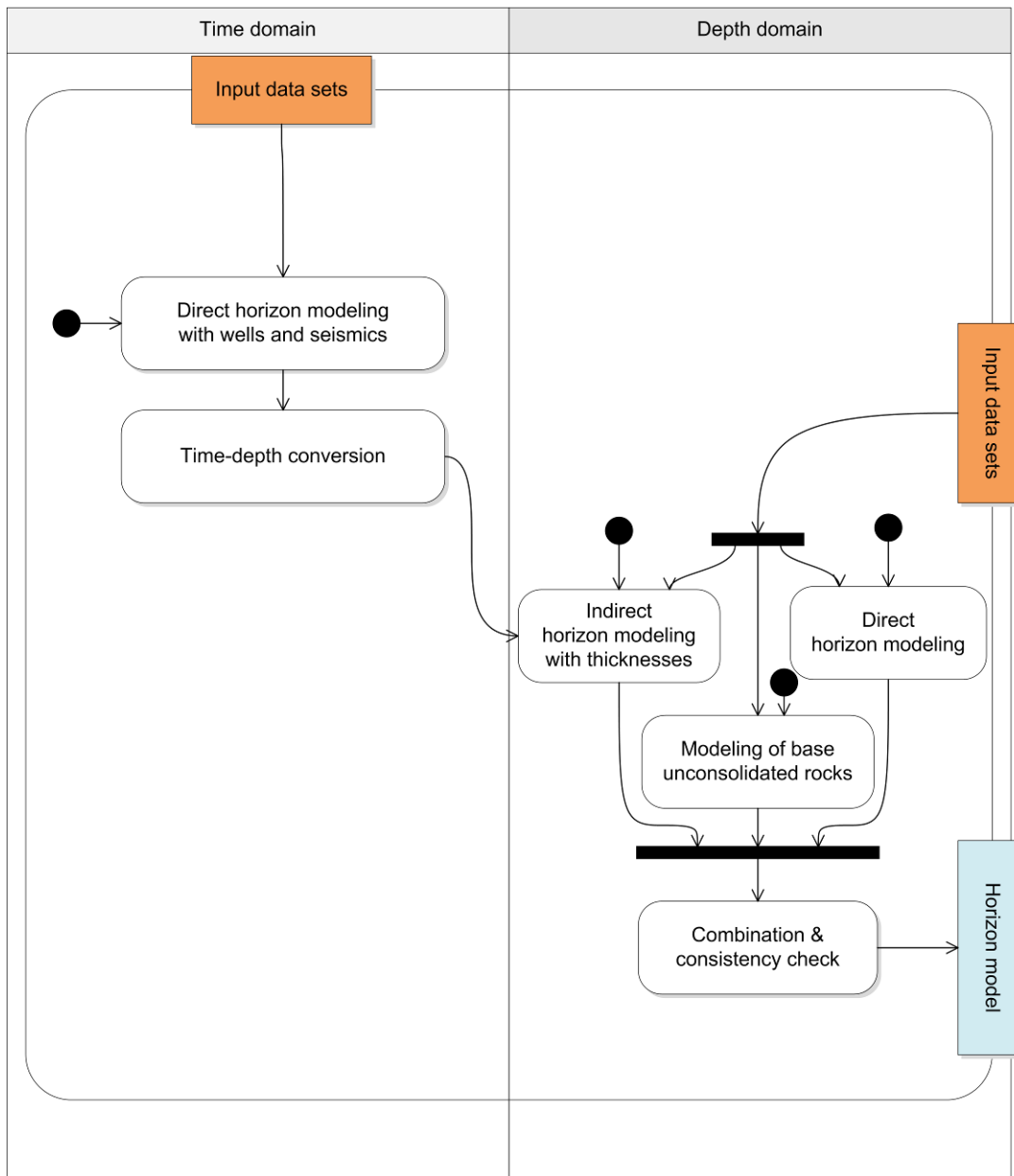
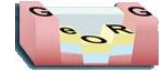


Abb. 3.5.4-1: UML diagram - Workflow horizon modeling



3.5.4.1 Direkte Modellierung von Horizonten mit Bohrungen und Seismik (*Direct horizon modeling with wells and seismics*)

Ziel: Modellierung von Horizontflächen auf der Grundlage von Seismik und Bohrungen in Gocad

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte für die Modellierung von Horizonten aus Bohrungen und Seismik

Eingangsdaten

- interpretierte Horizonte aus der 2D-Seismik (*seismics*)
- Bohrungen (*wells*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Zeitdomäne

- Die direkte Modellierung von Horizonten erfolgt mit Hilfe von Bohrungen und der Seismikinterpretation in der Zeitdomäne. Diese Methodik ist für alle zuverlässig in der Seismik detektierbaren Horizonte anwendbar. Das sind v.a. die känozoischen Horizonte und einige mesozoische Grenzflächen. Aufgrund der tektonischen Zerlegung des Modellgebiets und den damit einhergehenden lokal schwankenden synsedimentären känozoischen Schichtmächtigkeiten ist die direkte Modellierung auf Grundlage der Seismikinterpretation die bevorzugte Methode.

- Die von Störungen abgegrenzten Teilbereiche der Horizonte werden zunächst separat modelliert. Daher ist es notwendig, die Eingangsdatensätze (Seismik, Bohrungen) entsprechend aufzutrennen (*Division of input data sets according to fault blocks*).

- Ergebnis eines ersten Modellierschrittes sind an den Eingangsdatenbestand angepasste Bruttoflächen, die über die angrenzenden Störungen hinausragen (*Generation of gross planes*). Diese vereinfachen eventuelle Änderungen im Nahbereich von Störungen und gewährleisten einen wasserdichten Verschnitt.

- Gocad-Arbeitsschritte:

- Fläche erstellen: *Surface - New - From PointsSets Medium Plane*
- Constraints setzen:
 - *Control Points: Surface - Constraints - Control Points - Set Control Points*
 - *Constraints on Border: Surface - Constraints - Constraints On Borders - Set On Straight Line - All Borders*
- schrittweise Interpolation:
 - *Interpolation: Surface - Interpolation - Geometry - On Entire Surface*
 - *Verfeinerung der Triangulation: Surface - Tools - Split - All*

- Eine nachfolgende visuelle Überprüfung der Geometrie konzentriert sich auf starke lokale Schwankungen der Raumlage (*Geometry ok?*). Treten diese auf, liegt der Verdacht nahe, dass in der Seismikinterpretation Bohrungen nicht einbezogen wurden oder Probleme bei der Störungskorrelation auftreten (*Check of input data sets*). Im Bedarfsfall müssen Seismik und/oder Korrelation nochmals überarbeitet und die Bruttoflächen erneut erstellt werden.

- Da Randbereiche der einzelnen Horizontabschnitte in der Regel nur von wenigen Seismickicks fixiert sind, kommt es häufig zu interpolationsbedingten Artefakten des Vertikalversatzes (*Displacement ok?*). Im Bedarfsfall helfen zusätzliche Hilfsdatensätze (Kurven, Punkte), um die Randbereiche in eine zu den Nachbardatensätzen konsistente Position zu zwingen (s. Kap. 3.5.3.1; *Fine tuning of fault displacement*).



- Nach der Feinjustierung der Geometrie stehen die Bruttoflächen für einen wasserdichten Verschnitt mit den Störungen (*Cut with faults*) und den Verbreitungspolygonen (*Cut with occurrence*) zur Verfügung.
- Ergebnis: Horizonte als Gocadflächen in der Zeitdomäne (*Horizon*)

3.5.4.1 Direct horizon modeling with wells and seismics

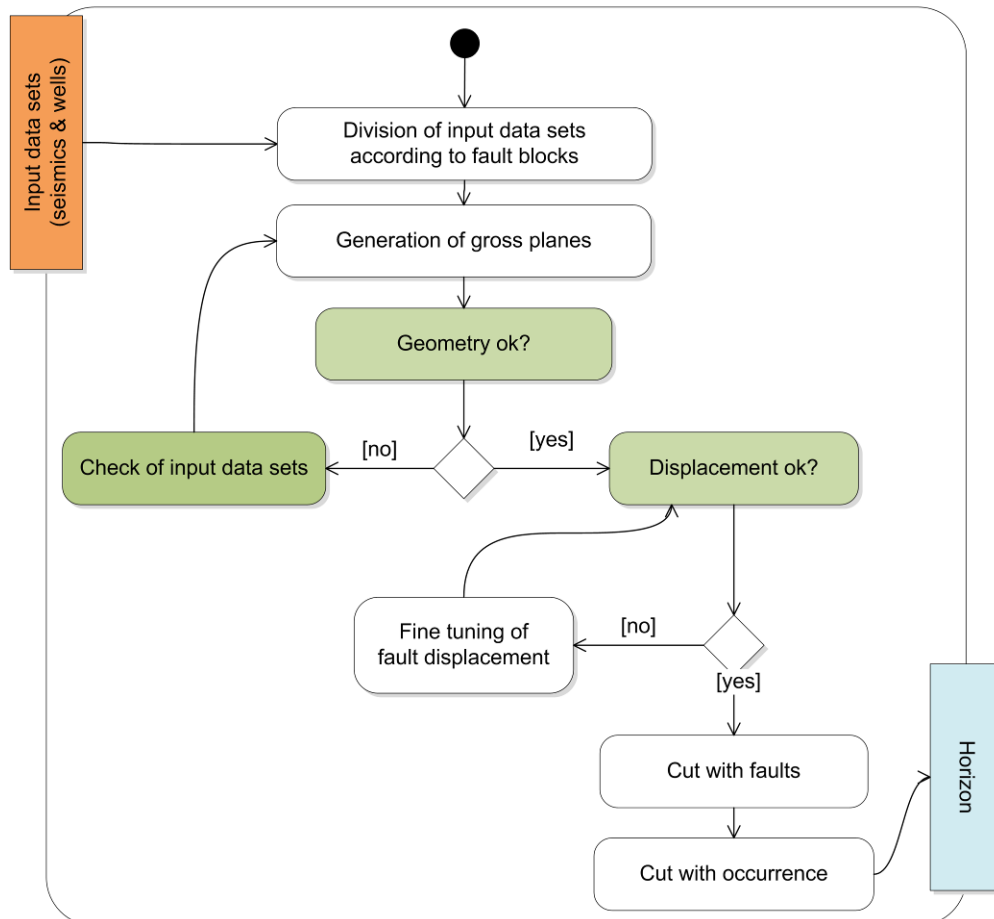
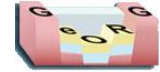


Abb. 3.5.4.1-1: UML diagram - Workflow Direct horizon modeling with wells and seismics



3.5.4.2 Indirekte Modellierung von Horizonten mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen (*Indirect horizon modeling with thickness distributions*)

Ziel: Ableitung von Horizonten aus bereits modellierten Referenzhorizonten mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen

Kurzbeschreibung

Die Methode leitet in der Tiefendomäne Horizonte mit Hilfe von bereits modellierten Grenzflächen durch Addition bzw. Subtraktion von Mächtigkeitsverteilungen ab.

Eingangsdaten

- Referenzhorizont (Gocad-TSurf-Objekt, entweder in der Zeitdomäne direkt modelliert und konvertiert oder ein bereits modellierter Horizont, der seinerseits indirekt mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen erstellt wurde; *Reference horizon*)
- Mächtigkeitsverteilung (Gocad-TSurf-Objekt; *Thickness distribution*)
- Bohrmarker mit Raumlage des abgeleiteten Horizonts (*Wells*)
- weitere Datenquellen (Schichtlagerungskarten, 3D-Modelle etc.; *Additional data sets*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne
- Viele meso- und paläozoische Horizonte zeigen keine eindeutige seismische Charakteristik. Aus diesem Grund wurden diese Modelleinheiten nach der Zeit-Tiefenkonvertierung mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen in der Tiefendomäne aus den vorher in der Zeitdomäne modellierten Horizonten abgeleitet. Diese Vorgehensweise ist nur für Schichtpakete mit vernachlässigbaren synsedimentären Mächtigkeitsschwankungen nutzbar.
- Im ersten Schritt wird eine Kopie des Referenzhorizonts durch Addition oder Subtraktion der Mächtigkeiten der entsprechenden Verteilung neu positioniert, z.B.: Basis Muschelkalk = Basis Keuper - Mächtigkeit Muschelkalk (*Repositioning of reference horizon*);
- Weil die neu positionierte Fläche nicht an die aktuelle Störungsgeometrie angepasst ist, wird eine über die angrenzenden Störungen hinaus ragende Bruttofläche erstellt (Gocadworkflow analog zu Kap. 3.5.4.1; *Gross horizon from reference horizon*).
- Eine Konsistenzprüfung mit den Bohrmarkern testet die Raumlage der neu positionierten Fläche (*Does horizon fit with well markers?*). Im Bedarfsfall ist die Bruttofläche an den Bohrmarkerbestand anzupassen (*Repositioning with well markers*).
- Stehen weitere Datenquellen, z.B.: Schichtlagerungskarten aus der Literatur zur Verfügung, findet eine weitere Konsistenzprüfung statt (*Does horizon fit with additional data sets?*). Falls die Modellhorizonte und die weiteren Datenquellen unterschiedliche Raumlagen aufweisen, sollte zunächst die Zuverlässigkeit der zusätzlichen Datenquellen geprüft werden (*Additional data sets reliable?*). Häufig standen für ältere Konstruktionen jüngere Bohrungen und Seismikkampagnen nicht zur Verfügung. Erweisen sich die zusätzlichen Datenquellen als zuverlässig, ist die Modellfläche im Bedarfsfall nochmals zu repositionieren (*Repositioning with additional data sets*).
- Da Randbereiche der einzelnen Horizontabschnitte in der Regel nur ungenügend mit Eingangsdaten fixiert sind, kommt es häufig zu interpolationsbedingten Artefakten des Vertikalversatzes (*Adaption to fault network; Displacement ok?*). Im Bedarfsfall helfen zusätzliche Hilfsdatensätze (Kurven, Punkte), um die Randbereiche in eine zu den Nachbardatensätzen konsistente Position zu zwingen.



- Nach der Feinjustierung der Geometrie (*Fine tuning of fault displacement*) stehen die Bruttoflächen für eine Verschneidung mit den Störungen und den Verbreitungspolygonen zur Verfügung (*Cut with faults & occurrence*).

- Ergebnis: Horizonte als Gocadflächen in der Zeitdomäne (*Horizon*)

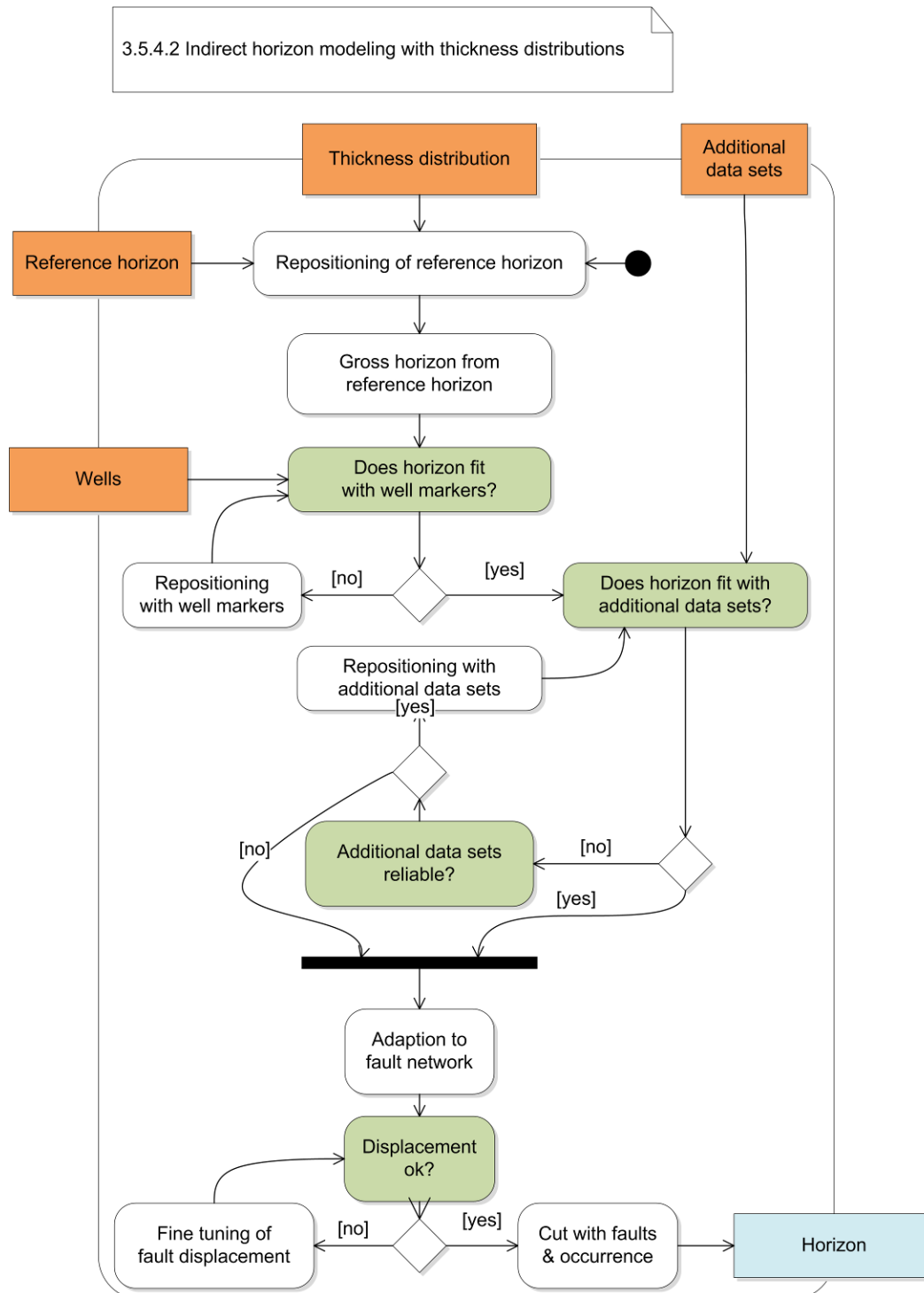
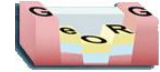


Abb. 3.5.4.2-1: UML diagram - Workflow indirect horizon modeling with thickness distributions



3.5.4.3 Direkte Modellierung von Horizonten in der Tiefendomäne (CH) - *Direct horizon modeling in depth domain (CH)*

Ziel: In der Tiefendomäne modellierte Horizonte des Schweizer Teilmodells

Kurzbeschreibung

Die Methode dient zur Erstellung von Horizonten in der Tiefendomäne. Sie wurde nur im Schweizer Teilmodell angewandt.

Eingangsdaten

- interpretierte Horizonte aus der 2D-Seismik (umgerechnet in Tiefendomäne)
- Bohrungen
- Mächtigkeitsverteilungskarten
- geologische Karten
- weitere Datenquellen (3D-Modelle, 2D-Profile)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne

- Die direkte Modellierung von Horizonten erfolgt in der Tiefendomäne mit Hilfe von Bohrungen, 2D-Profilen, Mächtigkeitsverteilungskarten, geologischen Karten und der Seismikinterpretation. Je nach Qualität und räumlicher Verteilung wurden die Eingangsdaten während des Modellierungsprozesses unterschiedlich gewichtet.

Hierbei werden Bohrinformationen meist am höchsten gewichtet. 2D-Profile dienen zur besseren Berücksichtigung des tektonischen Baustils und waren eine wichtige Grundlage in Bereichen mit besonders schlechter Basisdatenlage wie z.B. im Bereich des Tafeljuras (südlich der Ergolz) und des Faltenjuras (Belchen- und Landskronstruktur). Die geologischen Karten lieferten vor allem im Tafeljura eine gute Anbindung der Tiefenstrukturen an die Oberfläche.

- Ergebnis eines ersten Modellierschrittes sind an den Eingangsdatenbestand angepasste Bruttoflächen, die über die angrenzenden Störungen hinausragen. Diese vereinfachen eventuelle Änderungen im Nahbereich von Störungen und sollen einen wasserdichten Verschnitt gewährleisten.

Da die verschiedenen Datensätze oft nicht in einem Arbeitsschritt gemeinsam berücksichtigt werden können bzw. keine guten Ergebnisse liefern, beruht die Modellierung eines Horizontes auf der iterativen Abfolge von Anpassung an einen oder mehrere Eingangsdatensätze (*Generation of gross horizons based on 2 to 4 input data sets*) und Überprüfung der Konsistenz mit weiteren einfließenden Datensätzen (*Consistency check with additional data sets - gross horizon ok?*).

Da insbesondere Mächtigkeiten immer von zwei Horizonten abhängig sind und als Datensatz keine absoluten Tiefen liefern, müssen auch immer wieder die Auswirkungen der Modellierung eines Horizontes auf andere Horizonte berücksichtigt werden (*Horizon adaption*).

- Ergebnis: Horizonte als Gocadflächen in der Tiefendomäne (*Horizon*)



3.5.4.3 Direct horizon modeling in depth domain (CH)

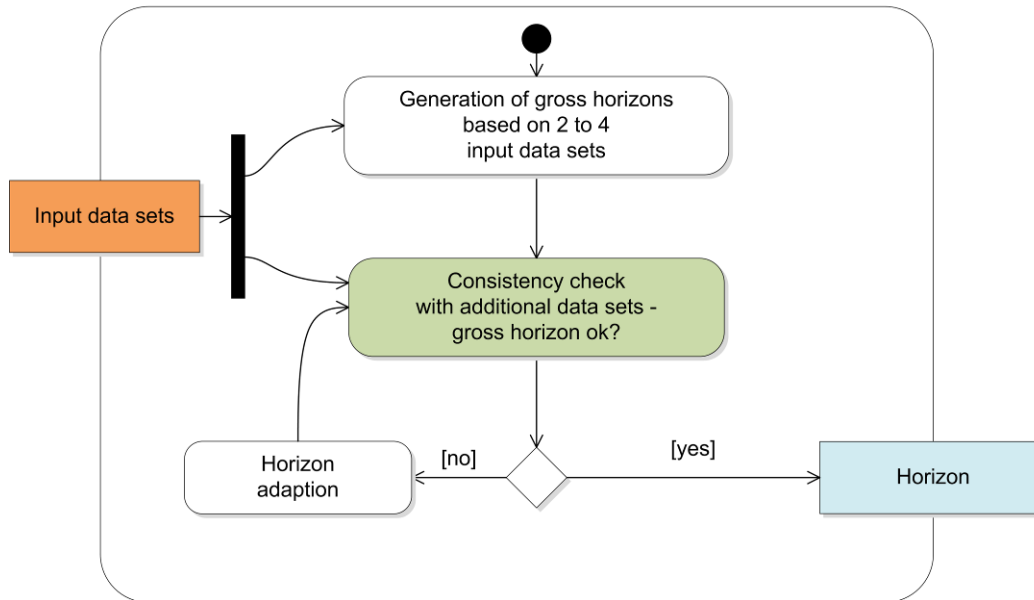
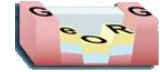


Abb. 3.5.4.3-1: UML diagram - Workflow direct horizon modeling in depth domain (CH)



3.5.4.4 Modellierung der Lockergesteinsbasis (*Modeling of base unconsolidated rocks*)

Ziel: Modellierung des Horizontes 010_blg (Basis Lockergesteine) in Gocad

Kurzbeschreibung

Beschreibung regional unterschiedlicher Arbeitsschritte zur Modellierung des Horizontes 010_blg (Basis Lockergesteine) aufgrund des stark variierenden Eingangsdatenbestands

Eingangsdaten

- Bohrungen
- Schichtlagerungskarten
- Mächtigkeitsangaben geologischer Karten (Frankreich)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne
- Die Modellierung der Lockergesteinsbasis unterscheidet sich aufgrund des regional stark variierenden Eingangsdatenbestands und der eingeschränkten Erkennbarkeit in der Seismik von den Arbeitsabläufen der anderen Horizonte.
- In Baden-Württemberg standen neben den Bohrmarkern auch Isolinienpläne aus Interreg-Vorgängerprojekten zur Verfügung (publiziert in Wirsing & Luz 2007) - *Modeling Baden-Württemberg*
- Im rheinland-pfälzischen Gebiet konzentrierte sich die Modellierung auf die Auswertung der Bohrmarker - *Modeling Rheinland-Pfalz*
- Für den französischen Anteil konnten in Gebieten ohne Iffezheim-Formation Mächtigkeitsangaben aus den geologischen Karten neben Bohrungen für die Positionierung der Lockergesteinsbasis herangezogen werden. Ergänzend standen Schichtlagerungskarten für Teilbereiche zur Verfügung - *Modeling France*
- In der Schweiz wurden mehr als 9000 Bohrungen für die Modellierung herangezogen - *Modeling Schweiz*
- Die in den einzelnen Teilmodellen erstellten Horizontflächen wurden nachfolgend miteinander kombiniert und abgeglichen (*Combination & consistency check*).
- Ergebnis: Lockergesteinsbasis als Gocad-Surfaceobjekt (*Horizon*)



3.5.4.4 Modeling of base unconsolidated rocks

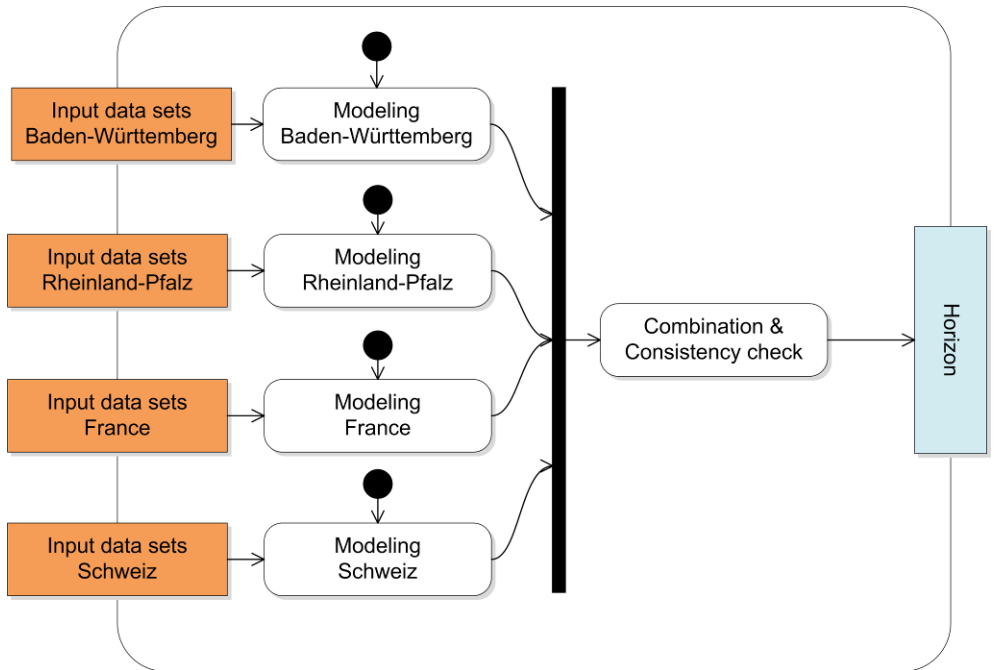
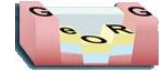


Abb. 3.5.4.4-1: UML diagram - Workflow modeling of base unconsolidated rocks

Literaturhinweise

Wirsing & Luz (2007)



3.5.4.4.1 Modellierung der Lockergesteinsbasis in Baden-Württemberg

Ziel: Modellierung der Lockergesteinsbasis in der Tiefendomäne im baden-württembergischen Anteil des Modellgebiets

Kurzbeschreibung

Die Interpretation von 010_blg in den Seismikprofilen ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Daher stützt sich die Modellierung von 010_blg auf Bohrpunkte und wird in der Tiefendomäne unter zusätzlicher Zuhilfenahme der Ergebnisse älterer Interreg-Projekte durchgeführt (zusammenfassend publiziert in Wirsing & Luz 2007).

Eingangsdaten

Bohrmarker 010_blg aus dem GeORG-Projekt, Belegpunkte und Isolinienkarten für Basis Lockergesteine aus Wirsing & Luz (2007)

Beschreibung

Im baden-württembergischen Anteil des Modellgebiets ist der Modellhorizont 010_blg (Basis Lockergesteine, s. Kap. 3.5.4.4) nur schlecht in der Seismik zu erfassen. Es liegen hier aber Ergebnisse früherer Interreg-Projekte vor (Wirsing & Luz 2007) in dem u. a. die Lage der Basis Lockergesteine auf Grundlage von Bohrungen in Isolinienplänen bzw. Rasterdaten dargestellt wird. Diese Ergebnisse stellen neben den Bohrungen eine wesentliche Grundlage für die Modellierung der Basis Lockergesteine im baden-württembergischen Teil des GeORG-Projektgebiets dar. Auf die Seismikinterpretation wurde verzichtet. Ausnahme sind Teilstücke dreier Seismiklinien südlich des Kaiserstuhls, in denen eine deutliche Diskordanz erkennbar ist, die als Basis Lockergesteine interpretiert wurde. Da in diesem Bereich keine tiefen Bohrungen vorhanden sind, wurde der hier erfasste Horizont mit in die Modellierung einbezogen, auch wenn die Tiefenlage durch die Zeit-Tiefenkonvertierung mit einer gewissen Unsicherheit verbunden ist (vgl. Kap. 3.5.8.2 zur Zeit-Tiefenkonvertierung).

Eingangsdaten:

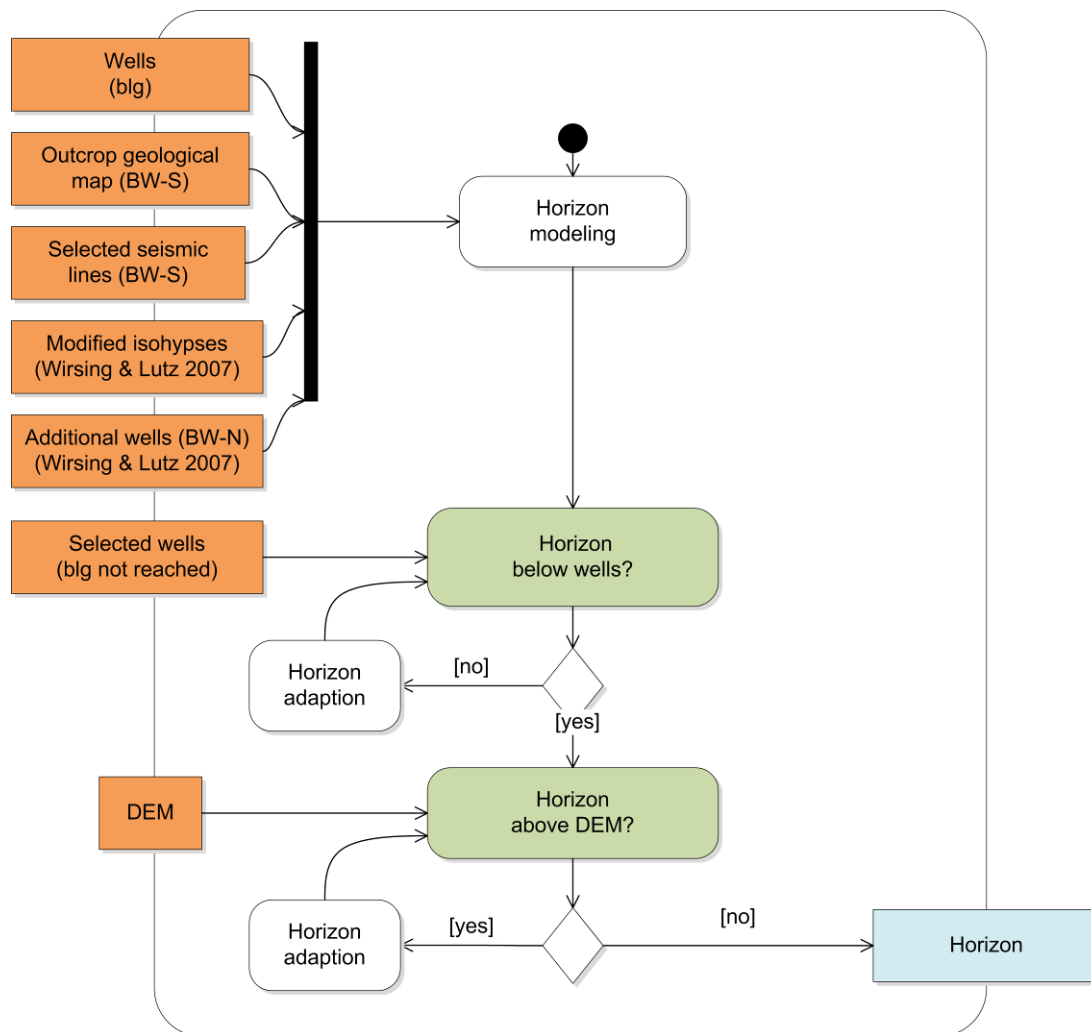
- (1) Bohrpunkte mit Marker für 010_blg aus dem in GeORG harmonisierten Datensatz für Bohrungen
- (2) Isolinienkarte der Basis Lockergesteine aus Wirsing & Luz (2007): Die Daten liegen in Form von Shapefiles vor. Da im Datensatz dieses Projekts, dass sich im Detail mit den Lockergesteinen des Oberrheingrabens beschäftigt, eine deutlich größere Anzahl an Störungen berücksichtigt wird als in GeORG für den tiefen Untergrund modelliert ist, wurde der Isolinienverlauf dem Störungsmuster aus GeORG angepasst oder Isolinien entfernt. Passen Isolinien nicht zu Bohrungen, wurden Teilbereiche gelöscht oder modifiziert.
- (3) Belegpunkte aus Wirsing & Luz (2007): Die Belegpunkte dieses Projekts wurden überwiegend für den nördlichen und zentralen Bereich des baden-württembergischen Modellgebiets herangezogen. Sie liegen als Punktshapes vor. Aus den Shapedateien wurden die Bohrungen selektiert, welche die Basis Lockergesteine durchteufen. Die selektierten Bohrungen wurden mit den (z.T. stratigraphisch überarbeiteten) Angaben aus der Aufschlussdatenbank des LGRB abgeglichen und ggf. als zusätzliche Belegpunkte herangezogen.
- (4) Wie oben erwähnt, wurde südlich des Kaiserstuhls die Interpretation einer deutlichen Diskordanz als Basis Lockergestein in die Modellierung miteinbezogen.
- (5) Im Süden konnten einige Ausstrichlinien der Lockergesteinsbasis auf der Geologischen Karte als zusätzliche Belegpunkte verwendet werden.



Alle in Gocad importierten Eingangsdaten gingen als Interpolationspunkte für die Horizontfläche ein. An Bohrpunkten mit Marker 010_blg wurde die Lage der erstellten Fläche überprüft und ggf. manuell angeglichen.

Da der Schwerpunkt des GeORG-Projekts auf dem tiefen Untergrund liegt, wurde die Basis Lockergestein im Allgemeinen stark vereinfacht als ungestört modelliert. Dort, wo Bohrungen einen deutlichen Versatz anzeigen, wurden in größerer Tiefe modellierte Störungen nach oben durch Projektion der oberen Störungsbegrenzung auf die Geländeoberfläche erweitert, um die Modellierung in separaten Blöcken zu ermöglichen. Die Horizontflächen wurden an die bereits modellierten Flächen von 010_blg in Frankreich angeschlossen.

3.5.4.4.1 Modeling of base unconsolidated rocks in Baden-Württemberg

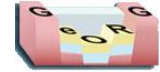


3.5.4.4.1-1: UML diagram - Workflow modeling of base unconsolidated rocks in Baden-Württemberg

Literaturhinweise

Wirsing & Luz (2007)





3.5.4.4.2 Modellierung der Lockergesteinsbasis in Frankreich (*Modeling of base unconsolidated rocks in France*)

Ziel: Modellierung der Lockergesteinsbasis in der Tiefendomäne im französischen Anteil des Modellgebiets

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Arbeitsschritte zur Modellierung des Horizontes 010_blg (Basis Lockergesteine) auf der Grundlage von Bohrungen, Karteninformationen und Schichtlagerungskarten

Eingangsdaten

- Bohrungen (*Wells*)
- Mächtigkeitsangaben (*Thicknesses geological map*) und Ausstrich der geologischen Karten (*Carte géologique 1:50000 France, BRGM; Outcrop geological map*)
- Schichtlagerungskarten für Teilbereiche (*Structural maps*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne
- Die Modellierung der Lockergesteinsbasis richtet sich nach dem Auftreten der Iffezheim-Formation (*Does Pliocene occur?*). Fehlt diese, konnten zusätzlich zu den Bohrungen mittlere Mächtigkeitsangaben aus der geologischen Karte für die Modellierung herangezogen werden (*Horizon modeling with wells & thicknesses geological map*). Diese Angaben wurden von der Geländeoberfläche abgezogen und für die Interpolation der Lockergesteinsbasis genutzt. Ist die Iffezheim-Formation vorhanden, konzentrierte sich die Horizonterstellung auf Bohrmarker (*Horizon modeling with wells*). Aufgrund der Datenlage konnten in beiden Fällen Störungen nicht berücksichtigt werden.
- Nach der getrennten Modellierung beider Lockergesteinsareale folgte deren Kombination und Abgleich (*Combination & consistency check*).
- Für Teilbereiche standen ältere Schichtlagerungskarten für eine zusätzliche Konsistenzprüfung zur Verfügung (*Consistency with structural maps?*). Passten diese zum Bohrrdatenbestand, wurde die Modellfläche im Bedarfsfall lokal repositioniert (*Local repositioning*).
- Nach der Feinjustierung der Geometrie stand die Lockergesteinsbasis für einen Verschnitt mit dem Ausstrich der geologischen Karte zur Verfügung (*Cut with outcrop of geological map*).
- Ergebnis: Lockergesteinsbasis im französischen Projektgebiet als Gocad-Surfaceobjekt (*Base unconsolidated rocks France*)



3.5.4.4.2 Modeling of base unconsolidated rocks in France

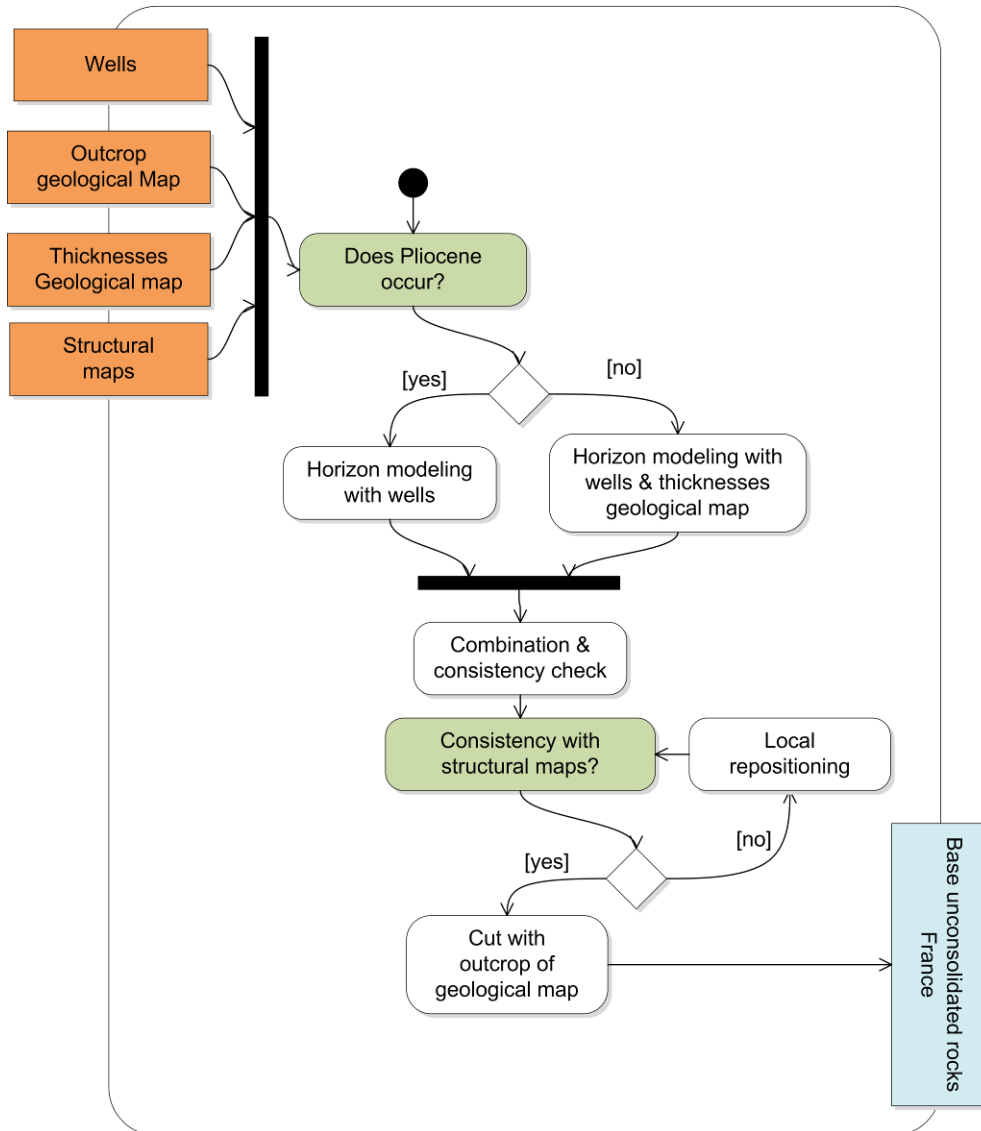
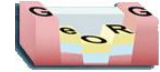


Abb. 3.5.4.4.2-1: UML diagram - Workflow modeling of base unconsolidated rocks in France



3.5.4.4.3 Modellierung der Lockergesteinsbasis in Rheinland-Pfalz

Ziel: Modellierung der Lockergesteinsbasis in Tiefendomäne im rheinland-pfälzischen Anteil des Modellgebiets

Kurzbeschreibung

Die Interpretation der Schichtgrenze von 010_blg in den Seismikprofilen ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Daher stützt sich die Modellierung von 010_blg auf Bohrpunkte.

Eingangsdaten

Bohrmarker 010_blg (=Basis Iffezheim-Formation) aus KW-Bohrungen des GeORG-Datensatzes sowie aus Belegpunkten der Hydrogeologischen Kartierungen Karlsruhe-Speyer (HGK 2007) und Rhein-Neckar-Raum (HGK 1987, HGK 1999).

Beschreibung

Auch im rheinland-pfälzischen Teilgebiet konnte die Lockergesteinsbasis (010_blg) in der Regel nicht in den Seismikprofilen identifiziert werden.

Die Modellierung von 010_blg stützt sich daher auf die in den Bohrungen angegebenen Schichtgrenzen und wurde in der Tiefendomäne unter zusätzlicher Zuhilfenahme von Ergebnissen der Hydrogeologischen Kartierungen durchgeführt.

Die Bohrdaten in den Randgebieten mit reduzierten Schichtmächtigkeiten wurden nochmals überprüft.

Ein Problem bei der Modellierung war der Abgleich der im tieferen Untergrund interpretierten und in Gocad modellierten Störungen mit den bereits in den HGK's entwickelten Störungen. Dies war auch Anlass die Störungen aus dem Gocad-Modell an der Lockergesteinsbasis zu kappen.

Literaturhinweise

HGK (1987): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum. - Situation heute; Möglichkeiten und Grenzen zukünftiger Entwicklungen. 107pp. Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg, Der Hessische Minister für Umwelt und Reaktorsicherheit, Ministerium für Umwelt und Gesundheit Rheinland-Pfalz.

HGK (1999): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum. - Fortschreibung 1983-1999. 155pp. Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz.

HGK (2007): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung im Raum Karlsruhe-Speyer. Fortschreibung 1986-2005, Beschreibung der geologischen, hydrogeologischen und hydrologischen Situation - Umweltministerium Baden- Württemberg, Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Stuttgart-Mainz.



3.5.4.4 Modellierung der Lockergesteinsbasis in der Schweiz (*Modeling of base unconsolidated rocks in Switzerland*)

Ziel: Modellierung der Lockergesteinsbasis in der Tiefendomäne im Schweizer Anteil des Modellgebiets

Kurzbeschreibung

Im Schweizer Teilmodell waren Bohrinformationen die wichtigste Grundlage für die Modellierung. Zusätzlich wurde, insbesondere für Gebiete mit geringer Datendichte eine Methodik entwickelt, die versucht „alte“ Tallinien zu berücksichtigen.

Eingangsdaten

Bohrdaten (*Wells blg, blg not reached*), geologische Karten (*Outcrop geological map*), DHM25 (*DEM*), zusätzliche Datenquellen (u.a. Mächtigkeitsangaben, 2D-Profile; *Additional data sets*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne

- In der Schweiz wurde abweichend vom übrigen GeORG-Modellgebiet nicht strikt die Basis der Lockergesteine (010_blg) modelliert, sondern die sogenannte „Felsoberfläche“. Der Unterschied besteht darin, dass sie nicht endet wenn sie an die Oberfläche kommt, entsprechend der Basis der Lockergesteine, sondern sich als Oberfläche der verfestigten Gesteine („Fels“) fortsetzt. Die Felsoberfläche beinhaltet die Basis der Lockergesteine zu 100% und entspricht in Bereichen ohne mächtige Quartärbedeckung der Geländeoberfläche minus der Bedeckung durch Boden. Die Mächtigkeit des Bodens kann je nach Kartierung (Methode und Autor) stark variieren. Bei der Modellierung der Felsoberfläche im Raum Basel wurde eine Mindestmächtigkeit für den Boden von 1 m für die Modellierung verwendet.

- Im Schweizer Teilmodell waren Bohrinformationen die wichtigste Grundlage für die Modellierung. Hierbei wurden sowohl Bohrungen berücksichtigt, die diesen Horizont durchteuft haben (*Horizon modeling*), als auch solche, die ihn nicht erreicht haben und somit eine Mindestangabe zur Tiefenlage beinhalten (*Horizon below wells?; Horizon adaption*). Da die Informationen aus Bohrungen in ihrer geografischen Verbreitung sehr heterogen sind, wurde ein zusätzliches Vorgehen entwickelt, um gerade in Gebieten mit wenigen Daten ein besseres Ergebnis zu erzielen.

Der gewählte Modellieransatz zur Erstellung des Horizonts Basis Lockergesteine geht davon aus, dass die Felsoberfläche in weiten Teilen einer Erosionsfläche entspricht, welche in erster Näherung durch die formende Kraft von Fließgewässern gebildet wurde. Aufgrund von Vergleichen der heutigen Topographie mit der aus Bohrungen und Aufschlüssen bekannten Felsoberfläche (Felsbelegpunkten) wurde eine Fläche konstruiert, welche in allen Bereichen das Abfließen von Gewässern ermöglicht. Hierfür werden sogenannte Fließpfade (*Flow paths*) errechnet, welche einen gewählten Modellbereich komplett entwässern können und lokal die Basis der Felsoberfläche charakterisieren. Die relativ gut bekannten Felsoberflächen in den zentralen Talbereichen dienen als unteres Bezugsniveau (Erosionsbasis) für die Kalkulation der einzelnen Fließpfade. Mit Hilfe der Modellierungssoftware können nun die Felsbelegpunkte (Bohrungen, oberflächliche Aufschlüsse etc.) mit den Fließpfaden verknüpft werden, um eine in sich konsistente Fläche zu generieren. Weitere Eingangsdaten waren lokale Mächtigkeitsinformationen und 2D-Profile. Der letzte Arbeitsschritt war eine Qualitätsprüfung. Teilweise wurde diese automatisiert, wie die Prüfung, ob der Horizont überall unterhalb der Topographie (DHM25) liegt (*Horizon above DEM?; Horizon adaption*). Teilweise ist es eine manuelle Sichtprüfung (*Visual quality check - ok?; Horizon adaption*), insbesondere in Regionen mit geringer Datendichte.

- Ergebnis: Basis der Lockergesteine (bzw. Felsoberfläche) als Gocadfläche in der Tiefendomäne (*Horizon*)





3.5.4.4.4 Modeling of base unconsolidated rocks in Switzerland

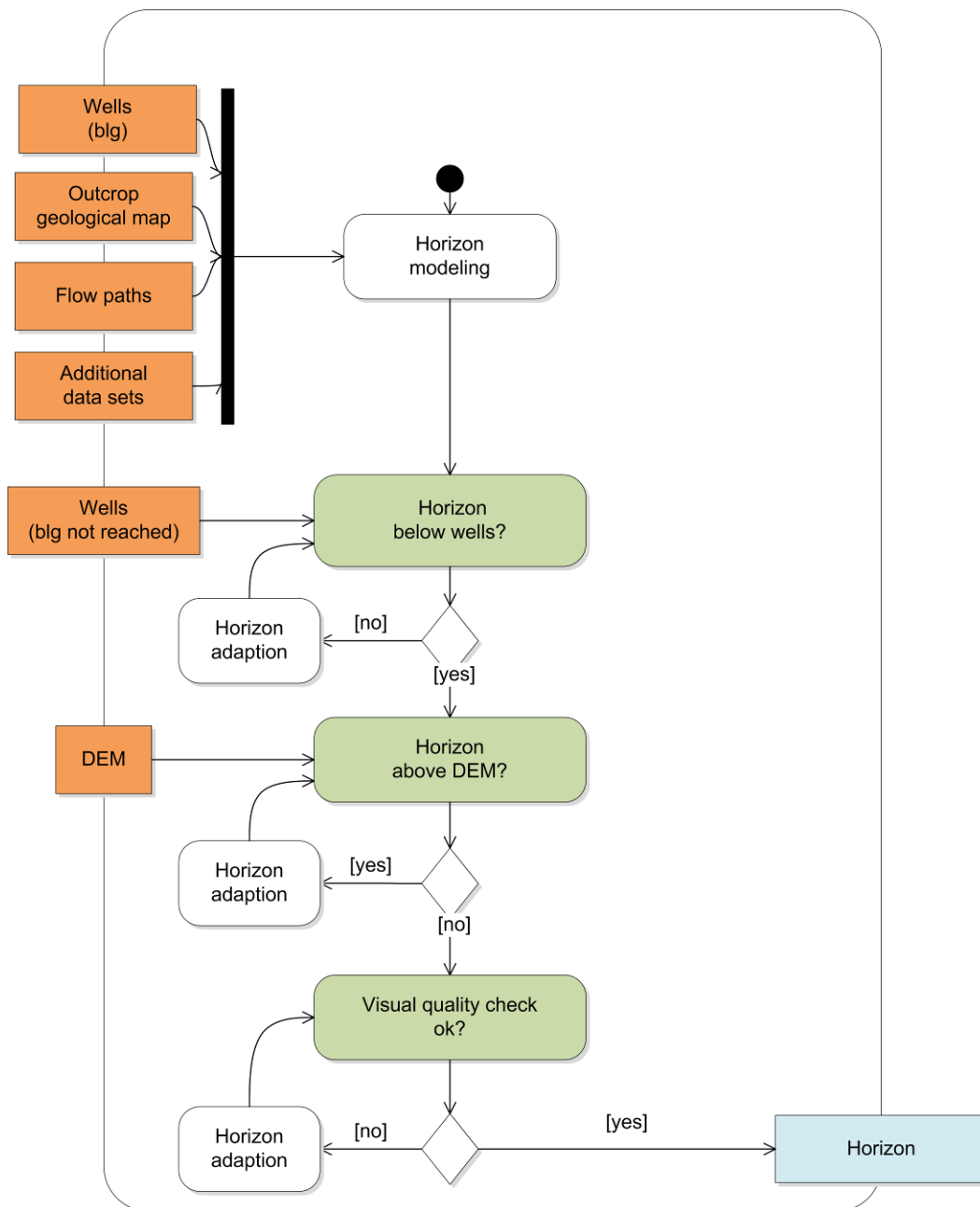


Abb. 3.5.4.4-1: UML diagram - Workflow modeling of base unconsolidated rocks in Switzerland





3.5.5 Modellierung von Salzstockstrukturen (*Modeling of salt structures*)

Ziel: Modellierung von Salzstockstrukturen in Zeit- und Tiefendomäne

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Arbeitsschritte zur Modellierung von Salzstockstrukturen auf der Grundlage von interpretierter 2D-Seismik, Schichtlagerungskarten und Bohrungen

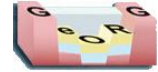
Eingangsdaten

- interpretierte 2D-Seismik (*seismics*)
- Verbreitungspolygone (*occurrence*) und Schichtlagerungskarten aus der Literatur (*structural maps*)
- Bohrungen (*wells*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Zeit- und Tiefendomäne (*Time domain, Depth domain*)
- Die Modellierung der Salzstockstrukturen beruht grundlegend auf den Ergebnissen der Seismikinterpretation. Daher werden die Strukturen zunächst in der Zeitdomäne erstellt.
- Die Salzstockstrukturen sind unregelmäßige, teilweise von Störungen begrenzte Körper. In einigen Bereichen sind Überhänge in der Seismik detektierbar. Die einzelnen, etwa N-S orientierten Salzmauern weisen zahlreiche Querverbindungen auf, sodass eine komplexe Gesamtstruktur resultiert. Im Modell wird die äußere Hülle der Salzstöcke dargestellt. Die Basis der Salzkörper ist per Definition die Tertiärbasis, obwohl die tatsächliche Salzabscheidung erst etwas höher einsetzt. Auf eine Modellierung der noch in ursprünglicher Position befindlichen stratiformen Salinaranteile wurde verzichtet.
- Die Korrelation der Salzstockstrukturen (*Correlation of salt structures*) erfolgte auf der Grundlage der Salzverbreitungskarte in Lutz & Cleintuar (1999). Weitere Schichtlagerungskarten, insbesondere im Bereich des früheren Kalisalzbergbaus, ergänzten den Datenpool.
- Für die Modellierung der komplexen Salzstockgeometrien sind über die in den Seismiklinien gepickten Hüllkurven hinaus zahlreiche Hilfsdatensätze erforderlich (*Generation of assisting data sets*). Scheitellinien verbinden die obere Salzstockbegrenzungen. Diese wiederum dienen als Anhaltspunkte für die Konstruktion weiterer Hilfsprofile mit Hüllkurven.
- Nachfolgend können einzelne Salzstockabschnitte durch Flächenerstellung aus den Hüllkurven miteinander vernetzt werden (*Modeling of separated salt structures*).
- Die Verbindungselemente zwischen den Salzstockstrukturen und deren Abschluss standen im nächsten Arbeitsschritt im Mittelpunkt. Diese wurden durch Verbindung der Einzelelemente und den bereichsweisen Verschnitt im Kreuzungsbereich erzeugt (*Modeling of connecting elements*).
- Nach Abschluss der Arbeiten wurden die Salzstockhüllen von der Zeitdomäne (*Salt structures in time domain*) in die Tiefendomäne konvertiert (*Time-depth conversion*).
- Eine Konsistenzprüfung mit Bohrungen (*Consistency with wells?*) führte im Bedarfsfall zu lokalen Anpassungen der Salzstockgeometrien (*Local reshaping?*).
- Für die nachfolgenden Verschnittoperationen (*Cut with faults & horizons*) ist eine Optimierung der Triangulation (v.a. gleich große und gleichwinklige Dreiecke) wichtig (*Optimize triangulation*). Für diese Arbeitsschritte stehen innerhalb der 3D-Modellierungssoftware Gocad unter *Surface-Tools- Beautify Triangles*





for Equilaterality zahlreiche Bordmittel zur Verfügung.

- Nach dem Geometriefeintuning stehen die Hüllflächen für einen Verschnitt mit den Störungen und Horizonten zur Verfügung.

- Ergebnis: Salzstockhüllen als Gocadflächen in der Tiefendomäne (*Salt structures*)

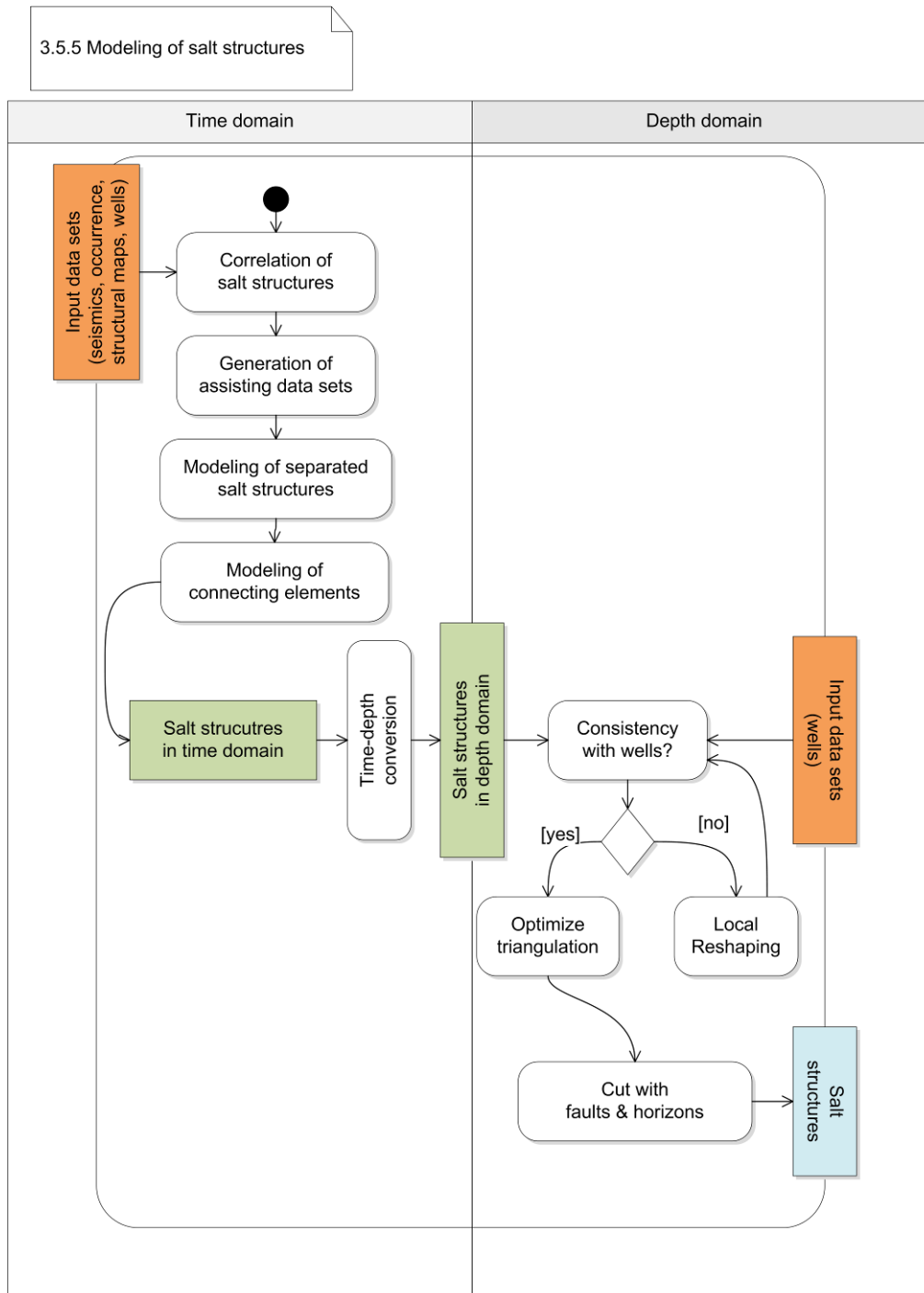


Abb. 3.5.5-1: UML diagram - Workflow modeling of salt structures

Literaturhinweise

Lutz & Cleintuar (1999)



Das vorliegende Dokument ist Teil des „Fachlich-Technischen Abschlussberichts - Teil 3“ des INTERREG IV-Projekts „GeORG – Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“.

Der komplette Bericht (Teil 1-4) ist unter www.geopotenziale.eu zum Download bereit gestellt.

3.5.6 Abgrenzung des Kaiserstuhlgebiets (*Kaiserstuhl boundary*)

Ziel: Abgrenzung magmato-sedimentärer Bereiche

Kurzbeschreibung

Abgrenzung magmato-sedimentärer Bereiche auf der Grundlage der Geologischen Karte, des Höhenmodells für die Geländeoberfläche, Seismik und weiteren geophysikalischen Auswertungen

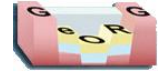
Eingangsdaten

- Geologische Karte (*Geological map*), Höhenmodell Geländeoberfläche, Seismik (*Seismics*), Informationen zur Schwere und zu magnetischen Anomalien (*Gravity map, Magnetic anomaly map*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne
- schematische Abgrenzung magmatisch beeinflusster Bereiche im Gebiet des Kaiserstuhls (Magmatite + magmatisch modifizierte Sedimentkörper) - *Schematic boundary*
- Bewertungsgrundlage: Ausstrich vulkanischer Gesteine an der Geländeoberfläche (in Bohrungen nachgewiesene Gangstrukturen bleiben unberücksichtigt)
- morphologische Abgrenzung des Kaiserstuhls
- reflexionsarme Bereiche in unmittelbar angrenzenden seismischen Linien (*Noisy reflexion zone?*)
- Abgrenzung von Salzstrukturen mit ähnlichem seismischen Reflexionsbild mit Hilfe von Schwerekarten und Informationen zu positiven magnetischen Anomalien (*Positive gravity anomaly? Positive magnetic anomaly?; Local reshaping*)
- aufgrund der unsicheren Abgrenzung keine detaillierte Modellierung der magmatischen Körper, sondern vereinfachte vertikale Abtrennung magmato-sedimentärer Einheiten vom Rest des 3D-Modells (*Surface modeling by vertical extrusion*)
- Verschnitt der Kaiserstuhlabgrenzung mit dem digitalen Geländemodell (*Cut with DEM*)
- Ergebnis: Schematische vertikale Abgrenzung des Kaiserstuhlgebiets (*Vertical boundary of Kaiserstuhl*)





3.5.6 Kaiserstuhl boundary

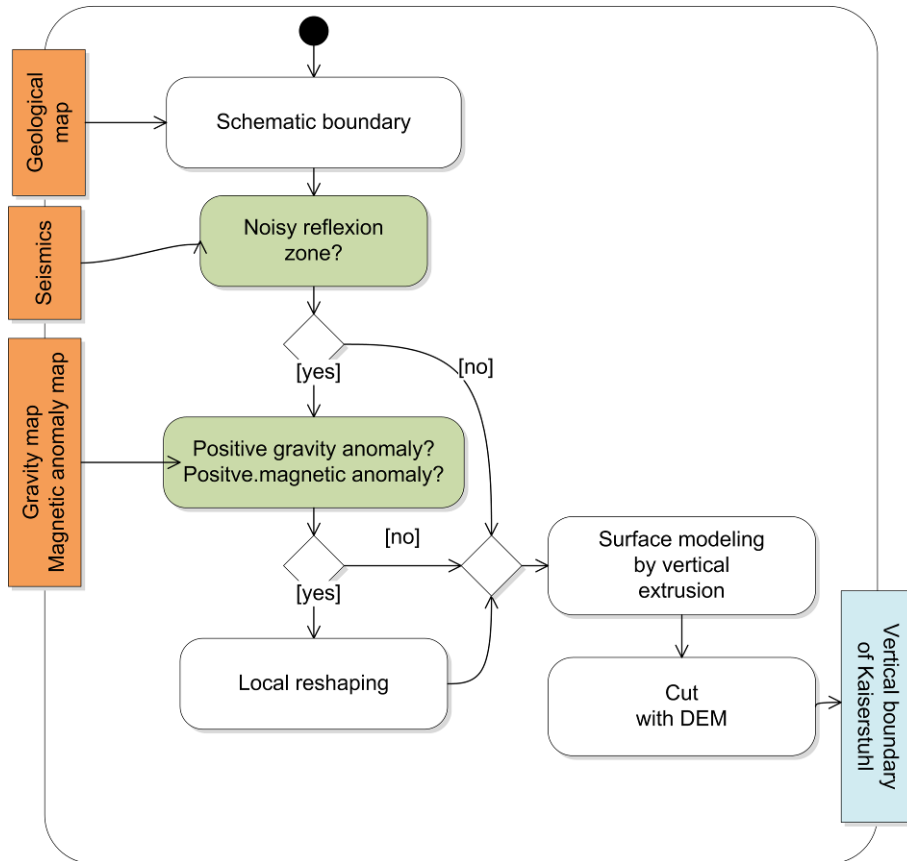


Abb. 3.5.6-1: UML diagram - Workflow modeling Kaiserstuhl boundary





3.5.7 Kombination zum Gesamtmodell

Ziel: Flächenmodell aus Störungen, Horizonten, Salzstockstrukturen und der Abgrenzung des Kaiserstuhlgebiets

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Arbeitsschritte zur Kombination aller Modellelemente zu einem konsistenten Gesamtmodell

Eingangsdaten

Gocad-Datensätze für Störungen, Horizonte, DGM, Salzstockstrukturen und Abgrenzung des Kaiserstuhls

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Zeit- und Tiefendomäne

- Vor der Zusammenführung der Gocad-Objekttypen eines Teilmodells sowie der Zusammenführung getrennt bearbeiteter Teilmodelle sind umfangreiche Konsistenzprüfungen notwendig:

- Konsistenz innerhalb eines Objekttyps:
 - sauberes Störungsnetzwerk (Klassifizierung in Haupt- und Zweigstörungen, jüngere Elemente schneiden ältere etc.)
 - Horizonte in korrekter zeitlicher Abfolge

 - Konsistenzprüfung für direkt modellierte Horizonte nach der Zeit-Tiefenkonvertierung mit Mächtigkeitsbetrachtungen

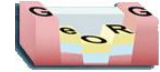
- Konsistenz zwischen Teilmodellen:
 - während der Modellierung in Zeit- und Tiefendomäne: Konsistenz zwischen Objekten in Teilmodellen
 - wasserdichter Verschnitt von Störungen und Horizonten in der Zeitdomäne vor der Zeit-Tiefenkonvertierung
 - Kombination und einfacher Verschnitt der neu hinzugekommenen Objekte in der Tiefendomäne

- technische Konsistenz:
 - keine Horizontüberschneidungen, keine Überstände und Lücken zwischen Modellobjekten (Voraussetzung für den Aufbau eines Volumenmodells)
 - die technische Konsistenz ist im GeORG-Modell weitestgehend gewährleistet

- Nach erfolgreicher Konsistenzprüfung werden die Gocadobjekte miteinander verschnitten:

- Störungen: jüngere Störungen schneiden ältere Elemente (es sei denn, ältere Elemente wurden nochmals reaktiviert)
- Störungen: gleichaltrige Zweigstörungen werden von den Hauptstörungen abgeschnitten
- Gibt es keine deutlichen Hinweise auf post-blg-Aktivität, werden Störungen an blg abgeschnitten. Hinweise können sein: Bohrungen, Seismik (hier jedoch häufig nicht erkennbar, da junge Einheiten in der Regel schlecht aufgelöst)
- Horizonte (bei blg teilweise abweichend) werden von Störungen abgeschnitten
- Horizonte werden am DGM abgeschnitten
- mesozoische Horizonte werden im Subcropbereich von bt abgeschnitten
- Salzstöcke werden von bt geschnitten
- Salzstöcke schneiden bff ab
- Salzstöcke werden von blg abgeschnitten





- die Abgrenzung des Kaiserstuhlgebiets (Kaiserstuhl, Limberg) schneidet alle anderen Objekttypen
- Ergebnis: Flächenmodell aus Störungen, Horizonten, Salzstockstrukturen und der Abgrenzung des Kaiserstuhlgebiets



3.5.8 Geschwindigkeitsmodellierung (*Velocity modeling*)

Ziel: Geschwindigkeitsmodelle für die Tiefen-Zeitkonvertierung bzw. die Zeit-Tiefenkonvertierung

Kurzbeschreibung

Übersicht über den Workflow für die Erstellung von zwei Geschwindigkeitsmodellen für die Tiefen-Zeitkonvertierung (Geschwindigkeitsmodell 1) und die Zeit-Tiefenkonvertierung (Geschwindigkeitsmodell 2) auf der Grundlage von Geophonversenkungsmessungen und einer Kombination aus Bohrmarkern und dem Horizontmodell in der Zeitdomäne

Eingangsdaten

- Geschwindigkeitsmessungen in Bohrungen (Geophonversenkungsmessungen) für das Tiefen-Zeit-Modell
- zusätzlich Kombination aus Bohrmarkern bzw. Horizonten aus bereits vorhandenen 3D-Modellen (Tiefendomäne) und dem geologischen 3D-Modell (Zeitdomäne) für das Zeit-Tiefen-Modell

Beschreibung

Für die Interpretation der Seismikdaten in Gocad ist es notwendig, ein Geschwindigkeitsmodell (*Model for depth-time conversion*) für die Tiefen-Zeitkonvertierung (*Depth-time conversion*) zu erstellen (*Velocity modeling 1*). Dieses Modell wird benutzt, um Bohrungen, aber auch andere Eingangsdaten von Tiefe in Zeit zu konvertieren (s. Kap. 3.5.8.1). Da es zu Beginn der Modellierung gebraucht wird, stehen zu diesem Zeitpunkt nur eingeschränkt Daten für die Parametrisierung zur Verfügung. Dementsprechend ist das Geschwindigkeitsmodell einfach aufgebaut und weist eine geringe laterale Auflösung auf.

Nachdem in der Zeitdomäne Störungen und Horizonte modelliert wurden (*3d-modeling time-domain*), müssen diese nachfolgend von Zeit in Tiefe transformiert werden (*Time-depth conversion*). Das für diese Aufgabenstellung notwendige Geschwindigkeitsmodell (s. Kap. 3.5.8.2; *Velocity modeling 2; Model for time-depth conversion*) weist weitaus mehr Details als das erste Geschwindigkeitsmodell auf.

Im Schweizer Teilmodell wurden mit Hilfe eines iterativen Verfahrens Intervallgeschwindigkeiten zwischen den einzelnen Reflektorhorizonten errechnet. Dabei wurde versucht, die Bohrinformationen mit der Tiefenlage der entsprechenden Reflektoren in der Reflexionsseismik zu korrelieren.

Das Geschwindigkeitsmodell ist von zentraler Bedeutung für die Raumlage der Horizonte und Störungen. Ziel ist, ein Geschwindigkeitsmodell zu erzeugen, sodass

- a) Störungen und Horizonte möglichst nah an den entsprechenden Bohrmarkern liegen
- b) Horizonte sich nicht überschneiden und in plausiblen Abständen zueinander liegen
- c) Horizonte im Bereich von Bohrmarkern keine Beulen bilden
- d) Störungen sinnvolle Einfallswinkel aufweisen und keine Diskontinuitäten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten beiderseits der Störung entstehen ("Treppeffekt")

Als Eingangsdaten stehen im Projektgebiet hauptsächlich Geophonversenkungsmessungen zur Verfügung. Sonic Logs können ebenfalls zur Berechnung von Geschwindigkeitsmodellen genutzt werden, sind aber nur für wenige Bohrungen im Oberrheingraben verfügbar und scheiden somit als Eingangsdatenquelle aus. In der Literatur werden Methoden beschrieben, die bei der Seismikprozessierung anfallende Geschwindigkeiten benutzen (z.B.: Albertin et al. 2002, Etris et al. 2001). Tests mit Stapelgeschwindigkeiten zeigten allerdings lokal starke Variationen und weichen teilweise stark von den in Bohrungen gemessenen Geschwindigkeiten ab. Aus diesem Grund kamen die Stapelgeschwindigkeiten nicht zum Einsatz.



3.5.8 Velocity modeling

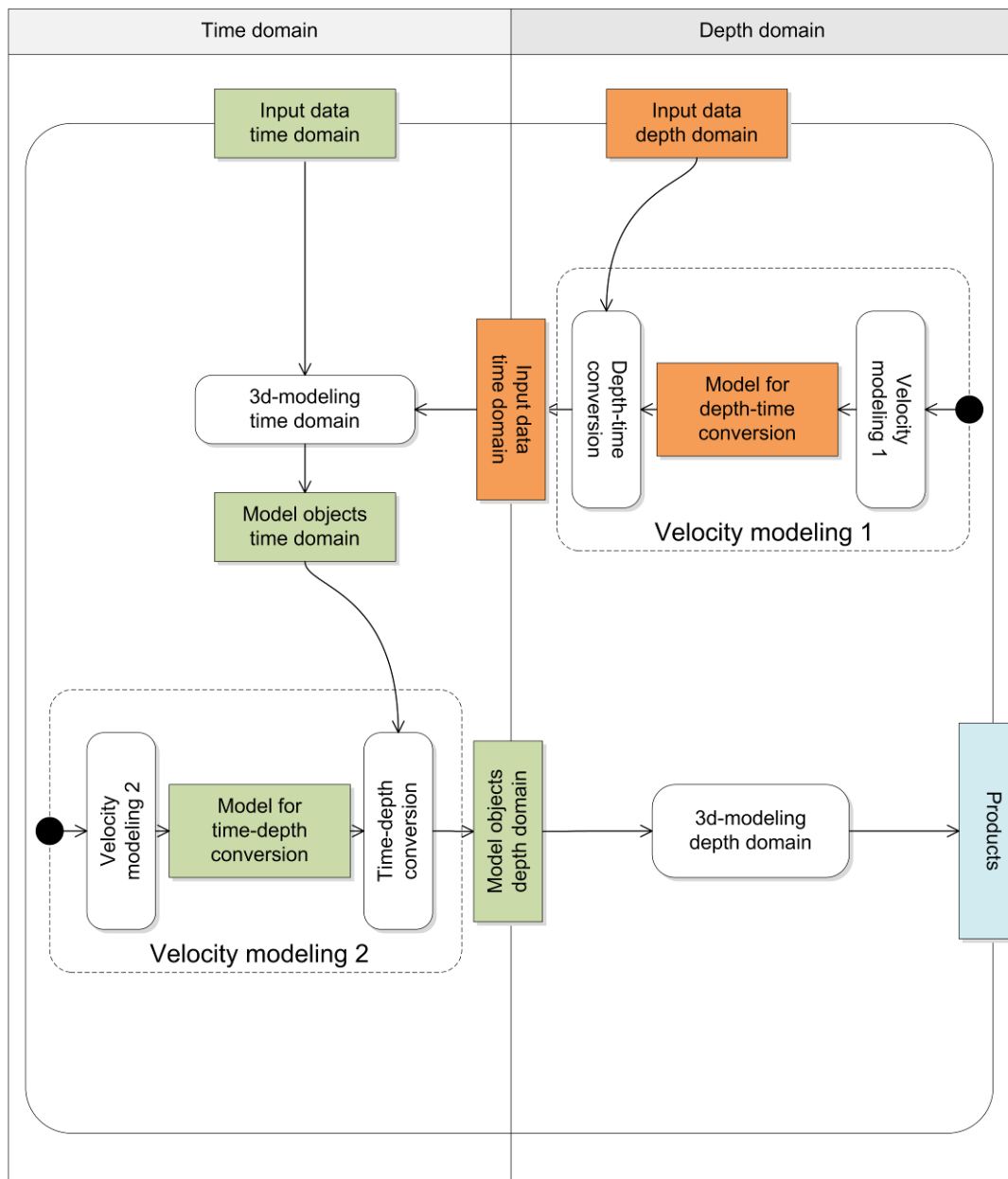


Abb. 3.5.8-1: UML diagram - Workflow velocity modeling

Literaturhinweise

Albertin et al. (2002), Etris et al. (2001)



3.5.8.1 Modell für die Tiefen-Zeitkonvertierung (Geschwindigkeitsmodell 1) - (Model for depth-time conversion (Velocity model 1))

Ziel: Geschwindigkeitsmodell für die Tiefen-Zeitkonvertierung (Geschwindigkeitsmodell 1)

Kurzbeschreibung

Übersicht über den Workflow für die Erstellung eines Geschwindigkeitsmodells für die Tiefen-Zeitkonvertierung (Geschwindigkeitsmodell 1) auf der Grundlage von Geophonversenkungsmessungen

Eingangsdaten

Geschwindigkeitsmessungen in Bohrungen (Geophonversenkungsmessungen; *Check shot measurements*)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne

Für die Interpretation der Seismikdaten in Gocad ist es notwendig, ein Geschwindigkeitsmodell für die Tiefen-Zeitkonvertierung zu erstellen. Dieses Modell wird benutzt, um Bohrungen, aber auch andere Eingangsdaten von Tiefe in Zeit zu konvertieren. Da es zu Beginn der Modellierung gebraucht wird, stehen zu diesem Zeitpunkt nur eingeschränkt Daten für die Parametrisierung zur Verfügung. Dementsprechend ist das Geschwindigkeitsmodell einfach aufgebaut und weist eine geringe laterale Auflösung auf.

- Das Geschwindigkeitsmodell basiert auf einem regelmäßigen 3D-Gitter (in Gocad sog. Voxet). Es erstreckt sich mit einer lateralen Gitterweite von 1000 m und einer vertikalen Auflösung von 5 m über das gesamte Modellgebiet. Das Voxet unterteilt sich mit Hilfe des DEM in zwei Regionen unterhalb und oberhalb der Geländeoberfläche. Die nachfolgenden Berechnungen beziehen sich ausschließlich auf den Teil unterhalb der Geländeoberfläche, während der obere Teil einheitlich mit der aus der Seismikprozessierung stammenden Korrekturgeschwindigkeit von 2200 m/s belegt wird (*Voxet creation*).

- Die Zweiwegelaufzeiten t_{wt} (in ms) aus den Geophonversenkungsmessungen initialisieren den unter der Geländeoberfläche liegenden Teil des Geschwindigkeitsvoxets. Sie sind die Voraussetzung für die Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit v_{av} (*Initialize with two-way travel time t_{wt}*).

- Für die nachfolgende Regionalisierung werden nicht die Zweiwegelaufzeiten t_{wt} selbst, sondern die Zeitinkremente Δt_{wt} benutzt. Diese Vorgehensweise sichert mit zunehmender Entfernung von der Geländeoberfläche eine stetige Laufzeitzunahme, die bei der geostatistischen Regionalisierung ansonsten nicht unbedingt gewährleistet wird. Die Zeitinkremente berechnen sich aus der Differenz der Zweiwegelaufzeiten vertikal benachbarter Zellen (*Computation of time increments Δt_{wt}*).

- Regionalisierung von Δt_{wt} mit Hilfe einer inversen Distanzenmethode (*Regionalize Δt_{wt}*).

- Nachfolgend wird auf die Zweiwegelaufzeit t_{wt} durch Aufsummierung der Zeitinkremente Δt_{wt} ausgehend von der Geländeoberfläche zurückgerechnet (*Computation of t_{wt}*).

- Die für die Tiefen-Zeitkonvertierung notwendige Durchschnittsgeschwindigkeit v_{av} (in m/s) berechnet sich mit folgender Formel: $v_{av} = s / t_{wt} * 2000$; *Calculation of average velocity v_{av}*

- Die Tiefen-Zeitkonvertierung der Bohrungen, Schichtlagerungskarten etc. wird mit der Gocadinternen Funktion *Velocity – Time-Depth-Conversion – Convert Objects Using Velocity* durchgeführt. Bezugsniveau (datum plane): 150 m NN.

- Ergebnis: Geschwindigkeitsmodell für die Tiefen-Zeitkonvertierung als Basis für die Umrechnung von





Objekten von der Tiefen- in die Zeitdomäne (*Velocity model for depth-time conversion*).

3.5.8.1 Model for depth-time conversion (Velocity model 1)

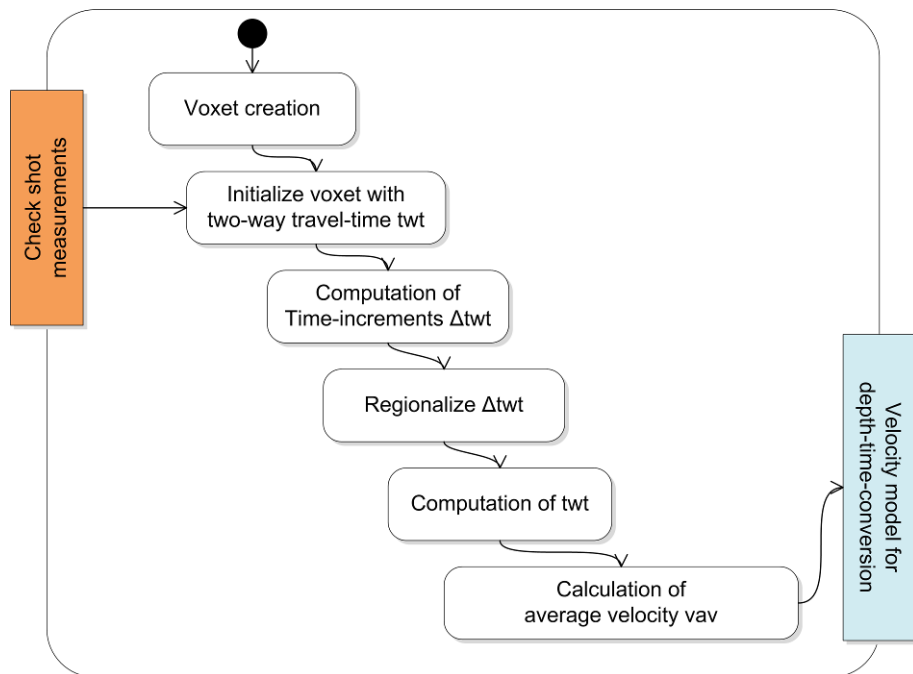


Abb. 3.5.8.1-1: UML diagram - Workflow Model for depth-time conversion (Velocity model 1)



3.5.8.2 Modell für die Zeit-Tiefenkonvertierung (Geschwindigkeitsmodell 2) (*Model for time-depth conversion (Velocity model 2)*)

Ziel: Geschwindigkeitsmodell für die Zeit-Tiefenkonvertierung

Kurzbeschreibung

Übersicht über den Workflow für die Erstellung eines Geschwindigkeitsmodells für die Zeit-Tiefenkonvertierung (Geschwindigkeitsmodell 2) auf der Grundlage von Geophonversenkungsmessungen und der Kombination aus Bohrmarkern und dem Horizontmodell in der Zeitdomäne

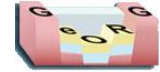
Eingangsdaten

- Geschwindigkeitsmessungen in Bohrungen (Geophonversenkungsmessungen)
- Kombination aus Bohrmarkern (Tiefendomäne) und Horizonten aus dem geologischen 3D-Modell (Zeitdomäne)
- Kombination von bereits vorhandenen Horizonten aus 3D-Modellen (Tiefendomäne) und dem GeORG-Horizontmodell (Zeitdomäne)

Beschreibung

- Gocad-Arbeitsschritt, Zeitdomäne
- Die hier genutzte Methode setzt voraus, dass sich Seismikreflektoren auf der Grundlage der seismischen Charakteristik geologischen Horizonten zuordnen lassen. Dies trifft für alle in der Zeitdomäne interpretierten Horizonte zu. Das auf der Seismikinformation basierende geologische 3D-Modell in der Zeitdomäne kann daher in Kombination mit Bohrungen oder bereits bestehenden 3D-Modellen in der Tiefendomäne für die Berechnung zusätzlicher Geschwindigkeitsstützstellen genutzt werden. Dadurch stehen dem Geschwindigkeitsmodell für die Konvertierung der Gocadobjekte von der Zeit- in die Tiefendomäne weitaus mehr Eingangsdaten zur Verfügung als im Geschwindigkeitsmodell 1
- Alternative Ansätze über die horizontgebundene Parametrisierung des Geschwindigkeitsmodells mit teufenabhängigen Intervallgeschwindigkeiten (Baillieux et al. 2011, van Dalssen et al. 2007) führten aufgrund geologisch begründeter starker regionaler Schwankungen im Geschwindigkeitsfeld über größere Bereiche hinweg zu keinen zuverlässigen Ergebnissen.
- Das Geschwindigkeitsmodell basiert auf einem regelmäßigen 3D-Gitter (in Gocad sog. Voxet). Es weist eine laterale Gitterweite von 1000 m und eine vertikale Auflösung von 5 ms auf. Für das Modellgebiet wurden insgesamt drei sich überlappende Geschwindigkeitsmodelle für die Regionen Nord, Pilotgebiet Modellierung / Zentralgebiet und Süd erstellt. Das Voxet unterteilt sich mit Hilfe des DEM in zwei Regionen unterhalb und oberhalb der Geländeoberfläche. Die nachfolgenden Berechnungen beziehen sich ausschließlich auf den Teil unterhalb der Geländeoberfläche, während der obere Teil einheitlich mit der aus der Seismikprozessierung stammenden Korrekturgeschwindigkeit von 2200 m/s belegt wird (*Voxet creation*).
- Neben den Geophonversenkungsmessungen stehen für das Zeit-Tiefenmodell auch zusätzliche Informationen aus Bohrungen und bereits vorhandenen 3D-Modellen zur Verfügung. Diese Daten müssen zunächst für die Initialisierung des Geschwindigkeitsvoxets vorbereitet werden (*Preparation of input data sets*). Hierfür werden die Bohrmarker bzw. die Horizonte bereits bestehender Modelle in der Tiefendomäne mit der korrespondierenden Position aus dem GeORG-Horizontmodell in der Zeitdomäne parametrisiert. Diese Eingangsdaten führen einerseits ihre ursprüngliche Position in der Tiefendomäne als Attribut s (in m unter Gelände) mit, können andererseits aber mit Hilfe der übertragenen Zweiwegelaufzeiten in die Zeitdomäne überführt werden. Die Position der Eingangsdaten unter der Geländeoberfläche s (in m) sowie die Messwerte aus den Geophonversenkungsmessungen initialisieren den unteren Teil des Geschwindigkeitsvoxets (*Initialize with distance from surface s*). Sie sind die Voraussetzung für die





Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit v_{av} .

- Für die nachfolgende Regionalisierung werden nicht die Position unter der Geländeoberfläche s selbst, sondern der Teufeninkremente Δs benutzt. Diese Vorgehensweise sichert mit zunehmender Entfernung von der Geländeoberfläche eine stetige Tiefenzunahme, die bei der geostatistischen Regionalisierung ansonsten nicht unbedingt gewährleistet wird. Die Teufeninkremente berechnen sich aus der Differenz vertikal benachbarter Zellen (*Computation of depth increments Δs*).
- Regionalisierung von Δs mit Hilfe einer inversen Distanzenmethode (*Regionalize Δs*).
- Nachfolgend wird auf die die Position unter der Geländeoberfläche s durch Aufsummierung der Teufeninkremente Δs ausgehend von der Geländeoberfläche zurückgerechnet (*Computation s*).
- Die für die Tiefen-Zeitkonvertierung notwendige Durchschnittsgeschwindigkeit v_{av} (in m/s) berechnet sich mit folgender Formel: $v_{av} = s \text{ [m]} / \text{twt [ms]} * 2000$; *Calculation of average velocity v_{av}*
- Die Zeit-Tiefenkonvertierung der Gocadmodellobjekte (Störungen, Horizonte, Salzstockumrisse) wird mit der Gocadinternen Funktion *Velocity – Time-Depth-Conversion – Convert Objects Using Velocity* durchgeführt. Bezugsniveau (datum plane): 150 m NN.
- Ergebnis: Geschwindigkeitsmodell für die Zeit-Tiefenkonvertierung als Basis für die Umrechnung von Objekten von der Zeit- in die Tiefendomäne *Velocity model for time-depth conversion*.

3.5.8.2 Model for time-depth-conversion (Velocity model 2)

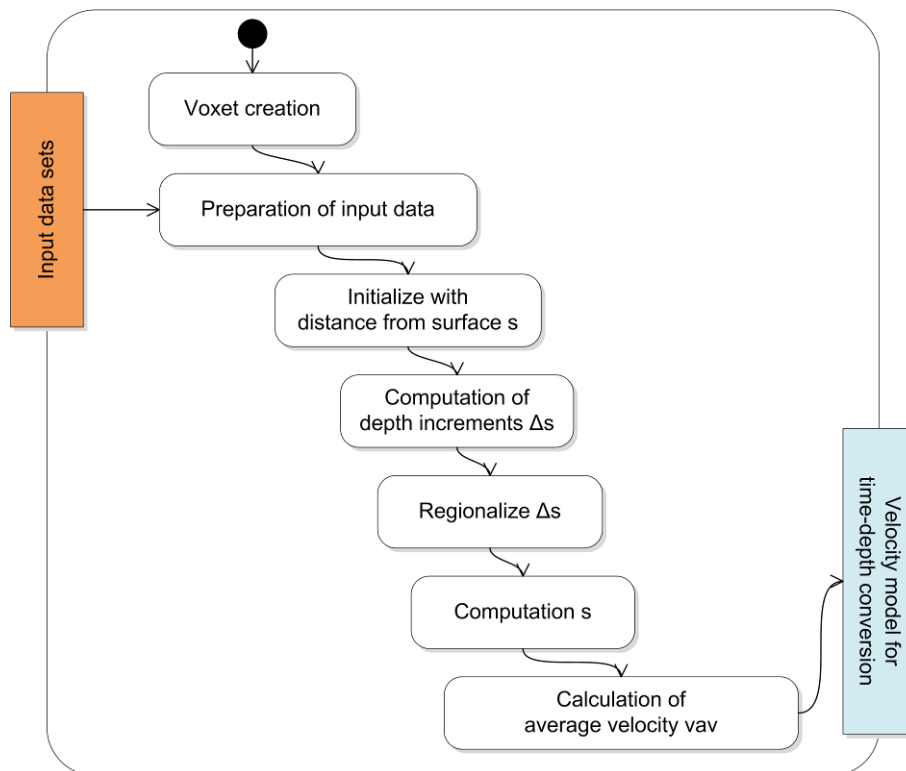


Abb. 3.5.8.2-1: UML diagram - Workflow Model for time-depth conversion (Velocity model 2)





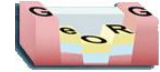
Literaturhinweise

Baillieux et al. (2011), van Dalssen et al. (2007)



Das vorliegende Dokument ist Teil des „Fachlich-Technischen Abschlussberichts - Teil 3“ des INTERREG IV-Projekts „GeORG – Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“.

Der komplette Bericht (Teil 1-4) ist unter www.geopotenziale.eu zum Download bereit gestellt.



3.5.8.3 Intervallgeschwindigkeiten in der Schweiz (*Modeling of interval velocities CH*)

Ziel: Geschwindigkeitsmodell für die Zeit-Tiefenkonvertierung im Schweizer Anteil des Projektgebiets

Kurzbeschreibung

Im Schweizer Teilmodell wurden mit Hilfe eines iterativen Verfahrens Intervallgeschwindigkeiten zwischen den einzelnen Reflektorhorizonten errechnet. Dabei wurde versucht, die Bohrinformationen mit der Tiefenlage von entsprechenden Reflektoren in der Reflexionsseismik zu korrelieren.

Eingangsdaten

Geschwindigkeitswerte aus der Literatur (s. Beschreibung; *Velocities from literature*), interpretierte 2D-Seismik (*Horizons from seismics*), Bohrungen (*Wells*), Mächtigkeitsverteilungen (*Thickness distributions*)

Beschreibung

Im Schweizer Teilmodell wurde direkt in der Tiefendomäne modelliert. Das bedeutet, dass die Interpretationen der Reflexionsseismik aus der Zeitdomäne in die Tiefendomäne umgerechnet werden müssen. Die für die Umrechnung notwendigen Geschwindigkeiten werden in einem iterativen Verfahren ermittelt.

Da Intervallgeschwindigkeiten lokal zufriedenstellende Ergebnisse liefern, einfach zu verarbeiten sind und in angrenzenden Gebieten gute Ergebnisse erzielt wurden, wurde dieses Prinzip hier auch übernommen.

In einem ersten Schritt wurden Literaturwerte (z.B.: Ustaszewski & Schmid 2007, Sprecher & Müller 1986) aus den Gebieten östlich und westlich des Modellgebiets herangezogen und eine erste Zeit-Tiefenkonvertierung (*Time-depth conversion of horizons*) durchgeführt. Hierfür wurde, je nach Qualität der seismischen Daten, die Zweiwegelaufzeiten (twf) für definierte Stützpunkte entlang der interpretierten Horizonte ausgelesen und mittels herkömmlicher Tabellenkalkulationsprogramme in Tiefe umgerechnet. Größere Abstände zwischen den umgerechneten Horizonten und Bohrmarkern zeigen Bereiche, in denen entweder die Seismikinterpretation oder die Intervallgeschwindigkeiten angepasst werden müssen (*Consistency check - horizon position ok?*). Im Weiteren wurden dann, entweder die Geschwindigkeiten modifiziert (*Modification of interval velocities*) oder die Interpretation der Reflektoren angepasst (*Modification of horizon position in seismics*). Auf diese Weise entwickelte sich Schritt für Schritt eine Abfolge aus Intervallgeschwindigkeiten, die alle Eingangsdaten möglichst gut berücksichtigen.

Ergebnis: Intervallgeschwindigkeiten (*Velocity model for time-depth conversion*)



3.5.8.3 Modeling of interval velocities (CH)

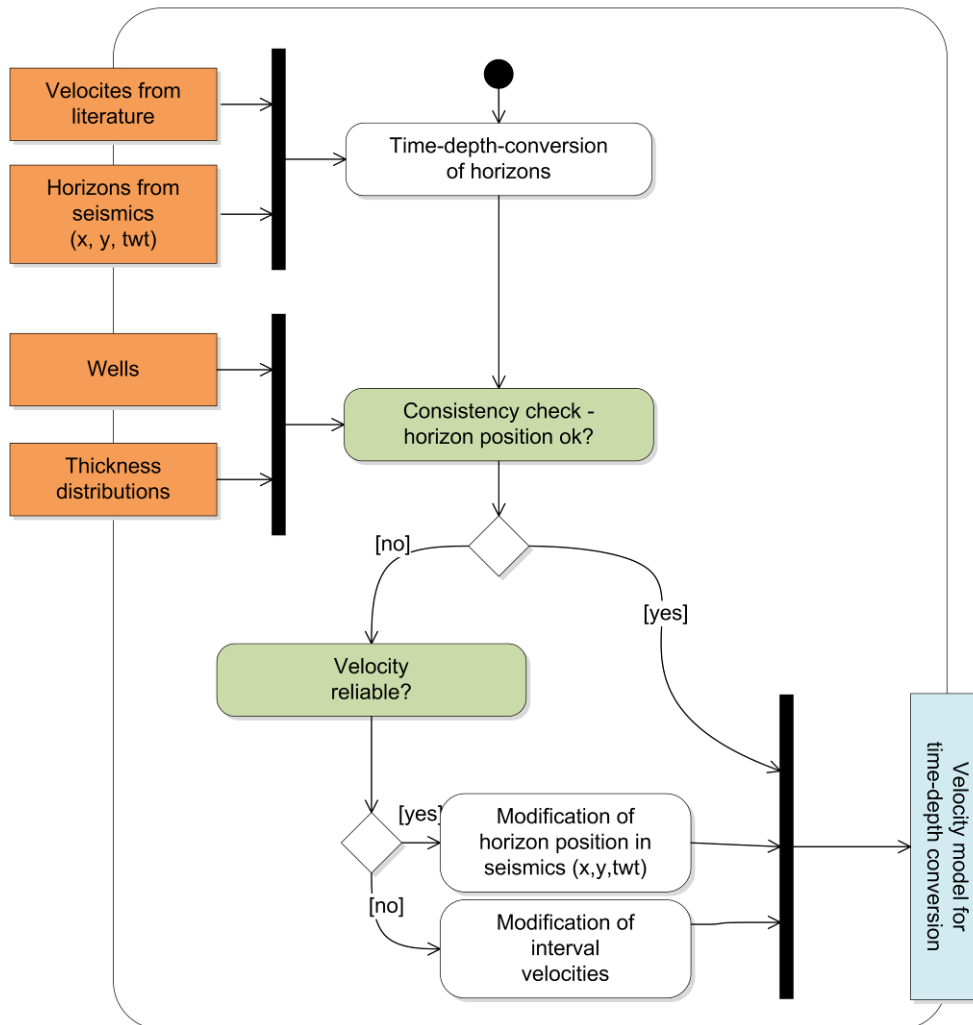


Abb. 3.5.8.3-1: UML diagram - Workflow modeling of interval velocities CH

Literaturhinweise

Ustaszewski & Schmid (2007), Sprecher & Müller (1986)



3.5.9 Darstellung der Datendichte und Abweichungen

Ziel: Ableitung der Datendichte für Modellhorizonte und Mächtigkeitsverteilungen sowie Workflow für den Vergleich neuer Bohrinformationen mit modellierten Horizonten für die Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft

Kurzbeschreibung

Ableitung der Datendichte für Modellhorizonte und Mächtigkeitsverteilungen sowie Workflow für den Vergleich neuer Bohrinformationen mit modellierten Horizonten für die Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft

Eingangsdaten

- Polygone Gesamtverbreitung
- Polygone Schollenmosaik
- verwendete Bohrungen, Seismikinterpretationen, Ausstrich auf Geologischer Karte

Beschreibung

- Datendichte-Karten für Schichtlagerung und Mächtigkeitsverteilungen geben eine Übersicht, wo die geologischen Modellhorizonte bzw. die Mächtigkeitsverteilungskarten durch Eingangsdaten gestützt werden. Der Griddatensatz enthält Werte zwischen 1 (keine Daten) und 0 (Datum/Daten vorhanden), die die relative Datendichte widerspiegeln (s. auch Kap. 3.5.9.1).

- Für das Schweizer Teilgebiet wurde eine Routine entwickelt, die Basisdaten aus Bohrungen und neuen Bohrinformationen mit den modellierten Horizonten vergleicht und die Abweichungen darstellt (siehe auch Kap. 3.5.9.2).





3.5.9.1 Darstellung der Datendichte

Ziel: Ableitung der Datendichte für Modellhorizonte und Mächtigkeitsverteilungen

Kurzbeschreibung

Ableitung der Datendichte für Modellhorizonte und Mächtigkeitsverteilungen

Eingangsdaten

- Polygone Gesamtverbreitung
- Polygone Schollenmosaik
- verwendete Bohrungen, Seismikinterpretationen, Ausstrich auf Geologischer Karte

Beschreibung

Die Datendichte-Karten wurden in ArcGIS bzw. ArcView erstellt.

Eingangsdaten:

Schichtlagerung:

- Eingangsdaten für direkt konstruierte Schichtflächen (Zeitdomäne): Bohrungen, Seismik, Ausstrich
- Eingangsdaten für indirekt konstruierte Schichtflächen (Tiefendomäne): Bohrungen, Ausstrich

Mächtigkeitsverteilungen

- Eingangsdaten: Bohrungen (weitere indirekte Datenquellen wie Mächtigkeitskarten, Literaturwerte oder Hinweise wie fazielle Unterschiede des Gesteinsverbands wurden nicht mit einbezogen).

Berechnungsschritte

- Zusammenstellen der Eingangsdaten in einem oder zwei Shapefiles:
 - Bohrungen und Ausstrich
 - Seismikinterpretation.
- Erstellung von Buffern um die Eingangsdaten:
 - ein 5 m Buffer um die Eingangsdaten stellt den Bereich dar, der als datengestützt angenommen wird
 - ein maximaler Wirkradius von 5 km (Schichtlagerungen, känozoische Mächtigkeitsverteilungen) bzw. 10 km (prä-känozoische Mächtigkeitsverteilungen) gibt den Bereich an, außerhalb dessen „kein Datum“ gilt.

→ nur bei Schichtlagerung:

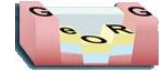
- Verschnitt (Intersect) der Buffer mit dem Störungsmuster (topologisch bereinigtes Schollenmosaik in 2D). Die Eingangsdaten gelten nur für den jeweiligen Störungsblock und sind jenseits von Störungen nicht wirksam
- Lineare Interpolation innerhalb der Buffer zwischen 0 und 1, außerhalb relative Datendichte generell bei 1 (Berechnung mit der Extension ContourGridder in ArcView 3.3)
- Zuschneiden des Grids mit Gesamtverbreitungs-Polygon

Die Datendichte-Karten werden im Atlas FTA4 bei den entsprechenden Schichtlagerungs- und Mächtigkeitsverteilungskarten als Zusatzinformation dargestellt.

Atlasblätter

2.1 bis 2.10 und 3.1 bis 3.5





3.5.9.2 Abweichungen der Basisdaten (Bohrungen) und neuen Bohrdaten in den Kantonen Basel-Stadt und Basel-Landschaft

Ziel: Abschätzung der modellierten Horizontqualität in Gebieten mit neuen Bohrungen nach Abschluss des GeORG-Projekts

Kurzbeschreibung

Vergleich der Basisdaten aus Bohrungen und neuen Bohrinformationen mit den modellierten Horizonten in den Modellbereichen, welche die Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft beinhalten

Eingangsdaten

Bohrdaten, Modellhorizonte

Beschreibung

Im Schweizer Teilmodell, auf dem Hoheitsgebiet der Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft, wurde eine Routine entwickelt, um die Abweichungen der modellierten Horizonte von den Eingangsdaten und neuen Bohrinformationen, welche noch nicht in die Modellierung eingeflossen sind, darzustellen.

Die Ergebnisgeometrie eines Horizontes, wurde über eine speziell programmierte Importroutine in einen Rasterdatensatz überführt und steht nun in ArcGIS zur Verfügung. Aufgrund einer direkten Anbindung der Bohrinformationsdatenbank (GeoDATA) an der Universität Basel (Abteilung für Angewandte und Umweltgeologie) mit dem GIS-System können nun die Passgenauigkeit der Basisdatenpunkte aus Bohrungen und neue Bohrdaten sehr schnell und außerhalb der 3D-Software visualisiert werden. Auf diese Weise kann eine Abschätzung zur modellierten Horizontqualität vorgenommen werden. Auch zukünftig soll diese Routine weiter gepflegt werden und für Abfragen zur Verfügung stehen.

Eine Abweichung von Bohrinformationen (Eingangsdaten) von der modellierten Ergebnisgeometrie, kann verschiedene Gründe haben:

- Qualität der Bohrinformation: Es kann sein, dass es andere Eingangsdaten (z.B. Oberflächenbefunde oder Mächtigkeitsverteilungen) gibt, die während der Modellierung stärker gewichtet wurden.
- Widersprüchliche Bohrinformationen: Es kann sein, dass benachbarte Bohrinformationen sich widersprechen und eine Interpretation der Situation nur schwer möglich ist.

Ursachen:

- fehlerhaften Bohrprofilaufnahmen
- unbekannte Verwerfungen (Lage, Versatz, Charakter)
- Bohrinformationen sind höherauflösend als die Modellgeometrie in diesem Bereich
- Abfolge der Modellerschritte

Ergebnis: Abschätzung der modellierten Horizontqualität in Gebieten mit neuen Bohrungen nach Abschluss des GeORG-Projekts (s. Abb. 3.5.9.2-1)



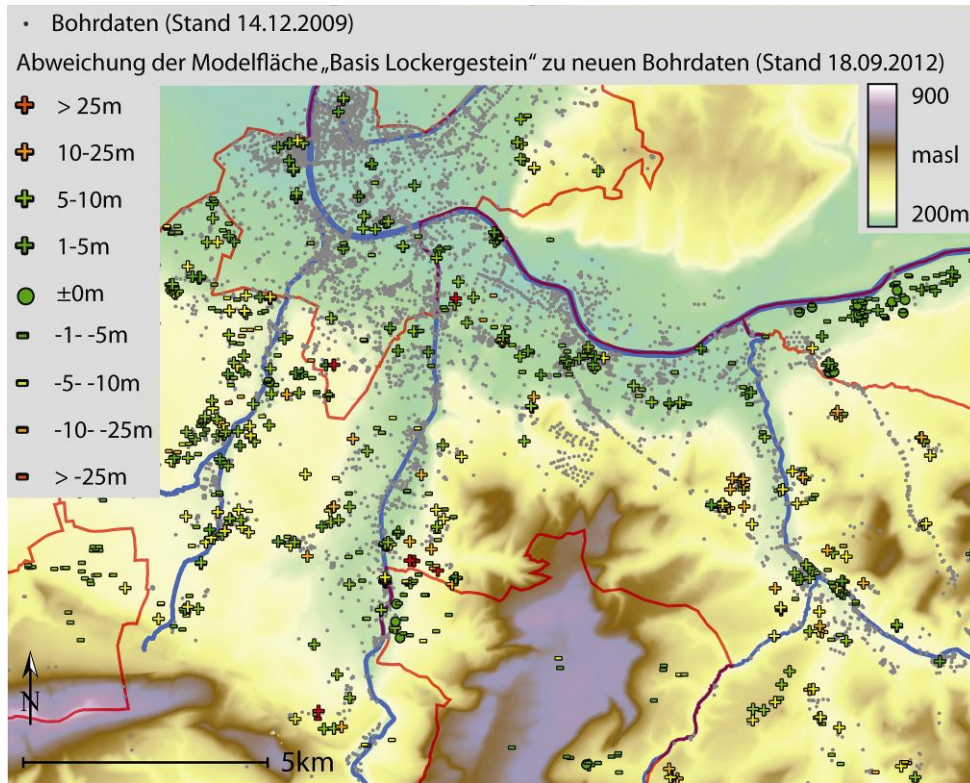
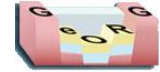


Abb.: 3.5.9.2-1: Abweichung neuere Bohrdaten (Stand 18.09.2012) zu einem schon modellierten Horizont, Beispiel „Basis Lockergesteine“ (Ausschnitt aus dem Teilmodell Schweiz, Modellstand 14.12.2009).



3.5.10 Ableitung von Produkten aus dem geologischen 3D-Modell (*Derivation of products*)

Ziel: GIS-Objekte für die Klassifizierung von Geopotenzialen und als Vorlage für Karten- und Mapserverthemen

Kurzbeschreibung

Ableitung von geologischen Informationen aus dem geologischen 3D-Modell als Vorlage für Karten- und Mapserverthemen

Eingangsdaten

Modellhorizonte als Gocadobjekte

Beschreibung

- kombinierter GIS- und Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne

Ableitung von:

- Schichtlagerung (Grid, Isolinien, Verbreitung als Polygone, s. Kap. 3.5.10.1) - *Derivation of horizons*
- Mächtigkeiten (Grids, Isolinien, s. Kap. 3.5.10.2) - *Derivation of thickness distributions*
- Störungen (Schnittlinien, Störungspolygone, s. Kap. 3.5.10.3) - *Derivation of fault information*
- Profilschnitten (Schnittlinien, s. Kap. 3.5.10.4) - *Derivation of cross sections*
- Mächtigkeitsprofilen (Schnittlinien, s. Kap. 3.5.10.5) - *Derivation of vertical thickness profiles*
- Darstellungen zur Geologie in definierten Tiefenstufen (Grids) bzw. für Isothermenflächen, s. Kap. 3.5.10.6 - *Derivation of geological maps for certain depths or isothermal planes*

Für die einheitliche Ableitung von Rasterdatensätzen wurde zunächst ein ArcInfo-Grid ("Produktgrid") mit einer Zellgröße von 100 m x 100 m erstellt, dessen Zellmittelpunkte in ein Punkt-Shapefile umgewandelt und in Gocad als Punktdatensatz importiert. In Gocad kann der Punktdatensatz entweder direkt für Berechnungen genutzt werden oder als Grundlage für ein Voxet dienen.

Export der Datensätze aus Gocad im *.dxf Format (Isolinien, Verbreitungspolygone, Störungsverschnitte als Linien), Ascii-Format (Griddatensätze als Punkte) und Grafiken im *.png Format (Profilschnitte) - *Export*

Import der aus Gocad erzeugten Vektordatensätze in ArcGIS, Konvertierung der Ascii-Datensätze in Grids, Umwandlung der *.dxf Files in Linien- und Polygondatensätze im Shapeformat, Weiterverarbeitung, Topologiebereinigung und kartographische Aufbereitung (*Import & additional editing*)

Import der aus Gocad erzeugten Abbildungen zu Profilschnitten und vertikalen Mächtigkeitsprofilen in ein Grafikprogramm und Weiterverarbeitung (s. Kap. 3.5.10.4)



3.5.10 Derivation of products

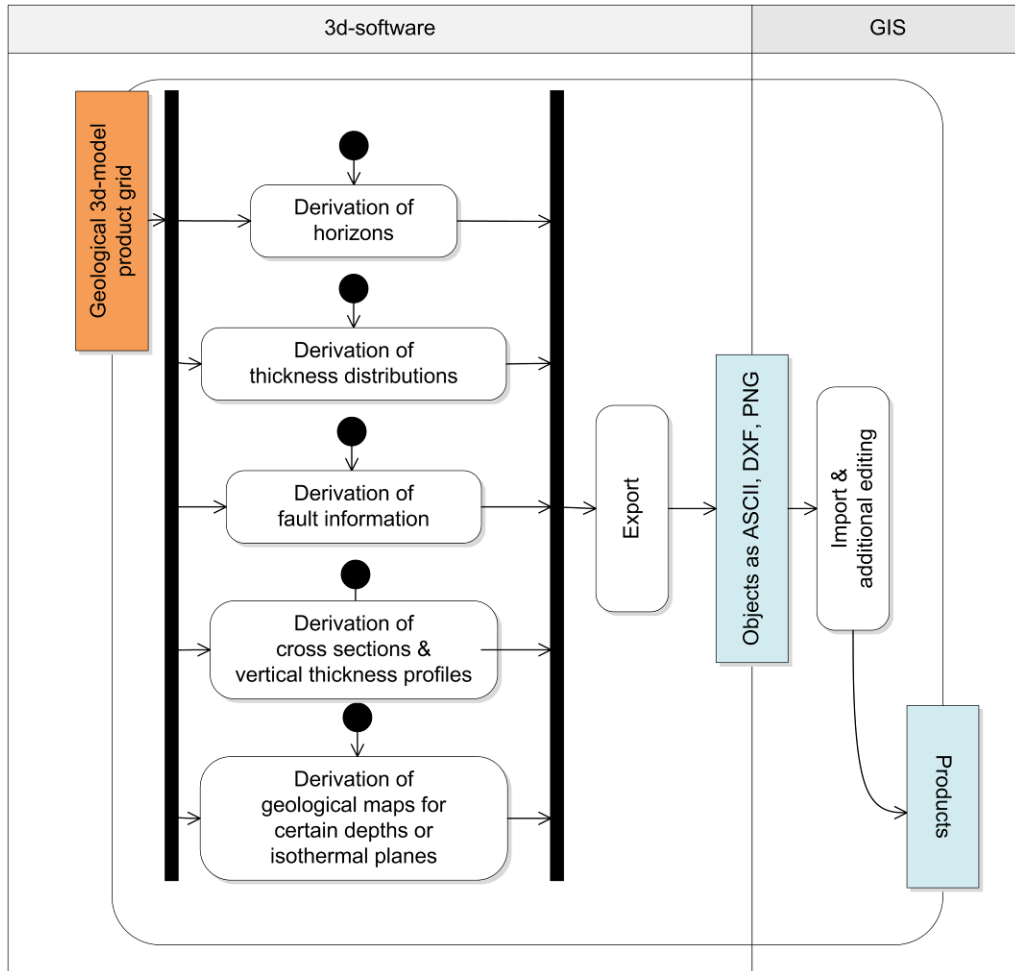
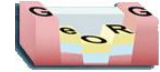


Abb. 3.5.10-1: UML diagram - Workflow derivation of products



3.5.10.1 Ableitung von Schichtlagerungsinformationen (*Derivation of structural maps*)

Ziel: Bereitstellung von abgeleiteten Raumlagedatensätzen aus dem geologischen 3D-Modell für Karten und Mapserverthemen

Kurzbeschreibung

Ableitung von Schichtlagerungsinformationen aus dem geologischen 3D-Modell als Vorlage für Karten- und Mapserverthemen

Eingangsdaten

Modellhorizonte als Gocadobjekte (*Horizons*), 100 m Punktdatensatz auf Grundlage des Produktgrids (*product grid*)

Beschreibung

- kombinierter GIS- und Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne

Für die Ableitung von Schichtlagerungsinformationen sind die Ableitung und der Export mehrerer Objekttypen aus Gocad heraus notwendig.

Isohypsen (*Derivation of isohypses*):

- Berechnung der Isolinien in Gocad (100 m-Abstand, im Attributordner der jeweiligen Horizontfläche)
- Berechnung von Curve-Objekten aus den Isolinien (*Curve - New - Create From Contours*)
- Export der Isolinien im dxf-Format (*Export as DXF*)
- Import in ArcGIS, Umwandlung in 2D-Shapefiles; Reduktion der Attributspalten und Festlegung des Koordinatensystems (*Convert to shapefile*)

Störungen:

- Ableitung von Störungen (s. Kap. 3.5.10.3)

Grids:

- Parametrisierung Produktgrid (*Parameterization product grid*): Projektion der z-Werte des jeweiligen Horizonts auf das Produktgrid (*PointsSet - Property - Transfer Property By Vertical Projection*)
- Export des Punktdatensatzes aus Gocad im Asciiformat (*Export as ASCII*)
- Import in ArcGIS als *.tab Dateien und Umwandlung in einen Griddatensatz mit der Funktion *Add XY Data* (*Import as grid*)
- Umwandlung der in Gocad festgelegten NoData-Values (-99999) in das ArcGIS-spezifische Pendant

Verbreitung (*Generation of occurrence polygons*)

- Löschen aller Borderstones des jeweiligen Horizonts
- Erzeugen von Curve-Objekten aus den Borders der Horizonte (*Curve - New - Create From Borders - All*)
- Export der Curve-Objekte im dxf-Format (*Export as DXF*)
- Import in ArcGIS, Umwandlung in Polygon-Shapefiles (*Conversion to shapefile*)
- Löschen interner Bereiche ohne Verbreitung und Entfernen von Topologiefehlern

- Kombination der Datensätze in ArcGIS (*Combination and layout*)

- Ergebnis: Schichtlagerungskarte (*structural map*)



3.5.10.1 Derivation of structural maps

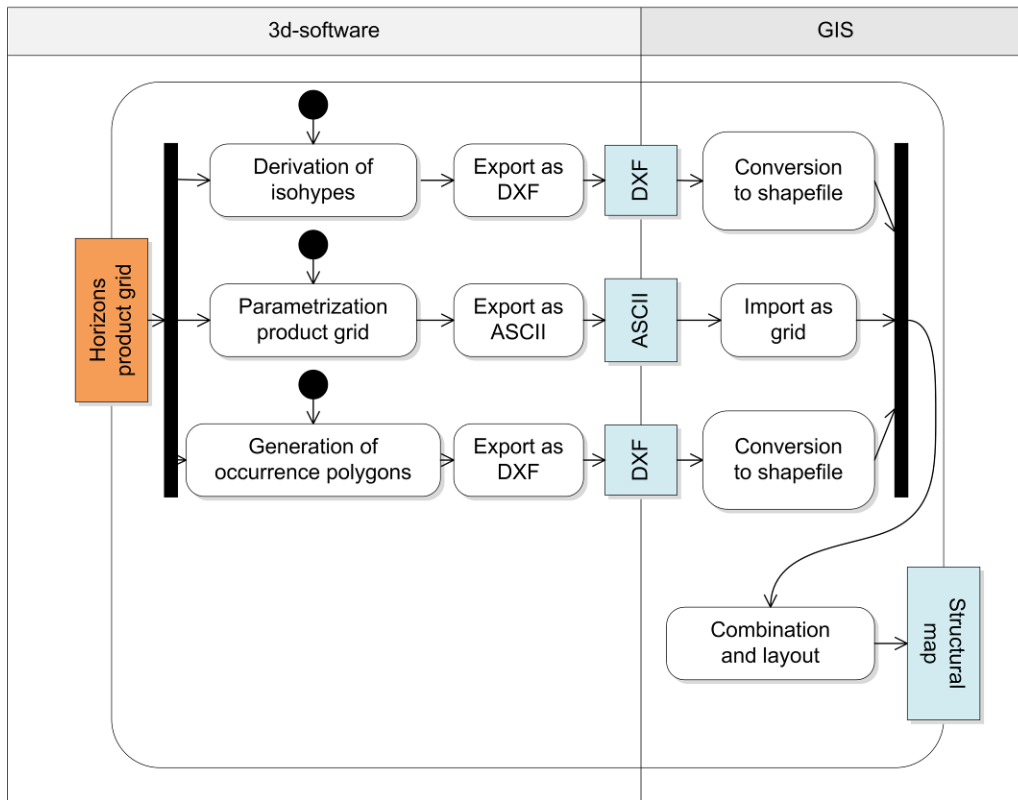
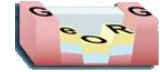


Abb. 3.5.10.1-1: UML diagram - Workflow derivation of structural maps

Atlasblätter
2.1-2.10



3.5.10.2 Ableitung von Mächtigkeitsverteilungen (*Derivation of thickness distributions*)

Ziel: Bereitstellung von Informationen aus dem geologischen 3D-Modell zu Schichtmächtigkeiten für Karten- und Mapserverthemen

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte zur Ableitung von Schichtmächtigkeiten aus dem 3D-Modell als Vorlage für Karten- und Mapserverthemen

Eingangsdaten

Top- und Basishorizont, zwischen denen die Schichtmächtigkeit ermittelt werden soll (*Horizons*); in Gocad auf Grundlage des Produktgrids (*Product grid*)

Beschreibung

- kombinierter GIS- und Gocad-Arbeitsschritt, Tiefendomäne

- Mächtigkeitsverteilungen für Schichtintervalle mit starken synsedimentären Schwankungen (d.h. alle känozoischen Einheiten) und Restmächtigkeitsverteilungen werden direkt aus dem geologischen 3D-Modell abgeleitet.

- Ableitung von Griddatensätzen. Die Erstellung von Isolinien ist aufgrund der kleinräumig starken Mächtigkeitschwankungen nicht sinnvoll.

Ableitung von Mächtigkeitsverteilungen aus dem geologischen 3D-Modell:

- Projektion der z-Werte des Top- und Basishorizonts auf das aus dem Produktgrid abgeleiteten Berechnungsvoxet (*Voxel - Property - Transfer Property by Vertical Projection*) - *Grid parametrization with z-values*

- Berechnung von vertikalen Schichtmächtigkeiten durch Subtraktion der z-Werte des Basishorizonts vom Tophorizont für Punkte, bei denen beide Werte vorliegen mit dem Property Script Editor (Abschnitte mit störungsbedingter Mächtigkeitsreduktion werden in diesem Arbeitsschritt nicht berechnet) - *Thickness computation (vertical)*

- Die Berechnung der vertikalen Schichtmächtigkeit führt insbesondere in stark geneigten Schichtintervallen zu einem größeren scheinbaren Mächtigkeitswert. Ab einem Einfallswinkel von 18° beträgt der Fehler etwa 5%. Da die Lagerungsverhältnisse modellweit meist flachere Einfallswinkel zeigen, ist dieser Fehler vernachlässigbar. Relevanz hat die Abweichung meist in Grabenrandgebieten.

- Interpolation der Mächtigkeit für Abschnitte mit störungsbedingter Mächtigkeitsreduktion (*Voxel - Interpolation - Initialize Property (Plane): Plane W; Propagate Value*) über das gesamte Voxet - *Interpolation of tectonically reduced areas*

- Löschen von interpolierten Mächtigkeitswerten in Zellen, in denen die Einheit total ausfällt mit dem Property Script Editor (*Delete areas with complete loss*)

- Umwandlung des Voxets in einen Punktdatensatz (*PointsSet - New - From Voxel Section; W index 0*) - *Conversion to points*

- Export des Punktdatensatz im Asciiformat (*Export*)



- Import in ArcGIS als *.tab Dateien und Umwandlung in einen Griddatensatz mit der Funktion *Add XY Data (Import as grid)*
- Umwandlung der in Gocad festgelegten NoData-Values (-99999) in das ArcGIS-spezifische Pendant
- Verschnitt des Rasters mit der aktuellen Verbreitung des Schichtpakets (*Cut with occurrence polygon*)
- Kombination der Datensätze in ArcGIS (*Combination and layout*)
- Ergebnis: Mächtigkeitsverteilung als GIS-Datensatz (*Thickness distribution*)

3.5.10.2 Derivation of thickness distributions

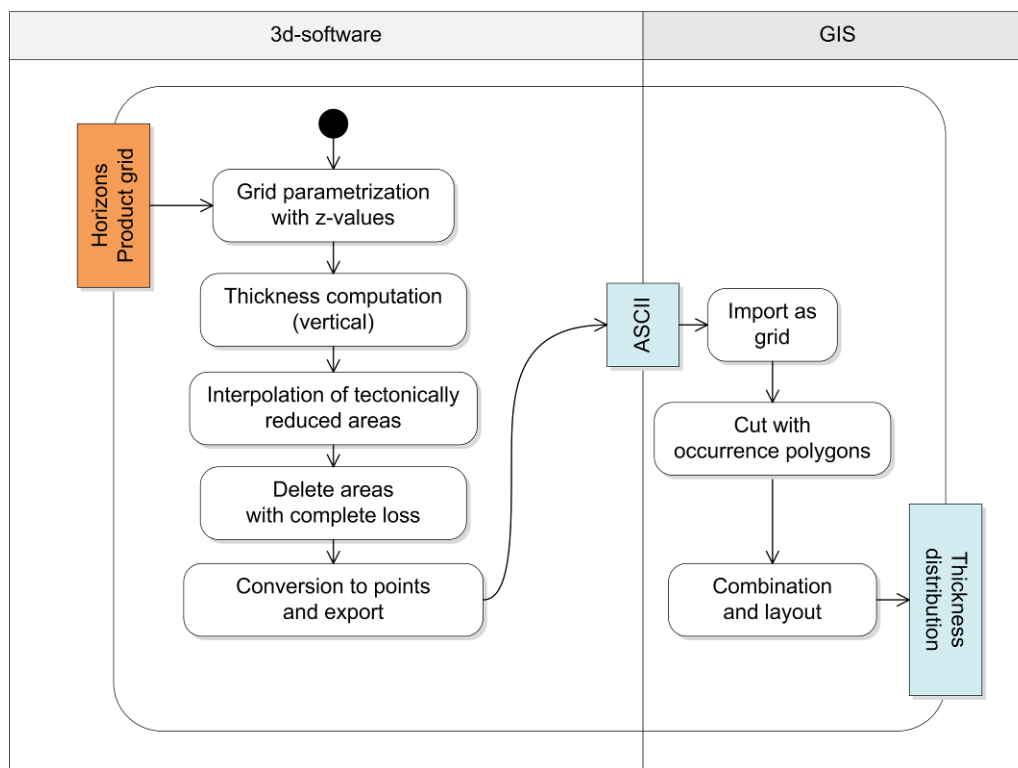
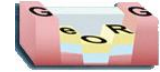


Abb. 3.5.10.2-1: UML diagram - Workflow derivation of thickness distributions

Atlasblätter

3.1, 3.2



3.5.10.3 Ableitung von Störungsinformationen

Ziel: Bereitstellung von Störungsinformationen aus dem geologischen 3D-Modell für Karten- und Mapserverthemen

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte zur Ableitung von Störungsinformationen aus dem geologischen 3D-Modell als Vorlage für Karten- und Mapserverthemen

Eingangsdaten

Störungen und Horizonte aus dem geologischen 3D-Modell und dem Temperaturmodell

Beschreibung

Störungsinformationen für die thematischen Karten wurden aus dem geologischen 3D-Modell auf verschiedene Weise abgeleitet.

1) Für die Übersichtsdarstellung der tektonischen Strukturen im Projektgebiet (Atlasblatt 1.4) wurden die oberen Begrenzungen der Störungsflächen als Linienobjekte exportiert.

2) Für Karten wie z.B. „Tiefenlage der XY-Isotherme [m unter GOK]“ oder „Temperatur in XY m unter Gelände“ konnten die Störungsspuren durch einen Verschnitt in Gocad (*Curve - New - From Surfaces - Surface intersection*) von den Störungsflächen auf der einen Seite mit der jeweiligen Isothermenfläche oder einer horizontalen Fläche in bestimmter Tiefe auf der anderen Seite erstellt werden.

3) Für die thematischen Karten „Schichtlagerung Horizont XY“ und „Temperatur an Horizont XY“ ergaben sich zwei mögliche Wege, die Störungspolygone und Linien aus dem Modell zu extrahieren. Beide Wege führen zu einer Darstellungen der Störungen als Polygon bzw. Linie, ohne eine Unterscheidung nach Bewegungssinn (Ab- oder Überschiebung) zu enthalten.

a) Eine Shapedatei der Polygone des Schollenmosaiks des jeweiligen Horizonts wurde in ein 2D-Shape umgewandelt und topologisch bereinigt (Topologieregel: „must not overlap“). Bei der Bereinigung der Topologiefehler mussten erst Fehler, die sich als nahezu aber nicht vollständig identische, übereinanderliegende Polygone zeigten, einzeln, mit Vergleich des tatsächlichen Schollenmosaiks, bereinigt werden. Die restlichen Fehler, die durch sich überschneidende Polygone im Bereich von Überschiebungen oder kleine Modellierfehler entstanden, wurden schematisch durch den Topologiebereinigungsbefehl „subtract“ entfernt. Als Ergebnis entstand ein Polygon-Shape von „Restschollen“ ohne Störungseinfluss, deren Ränder die Begrenzung der Störungszonen zeigen. Durch Ausstanzen dieser Polygone aus einer Fläche, die größer als die Verbreitung des Horizontes ist, wurden die Störungspolygone erstellt und anschließend auf die Gesamtverbreitung zugeschnitten. Um zusätzlich ein Linien-Shape zu erhalten, wurden die Polygone in Linien umgewandelt und ebenfalls auf die Gesamtverbreitung des Horizontes zugeschnitten.

b) Eine Shapedatei der Polygone des Schollenmosaiks (bzw. der Anteil „polygon“ aus der aus Gocad exportierten *.dxf-Datei) wurde mit einer Polygonfläche, die größer als die Gesamtverbreitung des Horizontes ist, über den ArcGIS-Befehl „union“ vereint. Aus den Polygonen des Schollenmosaiks wurden Punkte erstellt (*Feature - To Point*). Nach einer Prüfung, ob diese tatsächlich innerhalb der Schollen zu liegen kommen, wurden aus dem durch „union“ erstellten Shape alle Polygone ausgewählt („select by location“), die einen Punkt enthalten. Eine Umkehrung der Auswahl ergibt die Störungspolygone, die noch auf die Gesamtverbreitung zugeschnitten werden müssen. Um auch die Störungen zu erfassen, die das Modellgebiet begrenzen, und um auch die Störungen in der Kartendarstellung deutlich sichtbar zu machen, die aus extrem schmalen Polygonen bestehen, wurde zusätzlich ein Linienshape der Störungsspuren erstellt. Es ergibt sich aus dem Verschnitt der Störungsflächen mit den Horizontflächen (die um 5m erweitert wurden, um einen





Schnitt zu ermöglichen) in Gocad (*Curve - New - From Surfaces - Surface intersection*) und dem Export dieser Linien als .dxf-Datei und Umwandlung in ein Linien-Shape in ArcGIS.

Da beide Methoden fehleranfällig sind, sorgt ein Vergleich mit dem Gocad-Modell dafür, dass die Hauptstörungen und -störungszonen dargestellt werden. Kleinere Fehler werden aus Zeitgründen in Kauf genommen.

4) Für thematische Karten, die Störungsinformationen für mehrere zusammengefasste Horizonte benötigen (z.B. „Speicherpotenzial nach Tiefenlage und Mächtigkeit Unterer Jura und Keuper“), wurde vereinfachend die unter 3b) erstellten Störungen für einen der betroffenen Horizonte dargestellt.

Atlasblätter

1.5, 2.1-2.10, 5.1.1-5.6.2, 5.7.1, 5.8.1, 5.9.1, 5.10.1-5.20, 6.1-6.10, 7.1-7.7





3.5.10.4 Ableitung von Profilschnitten

Ziel: Bereitstellung von Profilschnittinformationen aus dem geologischen 3D-Modell für Atlasthemen

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte zur Ableitung von Profilschnitten aus dem geologischen 3D-Modell als Vorlage für Atlasthemen

Eingangsdaten

Geologisches 3D-Modell, Topographische Daten, DGM, Isothermenflächen, Profilspur, Lage von Bohrungen

Beschreibung

Vertikale Profilschnitte lassen sich sowohl direkt aus dem Gocad-Modell ableiten, als auch aus der Mapviewer-Anwendung exportieren.

Der Verlauf der Profillinien wird in ArcGIS digitalisiert und nachfolgend als Shapefile in Gocad importiert.

In Gocad können mit „CrossSection - From Digitized Polyline“ vertikale Profilschnitte erzeugt und als Bild, z.B. als *.png-Datei, exportiert werden. Für die Atlasdarstellungen wurden die Profilschnitte in der Mapviewer-Anwendung erzeugt.

Für eine ansprechende graphische Darstellung müssen die Profilschnitte in einem Vektorzeichenprogramm, wie z.B. Inkscape oder Adobe Illustrator nachbearbeitet werden. Beschriftungen und Legende werden ebenfalls im Zeichenprogramm hinzugefügt, genauso Hinweise auf Städte, Flüsse und Autobahnen.



3.5.10.5 Ableitung von Mächtigkeitsprofilen

Ziel: Darstellung von Mächtigkeitsverteilung tertiärer oder mesozoischer und paläozoischer Sedimentgesteine im Oberrheingraben

Kurzbeschreibung

Darstellung von Mächtigkeitsverteilung tertiärer oder mesozoischer und paläozoischer Sedimentgesteine im Oberrheingraben

Eingangsdaten

Mächtigkeitsverteilungsraster der tertären Einheiten (Raster aus dem geologischen 3D-Modell, siehe Kap. 3.5.10.2), Mächtigkeitsverbreitungskarten für mesozoische und paläozoische Einheiten als Raster (siehe Kap. 3.5.2.2)

Beschreibung

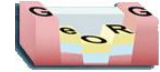
Die Rasterdaten wurden in ArcGIS in Punktdatensätze umgewandelt und in Gocad importiert.

In Gocad wurde aus einem Punkt-Rasterdatensatz, der das komplette geologisch modellierte Gebiet umfasst, eine horizontale Ebene erstellt (triangulierte Fläche) und die Mächtigkeitswerte der einzelnen Datensätze (getrennt nach tertiären bzw. mesozoisch- paläozoischen Einheiten) als Eigenschaften auf die Ebene übernommen (*Property - Transfer Property - By Vertical Projection*).

Als Bezugshorizont („Nullebene“) wurde für die tertiären Einheiten 040_bff (Basis Froidefontaine-Fm.) gewählt und für die mesozoischen und paläozoischen Einheiten 090_bju (Basis Jura). Anschließend wurde die Ebene mit den Mächtigkeitswerten kopiert, die jeweilig benötigten Mächtigkeiten aufsummiert und der Fläche als Z-Wert zugewiesen.

Mit *CrossSection - From Digitized Polyline* wurden vertikale Profilschnitte erzeugt, als *png-Datei exportiert und in einem Vektorgrafik-Programm nachbearbeitet (vgl. auch Kap. 3.5.10.4).





3.5.10.6 Ableitung von Geologischen Karten für definierte Tiefenstufen und Isothermen (*Derivation of geological maps for certain depths or isothermal planes*)

Ziel: Bereitstellung von Informationen zur Geologie für definierte Tiefenstufen und Isothermen aus dem geologischen 3D-Modell für Karten- und Mapserverthemen

Kurzbeschreibung

Arbeitsschritte zur Ableitung von Informationen zur Geologie für definierte Tiefenstufen und Isothermen aus dem geologischen 3D-Modell als Vorlage für Karten- und Mapserverthemen

Eingangsdaten

Horizonte aus dem geologischen 3D-Modell (*Geological horizons*), Gocadflächen für definierte Tiefenstufen, Isothermenflächen (*cut horizon*), Produktgrid (*product grid*)

Beschreibung

Aus dem geologischen 3D-Modell lassen sich komplexe Verschnitte mit beliebigen Horizonten erzeugen. Im Rahmen des GeORG-Projekts wurden Verschnitte von Isothermen (z.B.: 100 °C Isotherme) und Flächen vordefinierter Tiefenstufen (sog. Schnitthorizonte, z.B.: 1000 m unter Gelände) mit dem geologischen 3D-Modell generiert.

- Grundlage für die Berechnung der geologischen Karte ist ein aus dem Produktgrid abgeleiteter Punktdatensatz
- Transfer der z-Werte der Schnitthorizonte auf den Punktdatensatz (*PointsSet - Property - Transfer Property By Vertical Projection*) - *Grid parametrization with z-values of the cut horizon*
- Transfer der z-Werte der geologischen Horizonte auf den Punktdatensatz (*PointsSet - Property - Transfer Property By Vertical Projection*) - *Grid parametrization with z-values of geological horizons*
- Zuweisung der geologischen Einheit nach folgendem Schema:
 - Erstellen einer neuen Eigenschaft *geo_id* (Integer, für die Horizont-IDs der geologischen Einheiten, zunächst komplett unparametrisiert)
 - Parametrisierung der geologischen Einheit vom Hangenden zum Liegenden (Start: Lockergesteine, Ende: Grundgebirge)
 - Abfrage für jeden Punkt: Falls die *geo_id* noch nicht parametrisiert ist, teste, ob der Schnitthorizont über dem entsprechenden geologischen Horizont liegt (z.B.: $z_{\text{Schnitthorizont}} > z_{\text{blg}}$; *Position of geological horizon above cut horizon?*); falls diese Bedingung erfüllt ist, parametrisiere *geo_id* mit der entsprechenden Horizont-ID (z.B.: 10 für Lockergesteine; *Parametrization with geo_id*), andernfalls bleibt die *geo_id* unparametrisiert (*Parametrization with NoData*)

Aufgrund des komplexen geometrischen Baus kann dieser Algorithmus im Bereich von Störungen zu Verfälschungen führen. Diese ließen sich mit Hilfe eines geologischen Volumenmodells vermeiden. Ein Volumenmodell konnte aus Zeitgründen jedoch nicht projektgebietweit realisiert werden.

- Export des Punktdatensatzes im Asciiformat (*x y geo_id; Export*), Import in ArcGIS und Griderzeugung (*Import as grid*)

Ergebnis: mit geologischen Einheiten parametrisierter Rasterdatensatz (*Geological map as grid*)



3.5.10.6 Derivation of geological maps for certain depths or isothermal planes

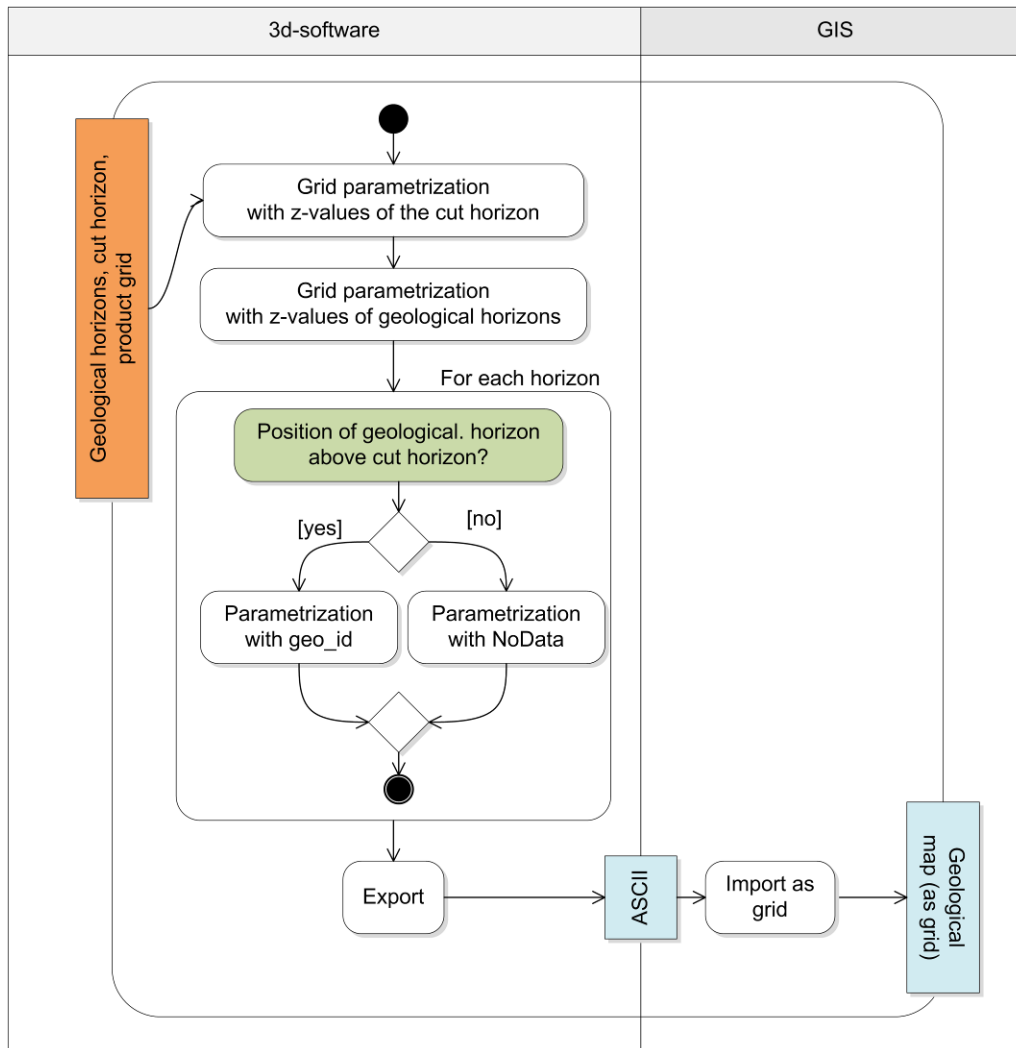
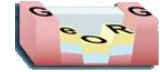


Abb. 3.5.10.6-1: UML diagram - Workflow derivation of geological maps for certain depths or isothermal planes

Atlasblätter

2.11-2.20, 5.7.2, 5.8.2, 5.9.2



3.5.11 Unsicherheiten

Ziel: Unsicherheitsfaktoren, die bei der Erhebung der Eingangsdatensätze und während der Modellierung auftreten

Kurzbeschreibung

Qualitative Beschreibung der Unsicherheitsfaktoren, die bei der Erhebung der Eingangsdatensätze und während der Modellierung auftreten

Beschreibung

Ein digitales geologisches 3D-Modell kann niemals die Gesamtheit der geologischen Komplexität der Natur exakt wiedergeben. Es stellt immer nur eine Annäherung an die realen Verhältnisse dar.

Die Güte des geologischen 3D-Modells wird von einer Vielzahl von Unsicherheitsfaktoren beeinflusst. Grundsätzlich sind zwei Gruppen von Unsicherheitsfaktoren unterscheidbar:

1. Unsicherheiten, die bei der Erhebung der Eingangsdatensätze auftreten (Kap. 3.5.11.1)
2. Unsicherheiten, die durch Annahmen bei der Modellierung und der Auflösung der Modellelemente hervorgerufen werden (Kap. 3.5.11.2)

- als Beispiel für im Modellierungsprozess entstehende Unsicherheiten wurde im Schweizer Teilgebiet die Auswirkung verschiedener Varianten der Störungskorrelation auf die Raumlage der angrenzenden Horizonte getestet (Kap. 3.5.11.3)

- einige Unsicherheiten, z.B. bei Mächtigkeitsverteilungen, lassen sich mit Hilfe von explorativer Statistik und Variogrammanalysen abschätzen
- die Mehrzahl der Unsicherheiten ist jedoch nicht eindeutig quantifizierbar
- die Berechnung eines Gesamtunsicherheitsfaktors aus den unabhängig voneinander auftretenden Einzelfaktoren ist schwierig. So führt die simple Aufaddierung von Standardabweichungen in der Regel zu einer Überschätzung der Gesamtunsicherheit (Dubrule & Damsleth 2001)

In den Kartendarstellungen des GeORG Atlas, werden für einige Themen die Standardabweichungen bzw. eine qualitative Güte (hoch – niedrig) angegeben. Diese Darstellungen beruhen in erster Linie auf der geographischen Datenverteilung der Eingangsdaten (siehe auch Kap. 3.5.9).

Literaturhinweise

Dubrule & Damsleth (2001)



3.5.11.1 Unsicherheiten der Eingangsdaten

Ziel: Unsicherheitsfaktoren, die bei der Erhebung der Eingangsdatensätze auftreten

Kurzbeschreibung

Qualitative Beschreibung der Unsicherheitsfaktoren, die bei der Erhebung der Eingangsdatensätze auftreten

Beschreibung

- Unsicherheiten werden hervorgerufen durch:

- Bohrungen:

- fehlerhafte Stammdaten (Koordinaten etc.)
- ungenaue lithostratigraphische Grenzziehung durch Kernverlust bzw. große Probenahmeabstände von Bohrklein
- fehlerhafte lithologische Ansprache
- fehlerhafte lithostratigraphische Einordnung
- fehlerhaft positionierte Bohrlogs, nicht oder fehlerhaft berechnete Kabellängung
- fehlerhaft interpretierte Bohrlogs
- nicht erkannte tektonisch verursachte Mächtigkeitsschwankungen
- durch unbekanntem Bohrfad und/oder Schichteinfall verfälschte Schichtmächtigkeiten

- Seismik:

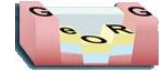
- technisch bedingte vertikale Reflektorenauflösung (für Industrieseismik etwa 25 m)
- durch die Post-Stackmigration bedingte Positionierungsprobleme der Reflektoren
- durch schlechtes Signal/Noise-Verhältnis verursachtes unklares Reflektorenbild
- im Zuge der Seismikinterpretation falsch zugeordnete Horizonte
- in der Seismik nicht erkannte Störungen, Unsicherheiten über den unteren/oberen Störungsabschluss

- technische Probleme vorinterpretierter Eingangsdaten (geologische Karten, Profilschnitte):

- Scanprobleme (verzerrte Papiervorlage, schlechte Bildqualität etc.)
- Georeferenzierungsprobleme (fehlendes Koordinatensystem, falsch oder unvollständig gesetzte Koordinatenangaben, Ungenauigkeiten bei der Umrechnung fremder Koordinatensysteme ins Arbeitskoordinatensystem)

Vorinterpretierte Eingangsdaten, wie geologische Karten, Schichtlagerungskarten, Mächtigkeitsverteilungen, Profilschnitte etc. unterlagen bei ihrer Erstellung der subjektiven Beurteilung des/der jeweiligen Bearbeiter. Sie repräsentieren bestenfalls den bei der Erstellung aktuellen Kenntnisstand. Dieser kann - je nach Alter - zwischenzeitlich weiter fortgeschrieben sein. Des Weiteren unterliegt die geologische Interpretation des Eingangsdatenbestands Änderungen in Hinblick auf tektonische und lithofaziell-genetische Konzepte.

Um mögliche Fehler gering zu halten, wurden die Eingangsdatensätze qualitativ evaluiert und für die Zwecke der 3D-Modellierung aufbereitet. (Siehe auch Kapitel 3.2)



3.5.11.2 Unsicherheiten im Modellierprozess

Ziel: Unsicherheitsfaktoren, die während der Modellierung auftreten

Kurzbeschreibung

Qualitative Beschreibung der Unsicherheitsfaktoren, die während der Modellierung auftreten

Beschreibung

Zu den Unsicherheiten der Eingangsdaten treten weitere Unsicherheiten durch bei der Modellierung getroffene Annahmen auf, z.B.:

- Horizonte:

- falsche Mächtigkeitsannahmen, nicht vorhersagbare engräumige Mächtigkeitsschwankungen
- Geometrische Extrapolation der Raumlage in Gebieten mit geringer Datendichte

- Störungen:

- Unsicherheiten bei der Korrelation von Fault sticks und/oder bei der Korrelation von Fault sticks mit Störungsspuren aus der Geologischen Karte oder Schichtlagerungskarten (s. Kap. 3.5.11.3)
- Unsicherheiten bei der relativen Alterszuordnung der Einzelstörungen

Die Raumlage für die in der Zeitdomäne modellierten Störungen und Horizonte wird wesentlich durch das für die Konvertierung genutzte Geschwindigkeitsmodell determiniert.

Die lateralen bzw. vertikalen Auflösungsgrenzen des geologischen 3D-Modells werden durch die Datendichte bestimmt (s. Kap. 3.5.9 Darstellung der Datendichte). In Abschnitten mit geringer Datendichte sind unzulässige Vereinfachungen und Fehlinterpretationen (z.B.: Horizontinterpolation über Störungsgrenzen hinweg) möglich. In Arealen mit großer Eingangsdatendichte, z.B.: in eng beprobten Erdölfeldern, ist die Datendichte wiederum häufig zu groß, um kleinräumige Mächtigkeitsschwankungen und tektonische Versätze im Modell darzustellen. Die Auflösungsgrenzen werden in diesem Fall durch die gewählte minimale Dreiecksgröße der triangulierten Horizonte und Störungen bestimmt.

Die genutzte Modellierungssoftware Gocad arbeitet bei der Erstellung von Flächen mit einem Interpolationsalgorithmus (DSI - Discrete Smooth Interpolation) der speziell für die Belange der geologischen 3D-Modellierung entwickelt wurde (Mallet 1992). Obwohl er sehr gute Ergebnisse liefert, produziert er, insbesondere in Gebieten mit geringer Belegpunktdichte, ungewollte numerische Artefakte wie das „Überschwingen“ von Flächen. Durch das entsprechende Setzen von Hilfsobjekten, bzw. Anwenden verschiedener gocadinterner Hilfswerkzeuge, kann der Modellierer solche interpolationsbedingte Artefakte minimieren, sie aber niemals komplett ausschließen.

Literaturhinweise

Caumon et al. (2009), Mallet (1992)





3.5.11.3 Störungskorrelationstests in der Schweiz

Ziel: Aufzeigen und qualitative Beurteilung von Fehlerquellen, die quantitativ nur schwer definierbar sind.

Kurzbeschreibung

Exemplarischer Test der Auswirkungen unterschiedlicher Interpretation des Störungsnetzwerkes im Sierentz-Allschwil Block

Eingangsdaten

Schweizer Teilmodell, Bohrungen, geologische Karten

Beschreibung

Eingangsdaten lassen für die Interpretation einer geologischen Situation oft mehrere Lösungen zu. Der Bearbeiter eines geologischen 3D-Modells muss sich bei der Erstellung einer geologischen Fläche (Horizont, Störung) immer für eine Lösung entscheiden. Diese Entscheidung unterliegt der subjektiven Beurteilung des Bearbeiters. Diese interpretationsbedingte Fehlerquelle ist in ihrer Gesamtheit nur schwer in numerischen Fehlerbetrachtungen zu fassen und würde oft den normalen Rahmen einer geologischen Modellierung sprengen.

Um auf diese Fehlerquelle hinzuweisen und um zumindest eine qualitative Fehlerabschätzung zu erhalten, wurde in einem Bereich des Schweizer Teilmodells ein Test zu dieser Problematik durchgeführt.

Das Testgebiet liegt zwischen Sierentz (F) und Basel (CH) im deutsch-französischen Grenzgebiet. Im unmittelbaren Testgebiet lagen nur Horizont-Belegpunkte aus reflexionsseismischen Untersuchungen vor. Die geologischen Karten aus Frankreich, Deutschland und der Schweiz lieferten zusätzliche Informationen zum Störungsmuster. Allerdings gibt es, abgesehen vom Isteiner Block und entlang des Rheins, keine oberflächlichen Aufschlüsse, bei denen Störungen dokumentiert sind. So sind auch praktisch alle eingezeichneten Störungen nur vermutet und variieren in der Interpretation teilweise von Karte zu Karte (Abb. 3.5.11.3-1).

Im Testbereich wurden zwei unterschiedliche Störungsmuster und je ein geologischer Horizont („Basis Froidefontaine-Formation“) in Abhängigkeit der Störungsmuster modelliert. Die Belegpunkte dienten während der Modellierung mit Gocad als „control points“. Der Interpolationsalgorithmus zur Horizonterstellung (DSI, Mallet 1992) versucht den Horizont möglichst den Belegpunkte anzunähern. In der Auswertung wurde dann der geometrische Unterschied der beiden Horizontvarianten untersucht.



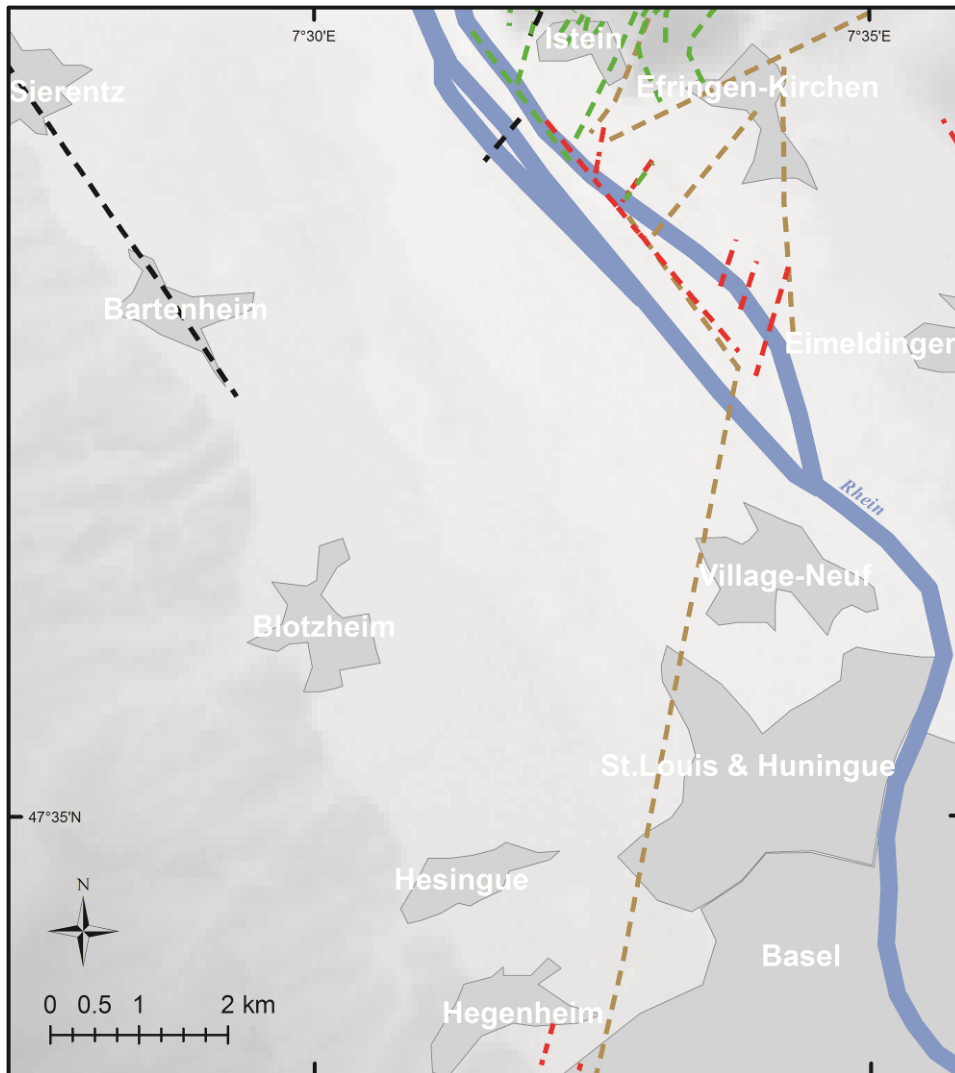
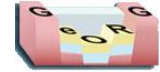


Abb. 3.5.11.3-1 Übersichtskarte des Testgebiets. Dargestellt sind Störungen, welche auf der tektonischen Karte Lössach (braun) bzw. den geologischen Karten Altkirch-Huningue (schwarz), Lössach (grün) und Basel (rot) eingezeichnet sind.

Fall A:

Eine NW streichende Grabenstruktur („Sierentz-Graben“) reicht von St. Louis (F) bis nördlich Sierentz und begrenzt den Istein-Block im Westen. Im SW wird der Graben durch die NNE streichende Allschwiler-Störungszone begrenzt. Zwischen Blotzheim (F) und Bartenheim (F) wird die südwestliche den Graben begrenzende Störung aufgesplittert und versetzt. Südöstlich von Bartenheim trennt eine Abschiebung den Sierentz Graben in einen nordwestlichen und einen südöstlichen Teilabschnitt (Abb. 3.5.11.3-2).



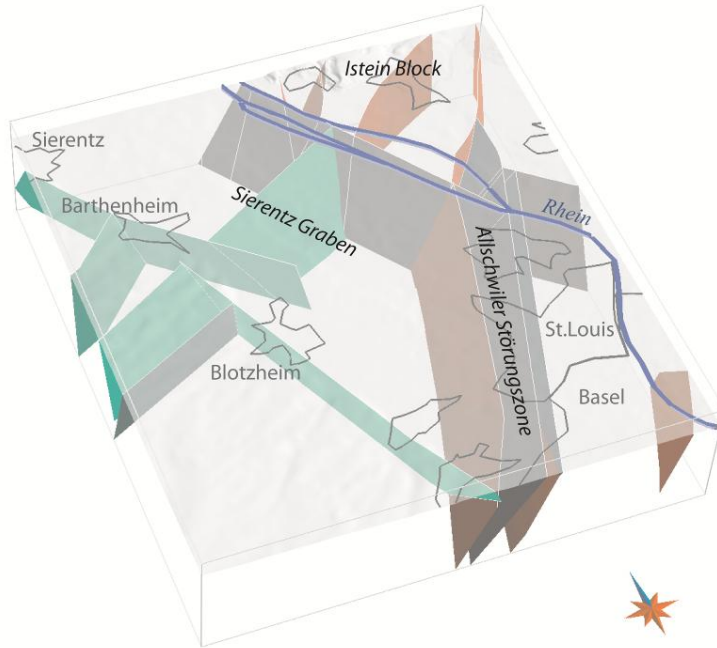


Abb. 3.5.11.3-2 Übersicht Fall A. Grüne Störungen wurden von Fall A zu Fall B verändert. Braune Störungen wurden nicht verändert. Modelldimensionen: ca. 10 km x 11 km x 2,3 km

Fall B:

Das Gebiet wird durch die NNE streichende Allschwiler-Störungszone im SW begrenzt. Zwischen Sierentz und Blotzheim wird das Gebiet von ENE streichende Graben- und Horststrukturen durchzogen, die von Ruppentswiler (F) kommend auf den Isteiner block zu laufen. Begrenzt werden die Graben- und Horststrukturen durch eine Abschiebung am SW-Rand des Istein-Blocks (Abb. 3.5.11.3-3).



Abb. 3.5.11.3-3 Übersicht Fall B. Grüne Störungen wurden von Fall A zu Fall B verändert. Braune Störungen wurden nicht verändert. Modelldimensionen: ca. 10 km x 11 km x 2,3 km



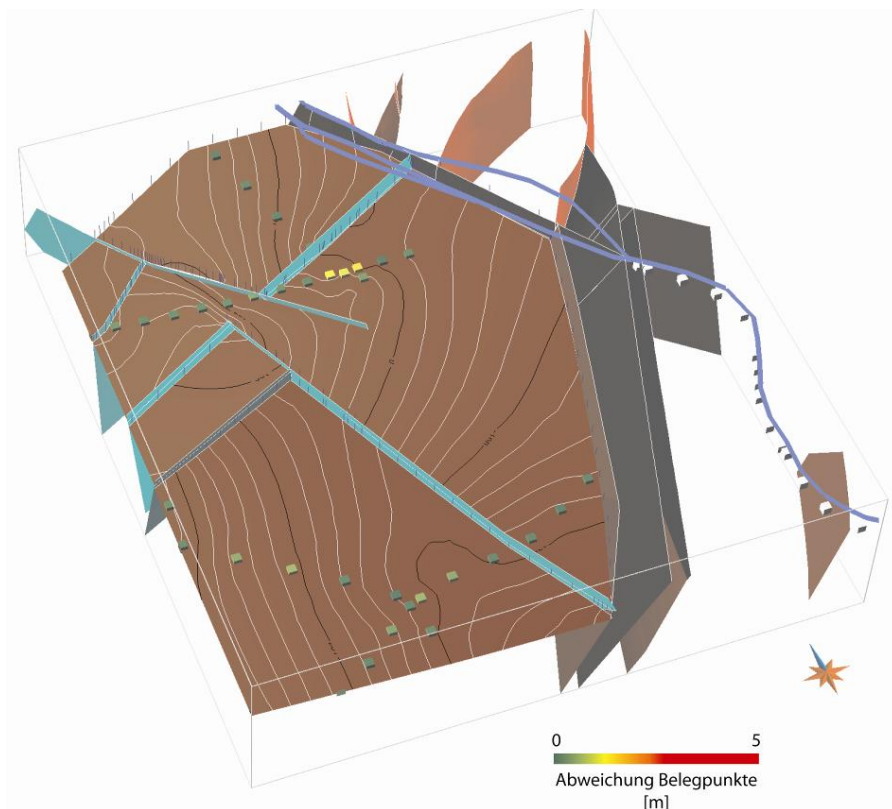


Abb. 3.5.11.3-4 Basis Froidefontaine-Formation- Fall A. Die Abweichung der Belegpunkte (Würfel, Herkunft: Reflexionsseismik) liegt unter 5 m.

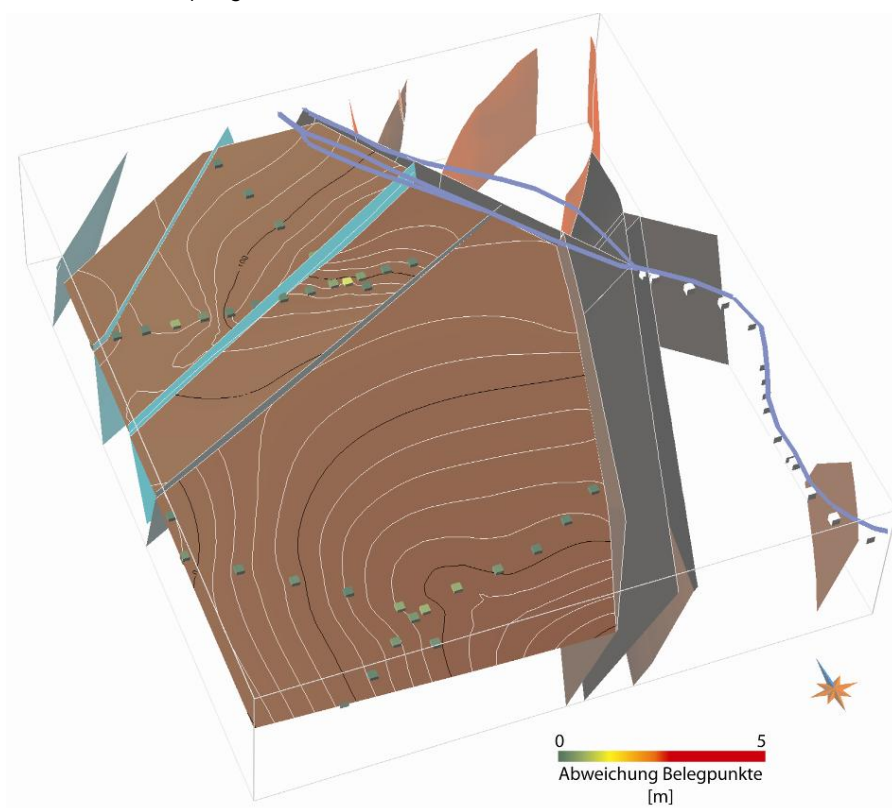


Abb. 3.5.11.3-5 Basis Froidefontaine-Formation - Fall B. Die Abweichung der Belegpunkte (Würfel, Herkunft: Reflexionsseismik) liegt unter 5 m.



Ergebnisse:

Für beide Fälle konnten die Horizont-Belegpunkte mit guter Passgenauigkeit in der jeweiligen Horizontvariante berücksichtigt werden. Die vorhandenen Abweichungen resultieren aus der geringen Belegpunktdichte im Verhältnis zur gewählten Auflösung für die Horizontgeometrie. (Abb. 3.5.11.3-4 und 3.5.11.3-5).

Um die Unterschiede zwischen den beiden Horizontvarianten zu visualisieren, wurde die vertikale Differenz berechnet. (Abb. 3.5.11.3-6) Die vertikale Differenz zwischen den modellierten Varianten für die „Basis Froidefontaine-Formation“ Fall A zu Fall B liegt, abgesehen von randlichen Artefakten, zwischen -145m und 75m. Für 83 Flächenprozent der modellierten Horizonte liegt die vertikale Abweichung von einander unter 25m. Wie an den Höhenlinien (Abb. 3.5.11.3-4 und Abb. 3.5.11.3-5) abzulesen ist, unterscheiden sich die beiden Lösungen auch in ihren Neigungsrichtungen. Zu Änderungen kommt es vor allem im NE, im Bereich des „Sierentz Grabens“ (Fall A). Während in Fall A der Horizont dort gegen E und ESE geneigt ist, dominieren in Fall B SE und SSE Richtungen. Allerdings liegen die Neigungswinkel hier generell unter 5°, nur in wenigen kleinen Bereichen werden maximal 11° erreicht.

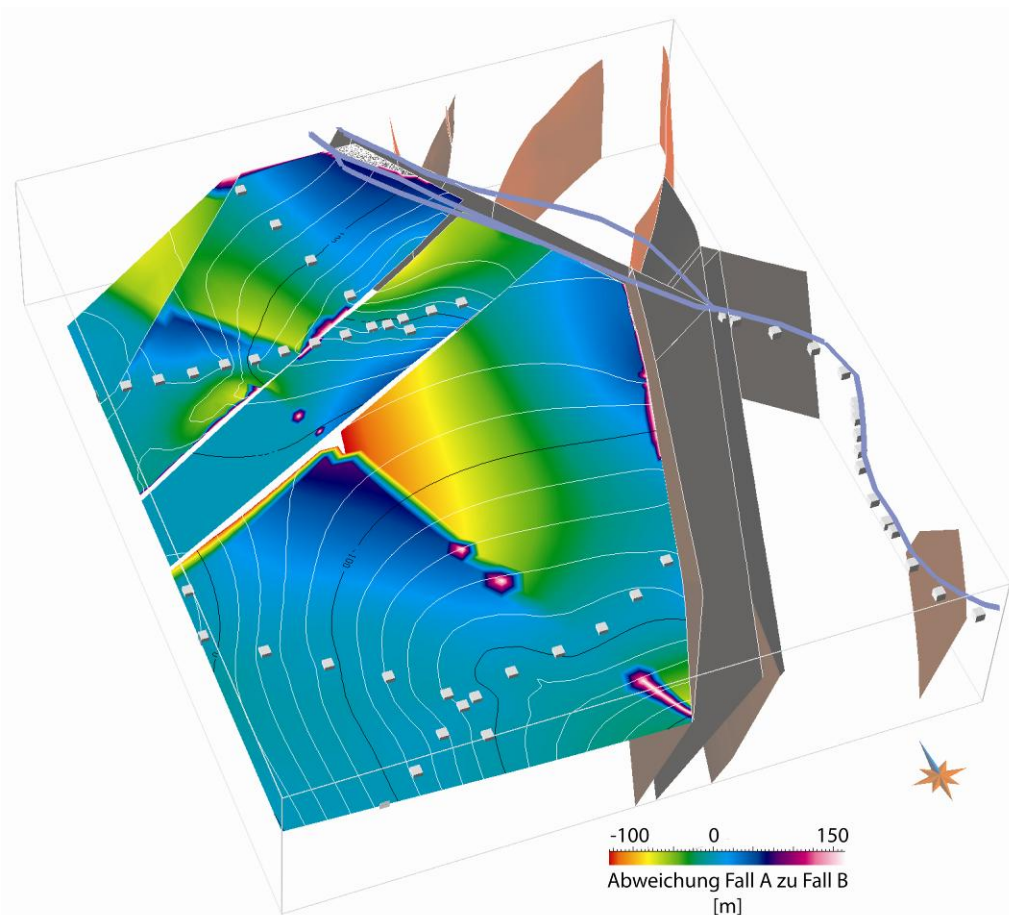
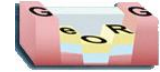


Abb. 3.5.11.3-6 Vertikale Differenz zwischen der Froidefontaine-Formation Fall A und Fall B. Dargestellt ist Fall B.

Abschließende Beurteilung der Ergebnisse:

Die gute Passgenauigkeit der Belegpunkte (Abb. 3.5.11.3-4 und 3.5.11.3-5), zeigt, dass beide Lösungen möglich sind.



Der größte Anteil der Abweichungen (82% Flächenprozent), bezüglich der absoluten Tiefenlagendifferenz zwischen den beiden Lösungen, liegt unter 25 m, was als eine relativ kleine Abweichung betrachtet werden kann. Auch der Auflösungsbereich für reflexionsseismische Interpretationen liegt bei ca. 25 m.

Die maximalen Differenzen finden sich vor allem im Umfeld von Störungen. Es zeigt sich, dass Störungen sowohl die Tiefenlage des Modellhorizontes, wie auch die Raumneigung dominant beeinflussen. Es ist davon auszugehen, dass mit einer stärkeren Neigung des zu modellierenden Horizontes auch die Unterschiede zwischen möglichen Lösungen größer werden.

Eine abschließende Entscheidung, welche der beiden Lösungen der Realität näher kommt, ist auf der Basis der vorliegenden Testergebnisse nicht möglich.

Ein wichtiger Aspekt, der in eine quantitative Betrachtung nur schwer einfließen kann, ist die Frage wie eine mögliche Lösung in das geologische Umfeld passt. Hier spielen Betrachtungen zur Entwicklungsgeschichte des Oberrheingrabens und seines Umfeldes, kinematische Untersuchungen an Einzelstörungen und das Zusammenwirken mit angrenzenden Strukturen eine Rolle.

Die im GeORG-Modell verwirklichte Lösung (Fall B) passt gut in den geologischen Kontext. Die ENE-streichenden Graben- und Horststrukturen können als Zweigstruktur einer Störungszone, welche aus dem Gebiet von Ferrette kommend nach NNE-streicht, aufgefasst werden. Auch wird der Istein-Block durch Graben- und Horststrukturen in ENE-Richtung durchzogen.

Literaturhinweise

Mallet (1992)



3.5.11.4 Nicht modellierte bzw. schematische Modellbereiche

Ziel: Abgrenzung nicht modellierter bzw. schematischer Modellbereiche

Kurzbeschreibung

Beschreibung nicht modellierter bzw. schematischer Modellbereiche

Beschreibung

In einigen Teilbereichen war es aufgrund der Datenlage bzw. der technischen Modellbeschränkungen (Auflösung) im Rahmen des GeORG- Projekts nicht oder nur schematisch möglich, den geologischen Aufbau zu modellieren.

Frankreich

Tafeljura

Der Tafeljura südlich des Dannemariebeckens grenzt sich durch eine nordfallende Abschiebungsbahn vom Oberrheingraben ab (nach Ustaszewski 2004, teilweise auch in Seismik). Südlich der Abschiebungsstruktur ist die Modellierung von Horizonten aufgrund fehlender Eingangsdaten (Seismik, Bohrungen etc.) nicht möglich.

Faltenjura

Der Grenzbereich zum Faltenjura südlich des Altkirch- und Sierentz-Allschwil-Blocks zeichnet sich durch grabenwärts einfallende, z.T. reaktivierte Abschiebungen und nach Süden bzw. Westen einfallende Überschiebungsbahnen des Faltenjuras aus, die auf der Grundlage der in der Seismik erkennbaren Strukturen und nach Ustaszewski (2004) schematisch in das geologische 3D-Modell integriert wurden. Die Modellierung der Horizonte endet aufgrund fehlender Eingangsdaten (Bohrungen, Seismik) nördlich der grabenwärts einfallenden Abschiebungsbahnen.

Baden-Württemberg

Lahr-Achern-Randschollen

Aufgrund der komplexen geologischen Struktur und fehlender Eingangsdaten war es im Bereich der Lahr-Achern-Randschollen nördlich von Friesenheim nicht möglich, ältere Horizonte als die Lockergesteinsbasis in das Modell zu integrieren.

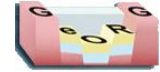
Kaiserstuhlgebiet

Im Kaiserstuhlgebiet fand eine schematische Abgrenzung magmatisch beeinflusster Bereiche (Magmatite + magmatisch modifizierte Sedimentkörper) statt. Aufgrund der Datenlage wurde innerhalb dieses Körpers keine weitere interne Differenzierung getroffen (s. Kap. 3.5.6).

Westliche Randschollen des Kandernblocks

Aufgrund der komplexen geologischen Struktur im Randschollenbereich und fehlender Eingangsdaten, konnten zwei Teilbereiche der westlichen Randschollen des Kandernblocks nördlich von Heitersheim bzw. nordwestlich von Bad Krozingen nur teilweise in das geologische 3D-Modell integriert werden. Während nördlich von Heitersheim die Lockergesteinsbasis und die Basis der Froidefontaine-Formation rekonstruiert werden konnten, beschränkte sich die Modellierung nordwestlich von Bad Krozingen auf die Lockergesteinsbasis.





Teilgebiet Schweiz:

Rheintalflexur:

Hier wurde ein Streifen von bis zu 750 m Breite nicht modelliert. Die flexurartige Verbiegung der geologischen Schichten wurde von einer intensiven kleinräumigen Bruchtektonik begleitet, die nicht gut und teilweise gar nicht durch Daten dokumentiert ist.

Landskron-Struktur:

Ihre Modellierung endet mit dem Horizont „Basis Unterjura“. Tiefer liegende Schichten wurden nur noch partiell modelliert.

Die Landskron-Struktur (Monokline) ist der flexurartige Übergang vom Bereich des Faltenjuras zum Oberrheingraben (südliche Begrenzung des ORG). Vergleichbar mit der Rheintalflexur, kam es auch hier zu einer kleinräumigen Bruchtektonik, die nur partiell bekannt ist.

Blauen-Falte:

Die Blauen-Falte wurde nur für die oberflächlich austreichenden Schichtglieder modelliert. Der „Top Haupttrogenstein“ Horizont ist die tiefste modellierte Einheit.

Die Blauen-Falte ist die nördlichste Struktur des Faltenjuras im Großraum Basel.

Die Modellierung beruht hauptsächlich auf den Profilen von Bitterli-Brunner in Della Valle (1981) und Laubscher (2005). Da zur Tiefe hin praktisch keine „harten“ Daten wie Bohrungen oder ähnliches vorhanden sind, ist die Modellierung der Blauen-Falte über dem Abscherhorizont nur als schematische Modellierung zu betrachten. Unterhalb des Abscherhorizonts fand keine Modellierung statt.

Literaturhinweise

Della Valle (1981), Laubscher (2005), Ustaszewski (2004)





3.6 Geothermische 3D-Modelle

Ziel: Erstellung eines geostatistischen 3D-Temperaturmodells für das innere GeORG-Projektgebiet, Erstellung eines konduktiven 3D-Temperaturmodells im Pilotgebiet Hydrogeologie

Kurzbeschreibung

Erstellung eines geostatistischen 3D-Temperaturmodells für das innere Projektgebiet auf der Datengrundlage von Bohrloch-Temperaturmessungen. Zusätzlich wurde im sogenannten „Pilotgebiet Hydrogeologie“ zwischen Rastatt und Landau ein konduktives 3D-Temperaturmodell auf Grundlage von Logauswertungen erstellt. Die Arbeiten wurden im Rahmen eines Werkvertrags durch das Unternehmen Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, Aachen, erstellt.

Eingangsdaten

Siehe Unterkapitel

Beschreibung

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Temperaturmodell erstellt:

- geostatistisches Modell für das gesamte Projektgebiet (federführend am LGRB erstellt). Die methodische Beschreibung erfolgt in Kapitel 3.6.1.
- konduktives Modell im „Pilotgebiet Hydrogeologie“ (Erstellt im Rahmen eines Werkvertrags durch das Unternehmen Geophysica). Die Methodik wird ausführlich in Kapitel 3.6.2 beschrieben.

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Teil 2 des Fachlich-technischen Abschlussberichts des Projekts:

- Ergebnisse des konduktiven Temperaturmodells: Kapitel 2.4.5.1
- Ergebnisse des geostatistischen 3D-Temperaturmodells: Kapitel 2.4.5.2
- Vergleich der Ergebnisse zwischen geostatistischem und konduktivem Temperaturmodell: Kapitel 2.4.5.3

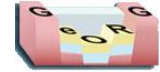
Kapitelverweise, Interne Links

Kapitel Datenbank Temperatur 3.2.6, Kapitel Zusammenfassung konduktives Temperaturmodell 3.6.2, Kapitel Geothermisches Potenzial im Oberrheingraben (FTA 2, 2.4)

Atlasblätter

1.1, 5.1.1 - 5.20





3.6.1 Geostatistische Temperaturmodellierung (*Geostatistical temperature modeling*)

Ziel: Erstellung eines 3D-Temperaturmodells für das gesamte Projektgebiet

Kurzbeschreibung

Übersicht über die Arbeitsschritte der geostatistischen Temperaturmodellierung

Eingangsdaten

Temperaturdaten aus der projektinternen Datenbank Hydrogeologie (*Temperature data*)

Beschreibung

Für das innere Projektgebiet wurde auf der Grundlage der in der projektinternen Datenbank Hydrogeologie gesammelten Temperaturdaten ein 3D-Temperaturmodell mit der Software GOCAD erstellt.

Grundidee: Die gemessenen Temperaturen erhöhen sich mit zunehmender Tiefe annähernd linear. Daher liegt es nahe für eine geostatistische Modellierung die Temperaturen in eine lineare Komponente und einen Residualanteil, der die Abweichung vom linearen Anteil angibt, aufzutrennen und zu analysieren. Aufbauend auf der Auswertung der linearen Komponente lässt sich ein einfaches A-Priorimodell berechnen. Die Abweichungen des A-Priorimodells von den tatsächlich gemessenen Temperaturen sind normalverteilt und lassen sich mit Hilfe eines Krigingverfahrens regionalisieren. Die Kombination beider Modelle führt zu einem Gesamtmodell, das einerseits die tatsächlich gemessenen Temperaturen wiedergibt, andererseits auch in gering beprobten Bereichen auf Grundlage des A-Priorimodells eine erste Temperaturprognose liefert.

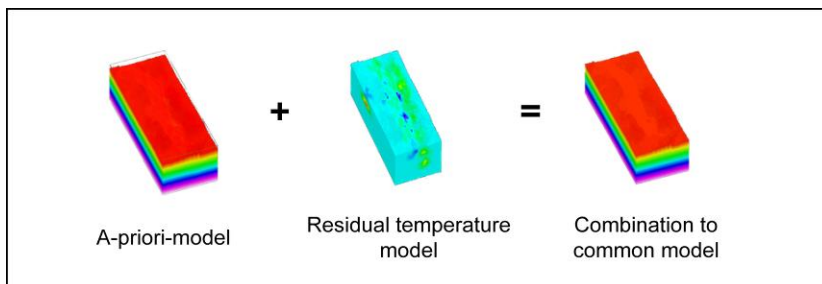


Abb. 3.6.1-1: Komponenten des geostatistischen Temperaturmodells

Workflow Modellierung (s. Abb. 3.6.1-2):

1. Vorbereitende Arbeitsschritte (*Data preparation*): beinhaltet die Behandlung von Temperaturdaten aus unterschiedlichen Messmethoden, deren Einstufung in Qualitätsklassen und die Analyse und Berechnung von Bodentemperaturen
2. Modellaufbau (*Model generation & consistency check of temperature data*): beschreibt den Aufbau des Voxetmodells in der Software Gocad, den Import der Temperaturdatensätze, die Gridparametrisierung sowie die gradientenbasierte Plausibilitätsprüfung
3. Erstellung des A-Priorimodells (*A-Priori-model*): diskutiert die Regressionsanalyse der Temperaturdaten, den sich daraus ergebenden Temperaturgradienten und behandelt den Umgang mit dem Topographieeffekt
4. Erstellung des Residualtemperaturmodells (*Residual temperature model*): zeigt die Abstände zwischen dem A-Priorimodell und den tatsächlich gemessenen Temperaturdaten und erläutert die Krigingmethode zur Regionalisierung des Residualtemperaturmodells



5. Kombination zum Gesamttemperaturmodell (*Combination to common model*): Addition des A-Priori- und des Residualtemperaturmodells
6. Auswertung des Gesamttemperaturmodells und Export

Ergebnis: Geostatistisches Temperaturmodell (*Geostatistical temperature model*)

3.6.1-1 Geostatistical temperature modeling

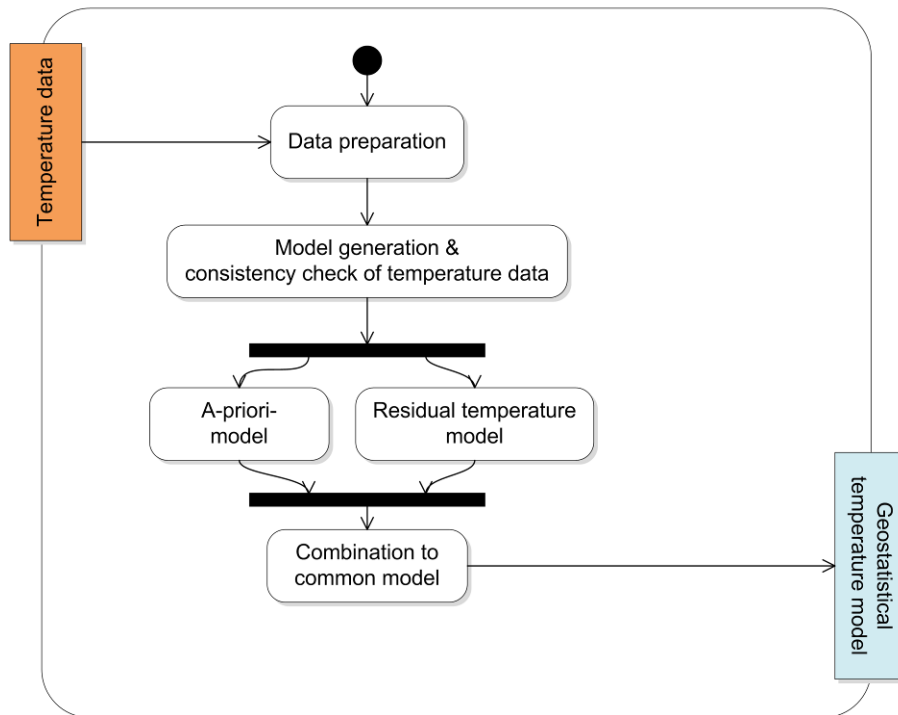
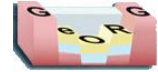


Abb. 3.6.1-2: UML-Diagramm Workflow: Geostatistical temperature modeling

Literaturhinweise

Arbeiten am BRGM: Bonté et al. (2010), Carré (2011), Abschätzung des geothermischen Potenzials in Hessen mit einem anderen A-Priorimodell: Arndt et al. (2011), Bär et al. (2011)



3.6.1.1 Vorbereitende Arbeitsschritte

Ziel: Homogenisierung von Temperaturmessungen und Einteilung in Qualitätsklassen, Analyse von Bodentemperaturen

Kurzbeschreibung

Aufbereitung von Temperaturmessungen sowie korrekturmethodebasierte Einteilung in verschiedene Qualitätsklassen; Analyse der Zusammenhänge zwischen Bodentemperatur und Geländehöhe

Eingangsdaten

Temperaturen aus verschiedenen Datenquellen

Beschreibung

Beinhaltet die Behandlung von Temperaturdaten aus unterschiedlichen Messmethoden, deren Einstufung in Qualitätsklassen und die Analyse und Berechnung von Bodentemperaturen.



3.6.1.1.1 Datentypen und deren Aufbereitung

Ziel: Homogener Temperaturdatensatz

Kurzbeschreibung

Beschreibung der einzelnen Messmethoden und der Aufbereitung des Temperaturdatensatzes

Eingangsdaten

Temperaturdatensatz aus der Datenbank (fachlich, also nach der Filterung von doppelten Daten in der Datenbank)

Beschreibung

Messmethoden:

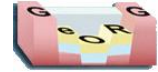
- Log (ungestört): sehr genaue Temperaturdaten durch lange Stillstandzeit nach der Bohrung (Temperaturen im Gleichgewicht) und Messung beim Einfahren der Sonde (möglichst geringe Störeinflüsse durch den Messvorgang), Messunsicherheit i.d.R. +/- 0,1 K
- Log (gestört): fehlerbehaftet durch z.B. Zirkulation im Bohrloch, große Messunsicherheit wenn keine Möglichkeit der Korrektur vorhanden
- BHT-Wert (Bottom-Hole-Temperature): Messung erfolgt meist direkt nach Ende der Bohrarbeiten am Bohrlochtiefsten, daher sind die Temperaturwerte stark gestört (Spülung) und unterschätzen die tatsächlichen Formationstemperaturen um 10-15 °C (Denim 1989). Es existieren eine Reihe unterschiedlicher Korrekturmethode (Zusammenstellungen und Methodenvergleiche u.a. in Deming 1989, Goutorbe et al. 2007), die sich sowohl im methodischen Ansatz als auch nach den zur Verfügung stehenden Zusatzinformationen für eine mögliche Korrektur (Stillstandzeit, Rohrdurchmesser etc.) unterscheiden.
- Hydrochemische Analyse: Werte sind unkorrigiert, aufgrund der Messmethodik von recht hoher Qualität
- Fördertest etc.: unterschiedliche Messmethoden im Zuge von Fördertests, Open-Hole-Tests etc., Messgenauigkeit unterschiedlich

Tab. 3.6.1.1.1-1: Anzahl der Messungen nach Messmethode

Messmethoden	Anzahl Messungen	Anzahl Bohrungen
Log (ungestört)	1199	148
BHT (Bottom-Hole-Temperature)	980	570
Log (gestört)	383	76
unbekannt (evtl. Log)	336	14
Production Test, Drill Stem Test	179	95
Hydrochemische Analyse	29	22
Test Casing (Open Hole Test)	23	10
unbekannt (evtl. Gleichgewichtswert)	16	4

834 Bohrungen mit 3145 Messungen (aus einigen Bohrungen liegen Temperaturwerte aus unterschiedlichen Messmethoden vor)





Aufbereitung des Datensatzes

- Aussortieren von doppelt oder mehrfach vorhandenen Daten (3.2.6.1.2)
- gradientenbasierte Plausibilitätsprüfung (3.6.1.2.3)
- alle Messungen mit Qualität 0,14 werden im Umkreis der Messungen mit Qualität 1 aussortiert (Puffer um den Messpunkt: horizontal 2 km Durchmesser, vertikal +/- 300 m). Innerhalb dieser Pufferzone werden die Messungen mit Qualität 0,14 nicht berücksichtigt.

Literaturhinweise

Kühne (2006), Carré (2011), Clauser et al. (2002), Deming (1989), Goutorbe et al. (2007)

Kapitelverweise

Kapitel Eingangsdaten Datenbank 3.2.6.1.2



3.6.1.1.2 Wichtung der Eingangsdaten

Ziel: Klassifizierung der Temperaturdaten nach der Mess- und/oder Korrekturmethode (Qualität der Temperaturdaten)

Kurzbeschreibung

Klassifizierung der unterschiedlichen Mess- und Korrekturmethoden für die Temperaturmodellierung unter Berücksichtigung bestehender Klassifizierungen aus anderen Projekten/Modellierungen. Die Wichtung der Daten spielt in der Modellierung eine wichtige Rolle, da der Einfluss der einzelnen Daten auf den „Wirkungsraum“/Range im Kriging-Prozess von der Messqualität der Temperaturdaten abhängig ist.

Eingangsdaten

Temperaturdaten der Projektpartner

Beschreibung

Temperaturdaten werden mit unterschiedlichen Messmethoden erhoben. Die Qualität und die Messgenauigkeit hängt stark von der jeweiligen Messmethode ab (siehe Kapitel Datentypen 3.6.1.1.1). Für die Modellierung ist es sinnvoll, die Daten in Qualitätskategorien zu unterteilen, um so Temperaturdaten mit einer höheren Genauigkeit einen größeren Einfluss auf die Interpolation zu erlauben.

Die Grundlage für die in diesem Projekt verwendeten Qualitätskategorien ist der Qualitätsindex nach Clauser et al. (2002), der auch in der Modellierung der Untergrundtemperaturen im Projekt „Hessen3D“ verwendet wurde. Da in diesem Projekt unterschiedlichste Temperaturdaten aus verschiedenen Ländern eingeflossen sind (siehe Kapitel Temperatur im Kapitel Hydrogeologische Datenbank, 3.2.6.1.2), musste dieser Qualitätsindex an den vorliegenden Datensatz angepasst bzw. um zusätzliche Messmethoden/Korrekturmethoden erweitert werden.

Die Temperaturdaten aus Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz lassen sich zum Großteil in das Schema von Clauser et al. (2002) einordnen, da sie - wie die dort verwendeten Daten - aus dem Fachinformationssystem Geophysik (FIS-GP, Kühne (2006)) stammen (siehe Kapitel Datentypen).

Die französischen Temperaturdaten sind im Rahmen der Arbeit von Carré (2011) mit einer 3-stufigen Einteilung kategorisiert worden. Die Temperaturdaten aus der Schweiz wurden ohne Qualitätsklassifizierung geliefert.

Die unterschiedlichen bestehenden Qualitätskategorien wurden harmonisiert und in eine einheitliche Klassifizierung überführt.

Tabelle 3.6.1.1.2-1 führt die Qualitätskategorien auf. Dargestellt sind die Kategorien der Messmethoden wie sie in den Arbeiten von Carré (2011) und Clauser et al. (2002) verwendet wurden sowie die Kategorisierung wie sie im GeORG-Projekt umgesetzt wurde.





Tab. 3.6.1.1.2-1: Unterschiedliche Mess- und Korrekturarten und deren Qualitätskategorien

Messmethoden	Qualität		
	Carré 2011	Clauser et al. 2002	Projekt GeORG
BHT - Korrektur: Lachenbruch&Brewer	-	0,63	0,63
BHT - mindestens zwei Temperatur-messungen in gleicher Teufe, Korrektur: Zylinderquellenansatz	-	0,63	0,63
BHT - eine Temperaturmessung und bekannte Zeit seit Ende der Zirkulation oder Zeit und Radius bekannt	-	0,35	0,35
BHT - zwei Temperaturmessungen in gleicher Teufe, Korrektur: Hornerplot- Methode	-	-	0,49
BHT - Korrektur: statistische Methode (AAPG, Gable, Maget)	3	-	0,14
BHT - eine Temperaturmessung und bekannter Radius oder Zeit und Radius unbekannt	-	0,14	0,14
ungestörtes Log	-	1	1
gestörtes Log	-	-	0,2
gestörtes Log, Korrektur: AAPG	3	-	0,2
gestörtes Log (BRGM), Korrektur: unbekannt	4	-	0,2
Log, BRGM, Qualität: unbekannt	-	-	0,2
DST/ Production Test	2	0,7	0,7
Hydrochemische Analyse	-	-	0,7
Kurzpumpversuch	-	-	0,7
Production Test	-	-	0,7
Schöpfversuch	-	-	0,7
RFT, Korrektur: AAPG	3	-	0,14
RFT, Korrektur: unbekannt	2	-	0,14
Test casing (open hole), BRGM	1-4	-	0,14-0,7
EQU (equilibrium, Gleichgewichtswert)	1	-	1
EXT (extrapoliert)	1	0,2	0,7
Messmethode unbekannt (Werte aus Literatur)	-	-	0,2

(BHT: Bottom Hole Temperature, RFT: Repeated Formation Test)

Zur Umsetzung des Qualitätsindex in der Modellierung siehe Kapitel 3.6.1.3.1 und 3.6.1.4.2.

Abbildung 3.6.1.1.2-1 gibt einen Überblick über die Verteilung der Temperaturwerte auf die verwendeten Qualitätskategorien. Die hohen prozentualen Anteile der Kategorien 0,2 (32,4 % der Werte) und 1 (38,6 % der Werte) lassen sich dadurch erklären, dass in diese Kategorien v.a. Logwerte fallen, die oft in geringem vertikalem Abstand innerhalb des Bohrlochs gemessen werden.



Number and quality of temperature data

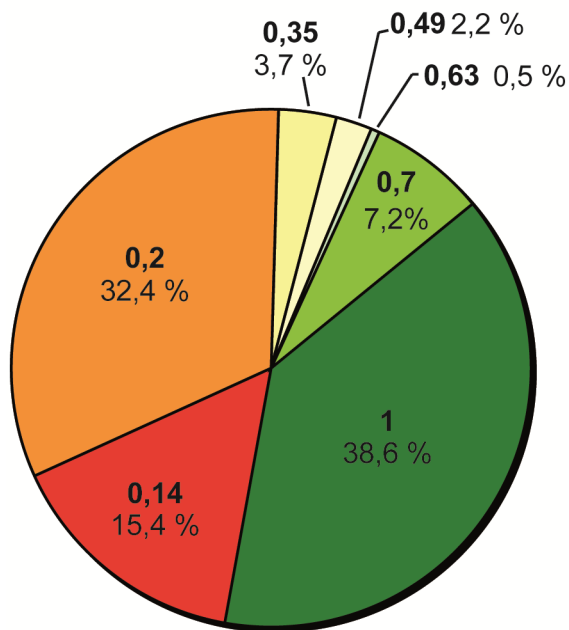


Abb. 3.6.1.1.2-1: Temperaturwerte: Anzahl der Temperaturmessungen und Datenqualität.

Literaturhinweise

Clauser et al. (2002), Carré (2011), Kühne (2006)

Kapitelverweise

3.6.1.3.1, 3.6.1.4.2





3.6.1.1.3 Berechnung von Bodentemperaturen

Ziel: Erstellung eines flächenhaften Datensatzes (Raster) mit Bodentemperaturen als Eingangsdatensatz für die Temperaturmodellierung

Kurzbeschreibung

Durchschnittliche mittlere Jahrestemperaturen werden unter Berücksichtigung des Topographieeffekts flächenhaft für das Projektgebiet interpoliert

Eingangsdaten

Durchschnittliche mittlere Jahrestemperaturen der Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die klimatische Normalperiode 1961-1990 (Datensatz ist frei verfügbar), digitales Höhenmodell (SRTM, 77m)

Beschreibung

- Download Datensatz DWD (langjährige Mitteltemperaturen in 2m über dem Erdboden an Stationen des DWD für die klimatische Normalperiode 1960-1991) als Excel-Tabelle für Bundesländer Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Saarland (99 Messwerte), keine Daten vorhanden für die französischen und Schweizer Bereiche im Projektgebiet
- Umwandlung der Koordinaten der Messstationen in GK3
- Reduzierung des Datensatzes auf die Fläche des Projektgebiets incl. 25 km Puffer
- Datenspanne der Oberflächentemperaturen: 3,3 °C (Wetterwarte Feldberg) bis 10,6 °C (Station Heidelberg)
- Regressionsanalyse Temperatur/Höhe m NN
- Interpolation Temperaturwerte mit dem Ergebnis der Regressionsanalyse unter Verwendung des SRTM-Höhenmodells
- Addition von 1 K auf die interpolierten Temperaturwerte (mittlere Jahrestemperatur der Bodenoberfläche kann je nach Bodenbeschaffenheit und Klima um 2-3 K über der mittleren Jahrestemperatur der Luft liegen (Smerdon et al. 2006), die Addition um 1 K stellt eine konservative Näherung dar (Geophysica 2012))
- Speicherung des Datensatzes im Format XY zum Import in Gocad

Literaturhinweise, Externe Links

Smerdon et al. (2006), Geophysica (2012)
www.dwd.de





3.6.1.2 Modellaufbau

Ziel: Gridmodell mit entsprechender Temperatureingangsdatenparametrisierung

Kurzbeschreibung

Übersicht über die Eigenschaften des Gridmodells als Grundlage für die geostatistische Temperaturmodellierung

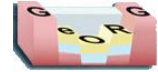
Eingangsdaten

Temperaturmessungen als Ascii-Datsätze

Beschreibung

Beschreibt den Aufbau des Voxetmodells in der Software Gocad, den Import der Temperaturdatensätze, die Gridparametrisierung sowie die gradientenbasierte Plausibilitätsprüfung.





3.6.1.2.1 Aufbau des Voxetmodells

Ziel: Aufbau eines Gridmodells als Grundlage für die geostatistische Temperaturmodellierung in der Software Gocad

Kurzbeschreibung

Aufbau eines Gocadgrids mit einer Zellgröße von 500m (lateral) und 19m (vertikal). Insgesamt beinhaltet das Grid 160 616 500 Zellen

Beschreibung

Eckdaten des Modells:

- Koordinatenursprung: 3299696 5265938.6 -8000
- u-step: 188.8 463 0 (Rasterweite lateral: 500m)
- v-step: 463 188.8 0 (Rasterweite lateral: 500m)
- w-step: 0 0 10 (Rasterweite vertikal: 10m)
- nu u: 638
- nu v: 265
- nu w: 950
- nu ges: 160 616 500

Parametrisierung des Modells mit den Geländehöhen Z_{DEM} aus dem DEM.

Unterteilung in zwei Regionen über und unter der Geländeoberfläche. Die Temperaturmodellierung findet ausschließlich im unteren Modellteil statt.





3.6.1.2.2 Datenimport und Gridparametrisierung

Ziel: Import der Temperaturdatensätze und Gridparametrisierung

Kurzbeschreibung

Import von Temperaturdatensätzen aus der projektinternen Datenbank in Gocad und nach Qualität getrennte Parametrisierung des Voxetmodells

Eingangsdaten

Temperaturmessungen als Ascii-Datensätze nach Qualität separiert

Beschreibung

- Temperaturdaten aus Bohrlochmessungen: Vor dem Import in Gocad Ergänzung der Temperaturdatensätze um die Bodentemperaturen an der Geländeoberfläche. Nach Datenqualität getrennter Import als Liniendatensätze im Ascii-Format mit folgenden Attributen: name, x [GK3], y [GK3], z [mNN], temp [°C], qualitaet.

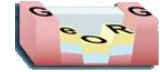
- nach Datenqualität getrennte Parametrisierung des Temperaturgrids mit: Temperaturdaten aus Bohrlochmessungen Voxet - Geostatistics - Assign Data to Cell (Assign Method: Arithmetic Mean)

Mit Hilfe dieser Parametrisierungsmethode werden alle von den Liniendatensätzen berührten Voxel mit den entsprechenden Temperaturdaten parametrisiert. Bei Messintervallen größer 10m werden die Temperaturwerte automatisch linear interpoliert. Fallen in eine Zelle mehrere Temperaturwerte, werden diese arithmetisch gemittelt.

- für eine gemeinsame Analyse aller Temperaturen aus Bohrlochmessungen wird ein Gesamtdatensatz erzeugt. Ist eine Gridzelle mit mehreren Messwerten unterschiedlicher Qualität parametrisiert, wurde die Messung mit der jeweils höchsten Qualität für den Temperaturgesamtdatensatz benutzt.

- Bodentemperaturen $Temp_{DEM}$: Berechnung auf Grundlage der Geländehöhen mit Hilfe der in Kap. 3.6.1.1.3 ermittelten Formel direkt im Temperaturgrid.





3.6.1.2.3 Gradientenbasierte Plausibilitätsprüfung

Ziel: Detektierung und Bereinigung von Eingangstemperaturdatensätzen mit unplausiblen Temperaturgradienten

Kurzbeschreibung

Berechnung des vertikalen Temperaturgradienten und Aussortieren von unplausiblen Datensätzen

Eingangsdaten

mit Eingangstemperaturen parametrisiertes Voxet

Beschreibung

Die Temperaturdaten aus Bohrlochmessungen wurden zunächst mit Hilfe der berechneten Temperaturgradienten einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Negative Temperaturgradienten sowie Gradienten größer 15 K/100 m (maximale bekannte positive geothermische Anomalie im ORG in Landau) wurden im Gridmodell separiert und händisch überprüft. Häufige Quellen unplausibler Datensätze waren neben Mess- und Eingabefehlern auch vertikale Grundwasserbewegungen in Grundwassermessstellen. Diese Datensätze wurden wenn möglich bereinigt oder entfernt. Weitere Probleme traten bei Mehrfachparametrisierungen von benachbarten Gridzellen durch mehrere Datensätze unterschiedlicher Messtiefe auf. Diese Temperaturwerte wurden aus dem Gridmodell entfernt.

Berechnung Temperaturgradient: Voxet - Compute - Compute Delta (Axis W == vertical, Grid direction: inverse)





3.6.1.3 Erstellung des A-Priorimodells

Ziel: A-Priorimodell als Grundlage für das geostatistische Temperaturmodell

Kurzbeschreibung

Diskutiert die Regressionsanalyse der Temperaturdaten, den sich daraus ergebenden Temperaturgradienten und behandelt den Umgang mit dem Topographieeffekt

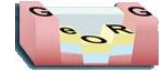
Eingangsdaten

gradientenplausibilisiertes Temperaturgrid

Beschreibung

Diskutiert die Regressionsanalyse der Temperaturdaten, den sich daraus ergebenden Temperaturgradienten und behandelt den Umgang mit dem Topographieeffekt





3.6.1.3.1 Regressionsanalyse der Temperaturdaten

Ziel: Ermittlung eines mittleren Temperaturgradienten als Grundlage für die Parametrisierung des A-Priorimodells

Kurzbeschreibung

Regressionsanalyse mit Polynomen verschiedener Ordnung zur Bestimmung eines mittleren Temperaturgradienten

Eingangsdaten

gradientenplausibilisiertes Temperaturgrid

Beschreibung

Für die Bestimmung des mittleren Temperaturgradienten wurden die Temperaturen sowohl getrennt nach Qualität als auch gemeinsam einer Regressionsanalyse unterzogen. Neben linearen Polynomen wurden auch Polynome höherer Ordnung getestet, ohne jedoch einen signifikant bessere Anpassung des Regressionsmodells zu erreichen.

Die Regressionsanalyse lieferte folgende Ergebnisse:

Tab. 3.6.1.3.1-1: Temperaturgradienten und Korrelationskoeffizienten getrennt nach Datenqualität

Qualität	1.0	0.7	0.63	0.49	0.35	0.2	0.14	gesamt
Temperatur-gradient K/100 m	4.5	4.7	4.1	5.3	4.4	4.0	4.3	4.5
Korrelations-koeffizient	-0.92	-0.79	-0.94	-0.93	-0.82	-0.88	-0.8	-0.9

Die Tiefenabhängigkeit der aller gemessenen Temperaturwerte und die korrespondierende Regressionsgerade sind in Abb. 3.6.1.3.1-1 dargestellt. Je nach Datenqualität treten unterschiedliche hohe Temperaturgradienten zwischen 4,0 K/100 m und 5,3 K/100 m auf. Diese Unterschiede begründen sich in den verschiedenen Korrekturmethode der Temperaturen. Die Korrelation zwischen der Tiefe und den Temperaturen liegt zwischen -0.79 und -0.94 generell hoch.

Für die weitere Modellierung wurde ein durchschnittlicher Temperaturgradient von 4,5 K/100 m benutzt, da dieser sowohl in der Klasse der höchsten Datenqualität, als auch in der Analyse aller Temperaturdaten auftritt.

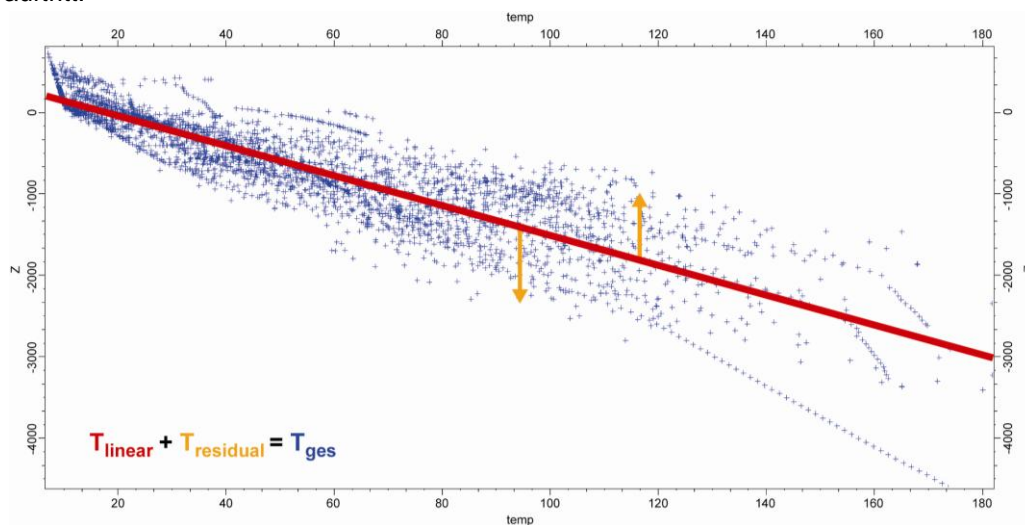


Abb. 3.6.1.3.1-1: Temperature-depth-relationship of all input data sets and its regression line



3.6.1.3.2 Topographieeffekt

Ziel: Analyse des Topographieeffekts und entsprechende Anpassung des A-Priorimodells

Kurzbeschreibung

Analyse des Einfluss der Geländetopographie auf das A-Priorimodell, gradientgesteuerte Anpassung das A-Priorimodells, sodass ab -2110m NN der Topographieeffekt nicht mehr auftritt

Eingangsdaten

gradientenplausibilisiertes Temperaturgrid

Beschreibung

Die Geländemorphologie hat einen wesentlichen Einfluss auf den Temperaturgradienten. Messungen in Tunnelbauten und theoretische Wärmeflussmodellierungen haben ergeben, dass im Bereich von Bergen geringere Temperaturgradienten auftreten als in den benachbarten Taleinschnitten (siehe Abb. 3.6.1.3.2-1)

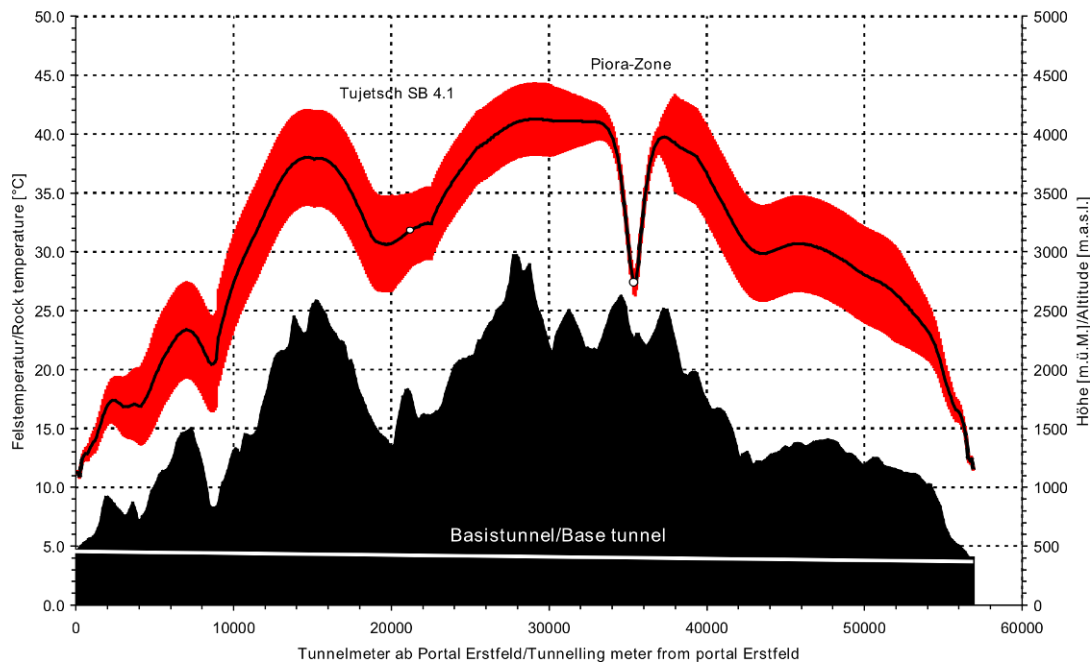


Abb. 3.6.1.3.2-1: Prognose der ursprünglichen Felstemperatur entlang der Achse des Gotthard-Basistunnels. Dargestellt ist neben der Topographie der abgeschätzte Fehler in Form eines Fehlerbalkens. Weiter sind als weiße Punkte die einzigen damals vorhandenen Messpunkte verzeichnet (aus: Busslinger & Rybach 1999)

Dadurch heben sich topographiebedingte Temperaturunterschiede ab einer gewissen Tiefe auf. Dieser Effekt ist bei den großen relativen Höhenunterschieden zwischen der Talsohle des Oberrheingrabens (bei durchschnittlich +150 m NN) und den benachbarten Mittelgebirgshöhen des Schwarzwalds (Höhen bis +1495 m NN), Odenwalds und der Vogesen essentiell. Für eine Abschätzung der Tiefe, ab der keine topographiebedingten Unterschiede mehr auftreten, wurden zwei theoretische Temperaturpfade für a) die Temperatur im Oberrheingraben ($Z = 150$ m NN, $Temp_{DEM} = 4,3$ °C, Temperaturgradient = 3 K/100 m) und b) die Temperatur unterhalb des Feldbergs ($Z = 1500$ m NN, $Temp_{DEM} = 10,9$ °C, Temperaturgradient = 4,5 K/100 m) (siehe Abb. 3.6.1.3.2-2).

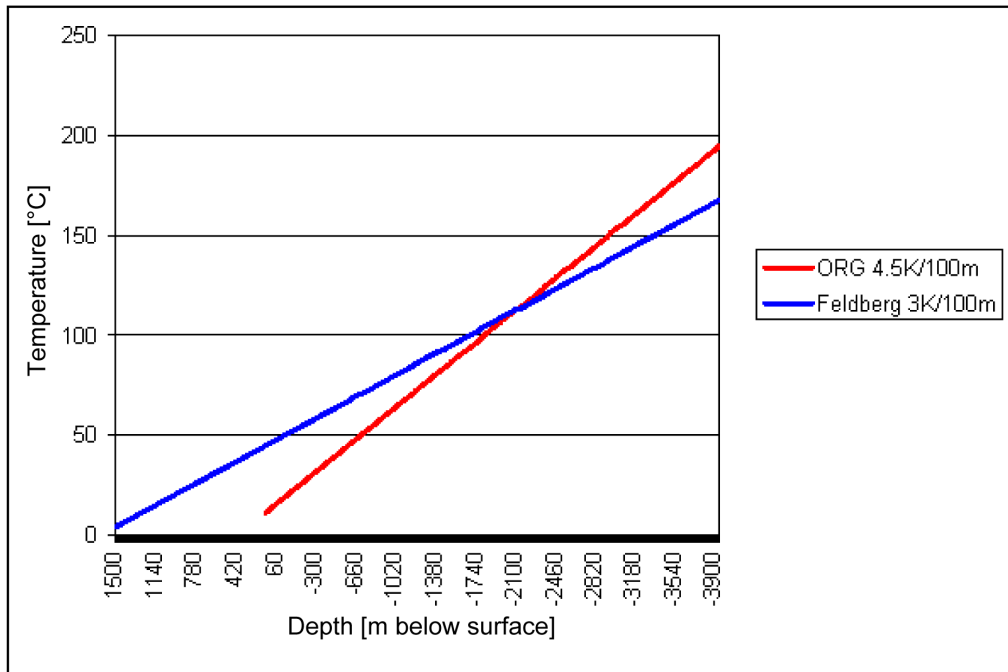
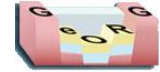


Abb. 3.6.1.3.2-2: Hypothetical temperature paths for the subsurface situation of the Upper Rhine Valley and temperatures beneath the Feldberg (highest mountain of the Black Forest). Temperature paths intersect at a depth of -2110 m NN and a temperature of 113 °C. Beneath this depth topographic effects don't influence temperatures anymore.

Die beiden Temperaturpfade schneiden sich bei einer Tiefe von -2110 m NN und einer Temperatur von 113 °C. Ab dieser Tiefe ist kein Topographieeffekt mehr zu erwarten.

Um die allmähliche Abschwächung des Topographieeffekts im Modell nachzubilden, wurden für Gridzellen höher -2210 m NN von der Geländehöhe abhängige Temperaturgradienten berechnet:

$$\text{Temperaturgradient}_{>-2210\text{mNN}} = (113 \text{ °C} - \text{Temp}_{\text{DEM}}) / (-2110 \text{ m NN} - Z_{\text{DEM}})$$

$$\text{Temperaturgradient}_{<-2210\text{mNN}} = 4.5 \text{ K/100 m}$$

Abbildung 3.6.1.3.2-3a zeigt die tiefenabhängige Temperaturzunahme ohne Reliefunterschiede. Die Isothermen verlaufen horizontal und haben gleiche Abstände. Die Abbildung 3.6.1.3.2-3b zeigt das Temperaturfeld mit gleichbleibendem Topographieeffekt. Die Temperaturgradienten liegen topographieunabhängig bei 4,5 K/100 m. Die Isothermen bilden bis zur unteren Modellbegrenzung die Topographie ohne Abschwächung ab. Während bei Abbildung c) die Temperaturgradienten bis in eine Tiefe von -2110 m NN topographieabhängig schwanken. Die Isothermen sind im Talbereich enger geschart als unter den Bergen. Die Isothermen bilden im oberen Teil die Topographie ab. Deren Einfluss schwächt sich jedoch mit zunehmender Tiefe ab und verliert sich im unteren Modellteil vollständig. Dieses A-Priori-Temperaturmodell wurde für die weitere Modellierung benutzt.



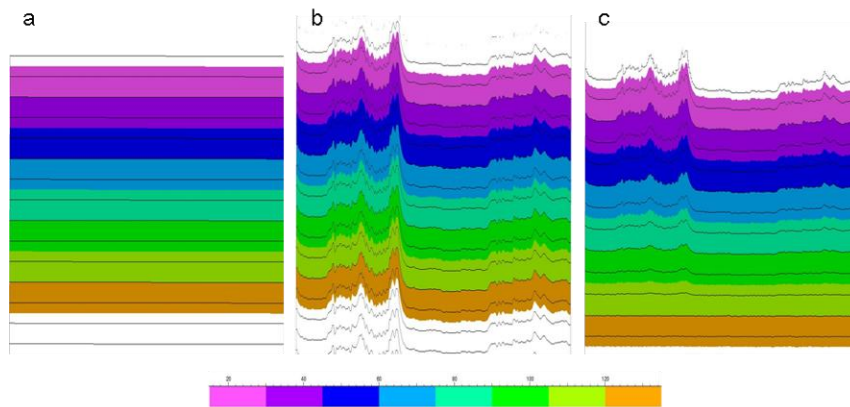
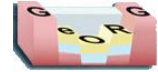


Abb. 3.6.1.3.2-3: Distribution of subsurface temperatures a) temperature field without topographic effect; b) temperature field with constant topographic effect and temperature gradients; c) temperature field with varying temperature gradients depending on topographic position

Literaturhinweise

Powell et al. (1988), Busslinger & Rybach (1999), Signorelli (1999)



3.6.1.4 Erstellung des Residualtemperaturmodells

Eingangsdaten

gradientenplausibilisiertes Temperaturgrid, A-Prioritemperaturmodell

Beschreibung

Zeigt die Abstände zwischen dem A-Priorimodell und den tatsächlich gemessenen Temperaturdaten und erläutert die Krigingmethode zur Regionalisierung des Residualtemperaturmodells



3.6.1.4.1 Analyse der Residualtemperaturen

Ziel: Berechnung und Variogrammanalyse der Residualtemperaturen

Kurzbeschreibung

Berechnung der Unterschiede zwischen dem A-Prioritemperaturmodell und den tatsächlich gemessenen Eingangstemperaturen; Variogrammanalyse und Adaption eines Variogrammmodells als Grundlage für die Regionalisierung

Eingangsdaten

gradientenplausibilisiertes Temperaturgrid, A-Prioritemperaturmodell

Beschreibung

Die Residualtemperaturen ergeben sich aus den Unterschieden zwischen den tatsächlich gemessenen Werten und dem im vorherigen Schritt erstellten A-Priorimodell (siehe Abb. 3.6.1.4.1-1).

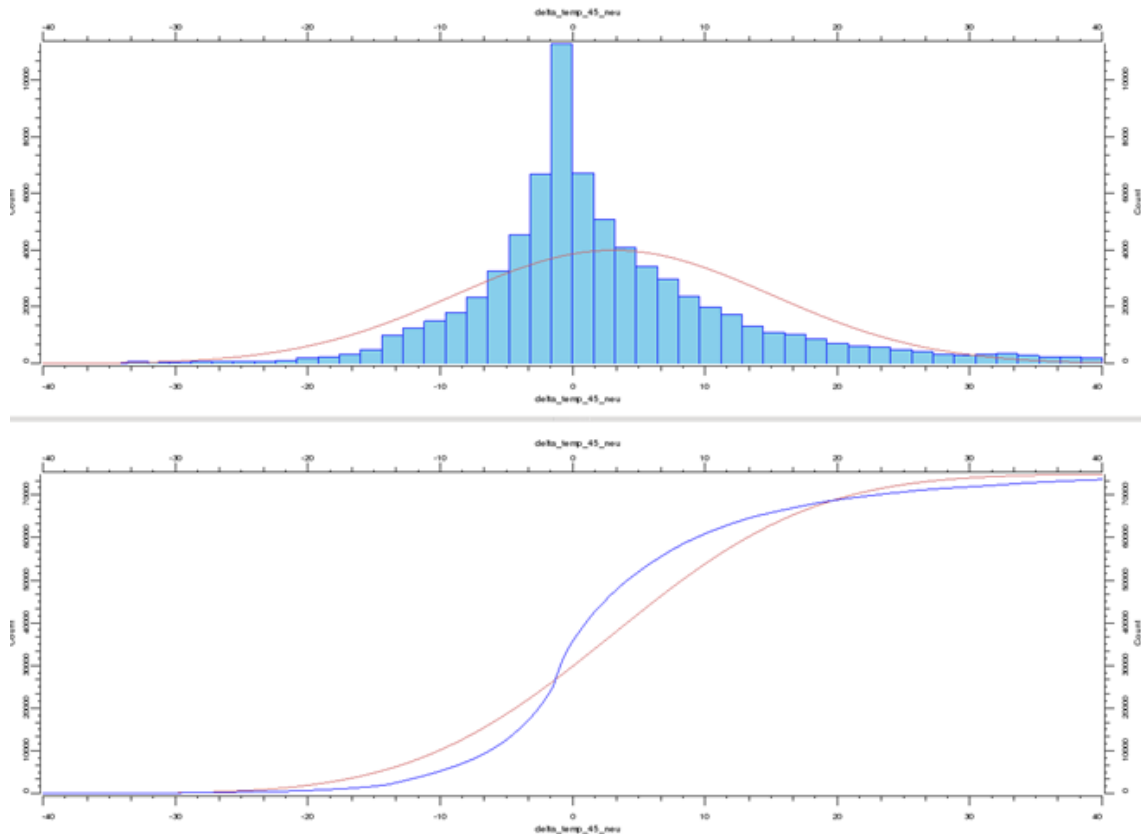


Abb. 3.6.1.4.1-1: Histogram of residual temperatures (difference between a priori model and actually measured temperatures)

Abb. 3.6.1.4.1-2 zeigt aus den Residualtemperaturen berechnete horizontale Variogramme für N-S Richtung (Azimut = 0) und E-W Richtung (Azimut = 90). Die Temperaturen sind für bis maximal 20 km entfernten Bohrungen korrelierbar. Der Sill liegt bei 147. Der Range des vertikalen Variogramms ist schwer bestimmbar. Er wurde bei 1600m in Anlehnung an das bereits vorhandene Temperaturmodell von Carré (2011) festgelegt.

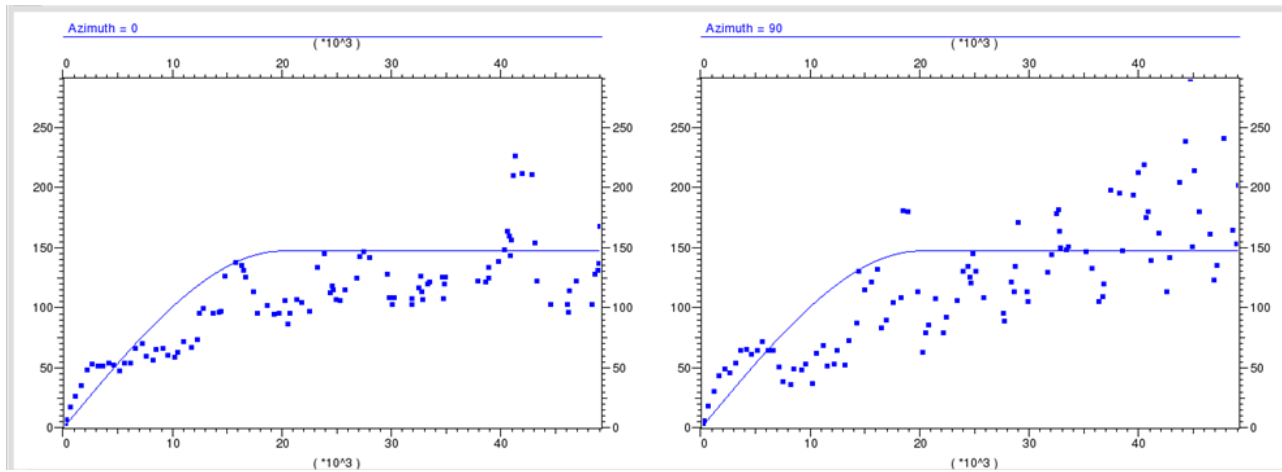
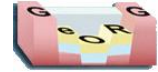


Abb. 3.6.1.4.1-2: Horizontal variograms of residual temperatures in N-S direction (azimuth = 0) and E-W direction (azimuth = 90). Variance in E-W direction is higher due to tectonic structures of the Upper Rhine Graben.



3.6.1.4.2 Kriging der Residualtemperaturen

Ziel: Erstellung eines Modells für die Residualtemperaturen

Kurzbeschreibung

Regionalisierung der Residualtemperaturen mit Hilfe eines Simple-Krigingverfahrens

Eingangsdaten

Residualtemperaturen, Krigingmodell aus der Variogrammanalyse

Beschreibung

Nachfolgend können die normalverteilten Residualtemperaturen mit Hilfe eines Simple-Krigingverfahrens regionalisiert werden. Für eine entsprechende Wichtung der Datenqualitäten kamen verschiedene horizontale Variogramreichweiten (Ranges) zum Einsatz:

Tab. 3.6.1.4.2-1: Variogramreichweiten nach Datenqualität

Qualität	1	0.7	0.63	0.49	0.35	0.2	0.14
range [m]	20000	14000	12600	9800	7000	4000	2800

Die 3D-Modellierungssoftware Gocad bietet mit dem Reservoir Properties Workflow eine komfortable Möglichkeit für die Erstellung geostatistischer Modelle (siehe Abb. 3.6.1.4.2-1).

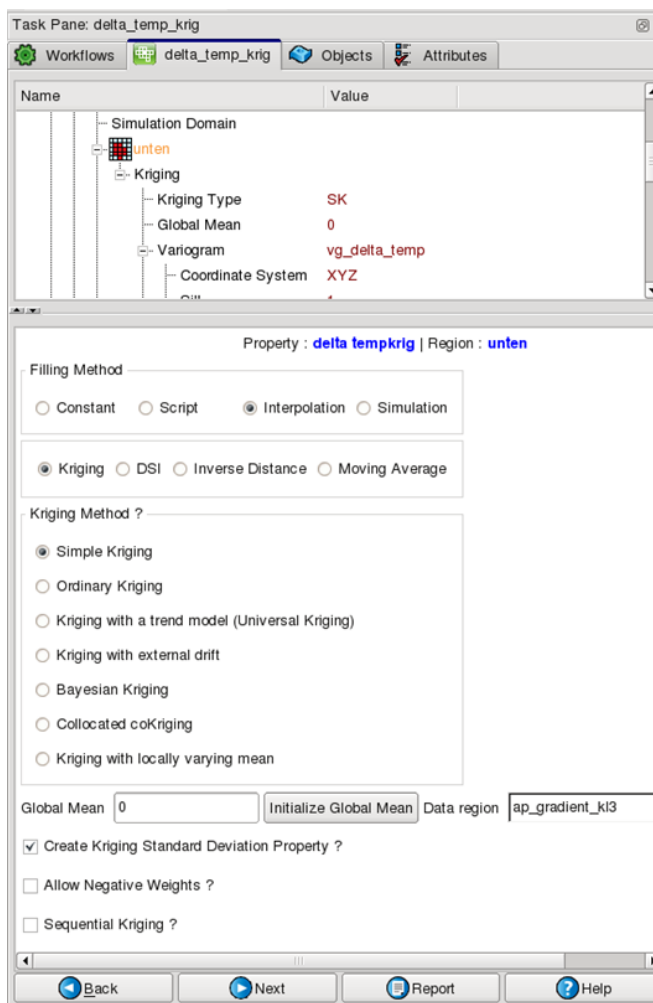
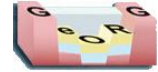


Abb. 3.6.1.4.2-1: Screenshot of the Reservoir Property Modeling Workflow in Gocad



3.6.1.5 Kombination zum Gesamttemperaturmodell

Beschreibung

Das Gesamttemperaturmodell ergibt sich aus der Addition des A-Priorimodells und des Residualtemperaturmodells.

- für Plausibilitätsprüfung Berechnung der Temperaturgradienten und Visualisierung der Temperaturgradienten kleiner 1 K/100 m und größer 15 K/100 m in eigenen Regionen
- Deckelung des maximalen Temperaturgradienten auf minimal 1 K/100 m maximal 15 K/100m
- Berechnung von Isothermenflächen (z.B.: 100 °C-Isotherme, 150 °C-Isotherme) und visuelle Kontrolle der Flächengeometrien





3.6.1.6 Auswertung und Datenexport

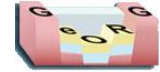
Eingangsdaten

- geostatistisches Temperaturmodell, Punktdatensatz des DGM im 100 m-Raster (Produktgrid), geothermische Nutzhorizonte aus dem geologischen 3D-Modell

Beschreibung

- Verschnitt des Temperaturmodells mit Flächen definierter Tiefenstufen (z.B.: 1000 m unter Gelände) sowie Ableitung von Isothermenflächen
- Verschnitt des Temperaturmodells mit geothermisch interessanten Horizonten des geologischen 3D-Modells





3.6.1.6.1 Ableitung von Temperaturen für definierte Tiefenstufen

Eingangsdaten

- geostatistisches Temperaturmodell, Punktdatensatz des DGM im 100 m-Raster (Produktgrid)

Beschreibung

Für die Ableitung von Temperaturwerten in 500 m-Schritten von 500 m unter Gelände bis 3000 m unter Gelände wird zunächst der Punktdatensatz entsprechend der Angabe in m unter Gelände neu positioniert (z.B.: für 1000 m unter Gelände: PointsSet - Tools - Move: Translate: Translation x: 0 y: 0 z: -1000)

- danach können die Temperaturwerte des Temperaturvoxels auf den Punktdatensatz übertragen werden: PointsSet - Property - Transfer Property From Nearby Grid Node or Cell

- Export der Punktdatensätze im Ascii-Format (x y T)

- Import der Punktdatensätze in ArcGIS, Konvertierung in ein ArcInfoGrid und GIS-technische Nachbearbeitung





3.6.1.6.2 Ableitung von Isothermenflächen

Eingangsdaten

geostatistisches Temperaturmodell, Punktdatensatz im 100 m-Raster (Produktgrid)

Beschreibung

Für die Charakterisierung des geothermischen Geopotenzials wurden Isothermenflächen für folgende Temperaturen erzeugt:

- 60 °C Isothermenfläche
- 100 °C Isothermenfläche
- 150 °C Isothermenfläche

Die Isothermenflächen sind direkt aus dem Temperaturvoxet ableitbar: z.B.: für 100 °C: Surface - New - From Grid - Grid Iso-Property: Iso Value: 100

Nachfolgend kann der aus dem Produktgrid abgeleitete Punktdatensatz mit den z-Werten der Isothermenfläche parametrisiert werden: PointsSet - PointsSet - Property - Transfer Property By Vertical Projection

- Export der Punktdatensätze im Ascii-Format (x y z in m NN)

- Import der Punktdatensätze in ArcGIS, Konvertierung in ein ArcInfo-Grid, Umrechnung der Gridwerte von m über Normalnull in m unter Gelände mit dem entsprechenden DGM (s. Kap. 17.3) und GIS-technische Nachbearbeitung





3.6.1.6.3 Ableitung von Temperaturen an geologischen Horizonten

Eingangsdaten

- geostatistisches Temperaturmodell, Punktdatensatz des im 100 m-Raster (Produktgrid), geothermische Nutzhorizonte aus dem geologischen 3D-Modell

Beschreibung

Durch den Verschnitt des Temperaturmodells mit dem geologischen 3D-Modell lassen sich folgende geothermisch interessanten Horizonte bez. ihrer Temperaturen charakterisieren:

- Oberfläche Oberjura
- Oberfläche Hauptrogenstein
- Oberfläche Oberer Muschelkalk
- Oberfläche Buntsandstein
- Basis permotriassischer Sandsteine (Basis Buntsandstein bzw. Basis Zechstein, wo vorhanden)
- Oberfläche Grundgebirge

Für die Ableitung der Temperaturen werden die Horizontflächen zunächst mit Hilfe des Temperaturvoxets parametrisiert: Surface - Property - Transfer Property From Nearby Grid Node or Cell

Nachfolgend kann der aus dem Produktgrid abgeleitete Punktdatensatz mit den Temperaturwerten der Horizontfläche parametrisiert werden: PointsSet - PointsSet - Property - Transfer Property By Vertical Projection

- Export der Punktdatensätze im Ascii-Format (x y z in m NN)
- Import der Punktdatensätze in ArcGIS, Konvertierung in ein ArcInfo-Grid und GIS-technische Nachbearbeitung





3.6.1.6.4 Berechnung von Standardabweichungen für Temperaturkarten

Eingangsdaten

Temperaturbelegpunkte, Ergebnisse der Variogrammanalyse

Beschreibung

- **Belegpunkte für einzelne Datenqualitäten** (entweder aus Gocad getrennt für verschiedene Qualitäten exportiert oder aus Temperaturdatenbank abgefragt)

Eingangsdaten:

- für „Temperaturen in bestimmter Tiefe“ (g_tempX): aus Datenbank-Tabelle Temperatur
- für „Tiefenlage einer bestimmten Temperatur“ (g_tempXdp): aus GoCad-Tab-Dateien
- für „Temperatur am Top einer geologischen Einheit“ (g_temptX): aus GoCad-Tab-Dateien

Bearbeitung in Excel:

- Zusammenführen der Dateien jeweils für die drei Eingangsdatenkategorien
- Einfügen Attribut "quali" für verschiedene Datenqualitäten (1, 0.7, ..., 0.14)
- Einfügen Attribut "range" je nach quali:

Qualität	1	0.7	0.63	0.49	0.35	0.2	0.14
range [m]	20000	14000	12600	9800	7000	4000	2800

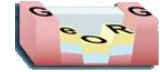
Bearbeitung in ArcGIS

- Importieren als X-Y-Events und abspeichern der einzelnen Dateien (z.B. g_temp60dp.shp) im jeweiligen „work“-Verzeichnis
- Buffer 1 ("innen"): einheitlich 5 m um Belegpunkte; dissolve all -> X_Buffer1.shp
- Buffer 2 ("außen"): Bufferdistanz = range; dissolve all -> X_Buffer2.shp
- Umwandeln der Flächen in Umriss (= Isolinien aus Buffer) mit ArcInfo: Datamanagement Tools - Features - Polygon to Line:
 - X_Buffer1.shp -> X_Buffer1_PolygonToL.shp
 - X_Buffer2.shp -> X_iso.shp, merge mit 1.
- Einfügen Attribut "std" für Standardabweichungen): für Isolinien Buffer innen: std = 0; für Isolinien außen: std = 12.1 (= Standardabweichung aus Kriging Covariance Model)

Bearbeitung in ArcView

- ../work_hydro/database/export/temp_std.apr
- Einfügen Contour Gridder (Zusatzextension in ArcView 3.3)
- Berechnung Standardabweichungen:
 - Eingangsdatensatz: X_iso.shp
 - Analysis Extent, Analysis Cell Size, Analysis Mask: georgbasic100 (../results/georg/apr/georgbasic100)
 - Cell values: std
 - erzeugt wird „result“-Grid (z.B. g_temp60dp)
- Umwandlung (convert to grid): (z.B. g_temp60dpg)





3.6.2 Pilotstudie: „Logauswertung und konduktive Temperaturmodellierung im Oberrheingraben zwischen Rastatt und Landau“

Ziel: Ableitung petrophysikalischer Kennwerte aus Loggingdaten und Erstellung eines konduktiven Temperaturmodells im Pilotgebiet

Kurzbeschreibung

Aus bohrlochgeophysikalischen Messungen wurden die Kennwerte Porosität, Wärmeleitfähigkeit und radiogene Wärmeproduktionsrate abgeleitet. Sie dienen neben den Geometrien des geologischen 3-D Modells als Eingangsparameter für ein ausschließlich auf konduktiven Wärmetransport basierendes Temperaturmodell im Pilotgebiet zwischen Rastatt und Landau. Dieser konservative Ansatz liefert auch für größere Tiefen, in denen keine Temperaturinformationen aus Bohrungen vorliegen, auf plausibilisierten Annahmen und nachvollziehbarer Methodik basierende Anhaltspunkte für die dort zu erwartenden Untergrundtemperaturen.

Eingangsdaten

- bohrlochgeophysikalische Datensätze in digitaler und analoger Form aus 28 Bohrungen
- Informationen zur Stratigraphie und Lithologie aus Kernbeschreibungen
- geologisches 3D-Modell
- Kernmessungen zu Porosität, Permeabilität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit
- Petrographie
- Temperaturmessungen (Logs und korrigierte BHT-Werte)
- Basaler Wärmefluss

Beschreibung

Für eine Teilregion im GeORG-Projektgebiet wurde die dreidimensionale Temperaturverteilung aufgrund des konduktiven Wärmetransportes im Untergrund modelliert. Das Modell erlaubt eine Abschätzung der Untergrundtemperaturen ohne den zusätzlich stattfindenden Wärmeeintrag durch konvektive Prozesse und macht auf der Grundlage dieser Randbedingungen konservative Angaben zum Temperaturfeld. Dieser Ansatz liefert auch für größere Tiefen, in denen keine Temperaturinformationen aus Bohrungen vorliegen, auf plausibilisierten Annahmen und nachvollziehbarer Methodik basierende Anhaltspunkte für die dort zu erwartenden Untergrundtemperaturen. Die Arbeiten wurden im Rahmen eines Werkvertrags von dem Unternehmen Geophysicsa Beratungsgesellschaft mbH Aachen, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in einem ausführlichen Bericht dokumentiert (Geophysicsa, 2012).





3.6.2.1 Arbeitsablauf der Logauswertung und konduktiven Temperaturmodellierung

Ziel: Erstellung eines konduktiven -Temperaturmodells für das Pilotgebiet

Kurzbeschreibung

Übersicht über die Arbeitsschritte der Logauswertung und konduktiven Temperaturmodellierung

Eingangsdaten

- bohrlochgeophysikalische Datensätze in digitaler und analoger Form aus 28 Bohrungen
- Informationen zur Stratigraphie und Lithologie aus Kernbeschreibungen
- geologisches 3D-Modell
- Kernmessungen zu Porosität, Permeabilität, Dichte, Wärmeleitfähigkeit
- Petrographie

Temperaturmessungen (Logs und korrigierte BHT-Werte)

Beschreibung

Arbeitsschritte Logauswertung und konduktives Temperaturmodell (siehe Abb. 3.6.2-1 und 3.6.2-2)

Datensammlung

Von den Projektpartnern (BRGM, LGB, LGRB) wurden dem Werkvertragnehmer Loggingdaten zu 28 Bohrungen (*Data collection of 28 boreholes*) in analoger und digitaler Form (*Log data digital, Log data analog*) zur Verfügung gestellt. Zur Sichtung und Bewertung sämtlicher Daten wurden die digital vorliegenden Logs (*Log data digital*) in die Loginterpretationssoftware IP (Interactive Petrophysics) eingeladen (*Digital capture, Import of data in interpretation software*). Vereinzelt wurden auch Kerndaten zur Verfügung gestellt, die ebenfalls in IP eingeladen wurden. Die analogen Daten wurden hinsichtlich ihrer Vollständigkeit und Qualität durchgesehen.

Sichtung der Daten, Vollständigkeitskontrolle

Nach Durchsicht der analogen und digitalen Daten wurde eine Auswahl von 11 Bohrungen getroffen. Ausschlaggebende Kriterien waren die räumliche Verteilung (*Spatial distribution*) und stratigraphische Abdeckung (*Stratigraphy*) der geloggten Formation sowie die Qualität (*Quality*), als auch das Vorhandensein der Bohrlochmessungen (*Logs*).

Eingabe von Stratigraphien und Lithologien

Für die ausgewählten Bohrungen wurden die Daten in IP vervollständigt. Das heißt, z. T. wurden analoge Logs digitalisiert und in IP überführt. Weiter wurden stratigraphische Horizonte und lithologische Angaben für das Untersuchungsgebiet vereinheitlicht und für die einzelnen Bohrungen teufenabhängig festgelegt. Diese Informationen wurden in IP überführt und mit den Bohrlochmessungen in sogenannte Composite-Logs (*Generating composite Logs*) überführt und dargestellt.

Bestimmung von Referenzbohrungen

(*Selection: 7 reference boreholes*)

Aus den 11 Bohrungen wurden wiederum 7 Bohrungen bestimmt, für die im nächsten Schritt Wärmeleitfähigkeitsprofile berechnet werden sollten. Die 7 Referenzbohrungen spiegeln die Variationen des Untergrundes im Untersuchungsgebiet wider.

Bestimmung der Porosität sowie des Ton- und Matrixanteils

(*Determination Porosity, Determination clay volume and rock matrix*)

Die berechneten Daten wurden mit Labormessungen, die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden, und anhand von Literaturdaten kalibriert





Berechnung von Wärmeleitfähigkeitsprofilen

(heat productivity profiles)

Für die 7 Referenzbohrungen wurden aus den Logs kontinuierliche Wärmeleitfähigkeitsprofile berechnet. Die berechneten Daten wurden mit Labormessungen, die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden, und anhand von Literaturdaten kalibriert

Berechnung der Wärmeproduktionsrate

(Determination rate of heat production)

Für die 7 Referenzbohrungen wurde mittels einer empirischen Beziehung nach Bücken & Rybach (1996) aus dem Gamma-Ray-Log ein kontinuierliches Log der Wärmeproduktionsrate gerechnet.

Erstellung des numerischen konduktiven Wärmetransportmodells

(Conductive temperature modeling)

Unter Verwendung der vom Auftraggeber digital zur Verfügung gestellten Geometrien des 3D - Untergrundmodells (*Geological 3D model*) wurde das numerische Modell erstellt und erste Simulationsläufe durchgeführt.

Aufbereitung der Temperaturdaten

Mit Beginn des Projektes wurden Temperaturdaten gesammelt, zum Teil nachdigitalisiert und bewertet. Diese Daten wurden in ihrer Gesamtheit aufbereitet. Aus Vergleichen erster Modellergebnisse mit gemessenen Temperaturlogs wurden Bohrlokationen mit Temperaturlogs ausgewählt, die sich für eine Kalibrierung des konduktiven Modells eignen.

Kalibrierung des konduktiven Modells und Simulationsläufe

Die aus den Bohrungen (Kern- und Loganalyse) abgeleiteten thermischen Parameter wurden als Startparameter in das Modell eingegeben. Unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen (basale Wärmestromdichte, Oberflächentemperatur) (*average soil temperature*) wurden Simulationen durchgeführt (*Simulation under conductive conditions*), wobei das Modell anhand ausgewählter Temperaturdaten kalibriert wurde (*Comparison of measured and calculated temperature profiles*).

Präsentation der Ergebnisse

Für die Fachtagung Geotherm in Offenburg (01. – 02.03.2012) wurde ein Poster erstellt, auf dem einige ausgewählte Arbeitsergebnisse der Studie dargestellt sind. Die Berichtstellung erfolgte parallel zum Projektverlauf.



3.6.2-1 Conductive temperature modeling - Heat conductivity profiles

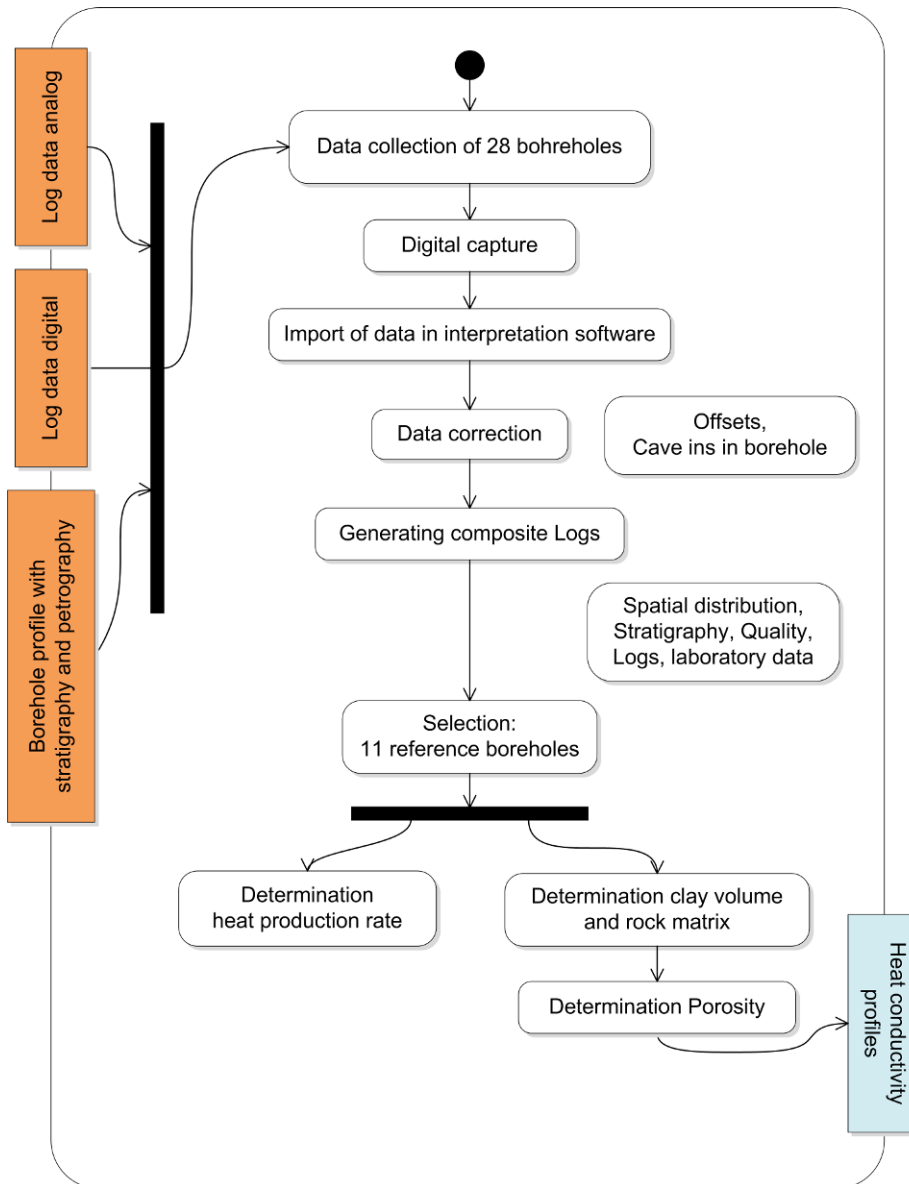


Abb. 3.6.2-1: UML-Workflow zur Erstellung der Wärmeleitfähigkeitsprofile



3.6.2-2 Conductive temperature modeling - model

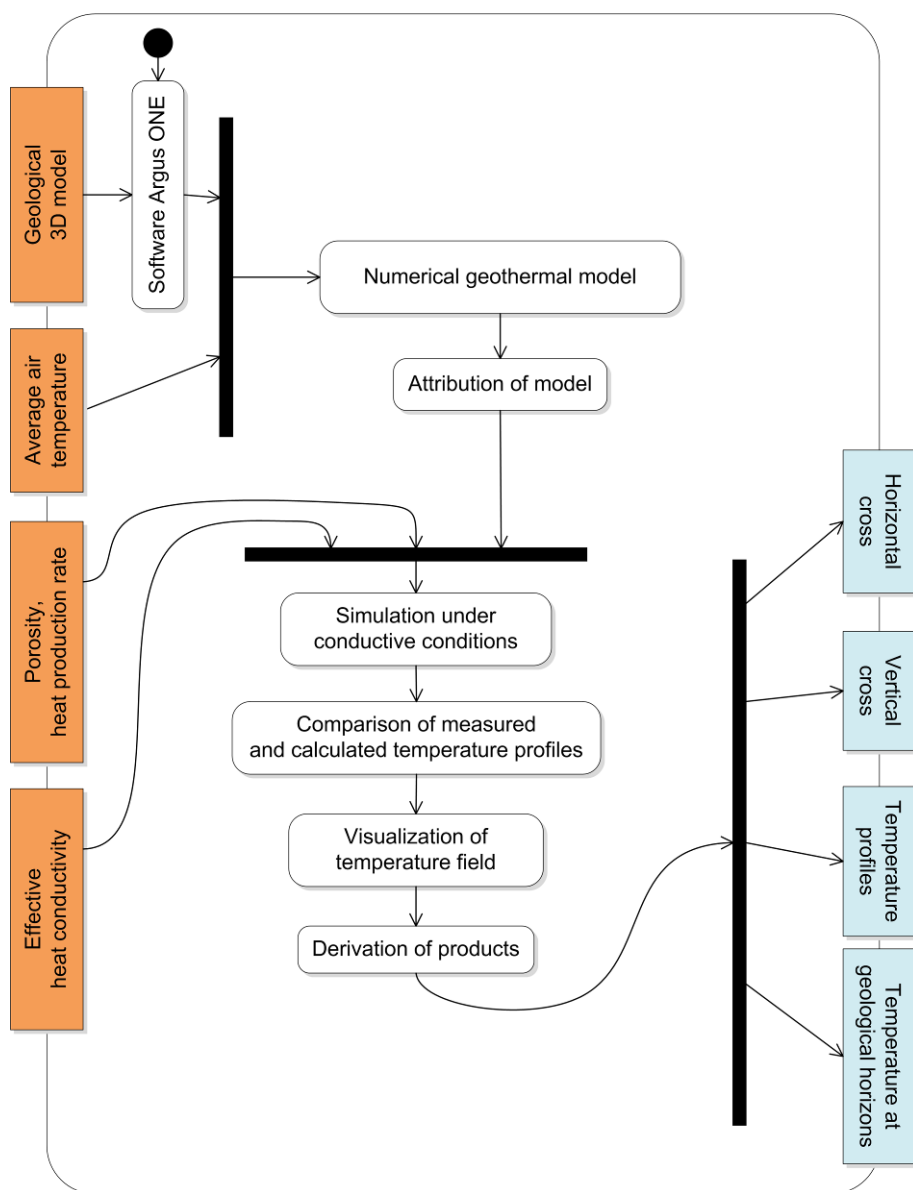


Abb. 3.6.2-2: UML-Workflow zur Erstellung des konduktiven Temperaturmodells

Literaturhinweise

Bücker & Rybach (1996)



3.6.2.2 Datenzusammenstellung

Ziel: Sichtung vorhandener Daten

Kurzbeschreibung

Als Ausgangsdatensatz standen digitale und analoge Loggingdaten aus 28 Bohrungen zur Verfügung.

Eingangsdaten

Loggingdaten aus Bohrungen

Bohrberichte

Porositäts-, Permeabilitäts- und Wärmeleitfähigkeitsdaten

Beschreibung

Insgesamt standen digitale und analoge Loggingdaten aus 28 verschiedenen Bohrungen zur Verfügung (Tab. 3.6.2.2-1). Für die Bohrungen, welche seitens des BRGM zur Verfügung gestellt wurden, lagen Dateien in tif-Formaten vor, die Informationen zur Stratigraphie und Lithologie enthalten. Ebenfalls waren Composite-Logs mit Angaben zur Lithologie in pdf-Formaten beigelegt. Für die Bohrungen Rohrlach-1, Schweighouse-sur-Moder-1D, Münzfeld-1, Abwänder-1 und Gukenberg-1 existierten interpretierte Daten, welche Berechnungen der Porosität und der prozentualen Volumenanteile der verschiedenen Minerale in der Formation enthielten. Neben den Loggingdaten aus deutschen Bohrungen, welche seitens des LGB Mainz und des LGRB Freiburg übermittelt wurden, standen Bohrberichte zur Verfügung, die ebenfalls Angaben zu Lithologie und Stratigraphie enthalten. Zu einigen Bohrungen standen vereinzelt Kernmessungen bezüglich Porosität und Permeabilität zur Verfügung. Wärmeleitfähigkeitswerte aus dem Labor wurden für die Bohrung Soultz-sous-Forêts GPK-1 (im Weiteren als GPK-1 bezeichnet) anhand von Literatur zusammengestellt. Seitens des LGB Mainz und des LGRB Freiburg wurden weitere Wärmeleitfähigkeitsmessdaten übermittelt. Diese Messdaten entstammen aber nicht aus im Projekt berücksichtigten und ausgewerteten Bohrungen.

Tab. 3.6.2.2-1: Verfügbare Bohrungen mit Loggingdaten

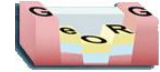
BRGM	LGB Mainz	LGRB Freiburg
Rohrlach-1	Eppstein-1	Bruchsal-1
Salmbach-1	Edesheim-1	Bruchsal-2
Niederrödern-Nord-1	Landau-101	Stutensee-1
Neewiller-Nord-1	Landau-250a	Leopoldshafen-5a
Niederlauterbach-1	Landau-173	Staffort-1
Niederlauterbach-101	Rülzheim-2	
Oberlauterbach-3	Maximiliansau-2	
Schelmenberg-2	Harthausen-1	
Münzfeld-1	Schaidt-1	
Niederlauterbach-109D		
Abwänder-1		
Gukenberg-1		
Oberrödern-101		
Schweighouse-Sur-Moder-1D		
Mothern-1		
GPK-1		

Literaturhinweise Geophysica (2012)



Das vorliegende Dokument ist Teil des „Fachlich-Technischen Abschlussberichts - Teil 3“ des INTERREG IV-Projekts „GeORG – Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“.

Der komplette Bericht (Teil 1-4) ist unter www.geopotenziale.eu zum Download bereit gestellt.



3.6.2.3 Sichtung der Daten, Vollständigkeitsprüfung

Ziel: Auswahl von 11 Bohrungen zur weiteren Bearbeitung

Kurzbeschreibung

Die 28 zur Verfügung stehenden Bohrungen wurden hinsichtlich Vollständigkeit und Qualität der Daten überprüft.

Eingangsdaten

Loggingdaten

Beschreibung

Dafür wurden alle digital vorliegende Bohrlochmessungen (LAS-Formate) in die Interpretationssoftware „Interactive Petrophysics“ (IP) eingeladen und als Composite-Logs für die einzelnen Bohrungen dargestellt. Ergänzend wurden analoge stratigraphische und lithologische Angaben in ein digitales Format überführt. Die analog vorliegenden Loggingdaten wurden ebenfalls hinsichtlich Umfang und Qualität geprüft. Eine Auflistung der vorhandenen Loggingdaten findet sich in Tab. 3.6.2.3-1 und Tab. 3.6.2.3-2. Für die Auswahl der Bohrungen war ebenso relevant, welche der stratigraphischen Modellhorizonte aufgeschlossen werden. Diese Informationen sind in Tab. 3.6.2.3-3 enthalten. Die Abkürzungen der Modellhorizonte des geologischen 3D-Modells sind in Tab. 3.6.2.3-4 erläutert.

Tab. 3.6.2.3-1: Digitale Logdaten

Borehole	Cal	SP	Res	GR	Thor	U	Pota	RHOB	DT	NPHI	PEF	T
GPk-1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Rohrlach1	x	x	x	x	•	•	•	x	•	x	-	-
Salmbach1	x	•	•	x	-	-	-	-	x	-	-	-
Niederroedern-Nord-1	x	x	x	x	-	-	-	-	x	-	-	-
Neewiller-Nord-1	x	x	x	x	-	-	-	-	x	-	-	-
Niederlauterbach-1	x	•	x	•	-	-	-	-	•	-	-	-
Niederlauterbach-101	x	x	x	x	-	-	-	-	x	-	-	-
Oberlauterbach-3	x	-	x	x	-	-	-	•	x	•	-	-
Schelmenberg-2	x	-	•	x	-	-	-	-	x	-	-	-
Muenzfeld-1	•	•	•	•	-	-	-	•	•	•	•	-
Niederlauterbach-109D	x	•	x	x	-	-	-	•	x	•	-	-
Abwaender-1	x	•	•	x	-	-	-	•	•	•	-	-
Gukenberg-1	x	•	•	x	-	-	-	•	x	•	-	-
Oberroedern-101	x	x	x	x	-	-	-	-	x	-	-	-
Schweighouse-sur-moder-1D	x	x	x	x	•	•	•	x	x	x	x	-
Mothern-1	•	•	•	x	-	-	-	-	x	-	-	-
Rülzheim-2	x	x	x	x	-	-	-	x	x	•	x	-
Schaidt-1	•	x	x	-	-	-	-	-	•	-	-	-
Harthausen-1	•	•	•	•	-	-	-	-	-	•	-	-
Leopoldshafen-5a	•	•	•	-	-	-	-	•	-	•	•	-
Bruchsal-1	•	•	•	•	-	-	-	•	•	-	•	-
Stutensee-1	x	x	x	x	-	-	-	•	x	•	•	-
Eppstein-1	•	-	-	•	-	-	-	-	•	-	-	-
Edesheim-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Landau-101	-	x	x	-	-	-	-	-	x	-	-	-
Landau-173	•	•	•	•	-	-	-	•	•	•	-	-
Landau-250a	-	-	•	•	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximiliansau-2	•	-	•	-	-	-	-	•	-	•	•	-
x	continuous		•	discontinuous		-	non-existent					

Cal	[mm]	= Caliper
SP	[mV]	= Spontaneous Potential
Res	[Ohmm]	= Resistivity
GR	[API]	= Gamma Ray
Thor	[ppm]	= Thorium
U	[ppm]	= Uranium
Pota	[%]	= Potassium
RHOB	[g cm ⁻³]	= Rock density
DT	[μs m ⁻¹]	= Travel time
NPHI	[-]	= Porosity
Pef	[barns/e]	= Photoelectric absorption
T	[°C]	= Temperature

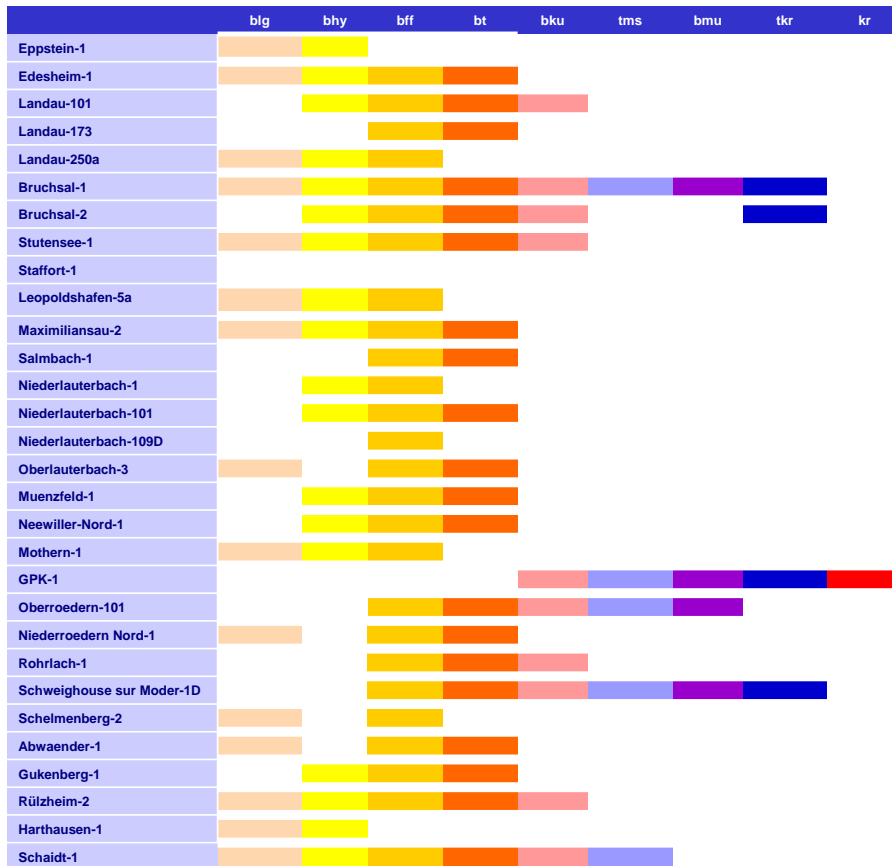


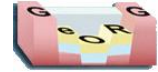
Tab. 3.6.2.3-2: Analoge Logdaten.

Borehole	Cal	SP	Res	GR	Thor	U	Pota	RHOB	DT	NPHI	PEF	T
Staffort-1	x	-	-	x	x	x	x	x	-	x	x	-
Bruchsal-2	•	-	-	•	-	-	-	-	•	-	-	•
Leopoldshafen-5a	•	x	x	•	-	-	-	•	-	•	-	-
Eppstein-1	x	•	•	•	-	-	-	•	•	•	-	-
Edesheim-1	•	x	x	-	-	-	-	-	x	-	-	x
Landau-101	-	x	x	-	-	-	-	-	x	-	-	-
Landau-173	x	x	x	x	-	-	-	x	-	x	-	-
Landau-250a	x	x	x	x	-	-	-	•	x	•	•	-
Maximiliansau-2	x	x	x	x	•	•	•	•	•	-	•	-
	x	continuous			•	discontinuous			-	non-existent		

Cal [mm] = Caliper
 SP [mV] = Spontaneous Potential
 Res [Ohmm] = Resistivity
 GR [API] = Gamma Ray
 Thor [ppm] = Thorium
 U [ppm] = Uranium
 Pota [%] = Potassium
 RHOB [g cm⁻³] = Rock density
 DT [µs m⁻¹] = Travel time
 NPHI [-] = Porosity
 Pef [barns/e] = Photoelectric absorption
 T [°C] = Temperature

Tab. 3.6.2.3-3: Stratigraphische Horizonte, welche in den einzelnen Bohrungen aufgeschlossen sind. Die Abkürzungen sind in Tab. 3.6.2.3-4 erläutert





Tab. 3.6.2.3-4: Erläuterung der Abkürzungen der Modellhorizonte des geologischen 3D- Modells.

Modelled horizons	
Base Unconsolidated Rocks	blg
Base Landau Formation	bhy
Base Froidefontaine Formation	bff
Base Tertiary	bt
Base Keuper	bku
Top Muschelkalk evaporites	tms
Base Muschelkalk	bmü
Top Basement	tkr
Basement	kr

Literaturhinweise

Geophysica (2012)



3.6.2.4 Auswahl der Referenzbohrungen, Qualitätskontrolle

Ziel: Auswahl von Bohrungen für die Loginterpretation

Kurzbeschreibung

Aus den insgesamt vorliegenden 28 Bohrungen wurden 11 Bohrungen für die Loginterpretation ausgewählt.

Beschreibung

Aus den 28 Bohrungen wurden 11 Bohrungen für die Loginterpretation ausgewählt (Tab. 3.6.2.4-1).

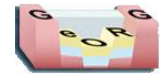
Tab. 3.6.2.4-1: Aus den 11 Bohrungen der Vorauswahl wurden für die weitere Bearbeitung 7 Bohrungen zur Bestimmung des Tonmineralgehaltes und der Porosität selektiert (rote Pfeile, vgl. Kap. 3.6.2.5.1).

Preselection boreholes	
	1 Landau-250a
	2 Bruchsal-1
	3 Stutensee-1
	4 Maximiliansau-2
	5 Niederlauterbach-101
	6 Mothern-1
	7 Niederrödern-Nord-1
	8 Oberrödern-101
	9 Rohrlach-1
	10 GPK-1
	11 Rülzheim-2

Ausschlaggebend für die Auswahl waren folgende Kriterien:

- räumliche Abdeckung des betrachteten Modellgebietes,
- stratigraphische Abdeckung,
- Vorhandensein und Qualität der Logs,
- Vorhandensein von Laboraten.

Für die Interpretation der Bohrlochdaten und die Berechnung von Wärmeleitfähigkeitsprofilen sind insbesondere Bohrlochmessungen der Gammastrahlung, Dichte und Laufzeit relevant. Für die Bohrungen Maximiliansau-2 und Landau-250 wurden analoge Logs (Kaliber, Laufzeit und Dichte) digitalisiert. Wichtig waren auch Labormessungen hydraulischer und thermischer Eigenschaften, um die interpretierten Daten zu kalibrieren. Die Anzahl der Kernmessungen für die ausgewählten Bohrungen bzw. deren Nachbarbohrungen sind in Tab. 3.6.2.4-2 dargestellt.



Tab. 3.6.2.4-2: Anzahl der verfügbaren Kernmessungen in den verschiedenen Bohrungen mit zugehörigen stratigraphischen Einheiten

Borehole	λ_{tr}	λ_s	Φ	k	Stratigraphy
Landau-250a			47	47	Niederrödern Formation
Landau-146	19	1	1		Niederrödern Formation
Landau-4			1	1	Froidefontaine Formation
Landau-79			1	1	Froidefontaine Formation
Landau-101			1	1	Pechelbronn Formation
GPK-1	7				Muschelkalk
GPK-1	10				Buntsandstein
GPK-1	14				Basement
EPS-1			1	1	Buntsandstein
Soultz-s-Forets 4550			1		Muschelkalk
Soultz-s-Forets 4550			1		Buntsandstein
Soultz-s-Forets 4567			1		Muschelkalk
Maximiliansau-2			9	8	Froidefontaine Formation
Maximiliansau-2			3	2	Niederrödern Formation
Stutensee-1			4	2	Froidefontaine Formation
Stutensee-1/81			2	2	Froidefontaine Formation
Stutensee-1			1		Buntsandstein
Rülzheim-2			3	3	Froidefontaine Formation
Rülzheim-2			2	2	Niederrödern Formation
Rülzheim-3			3		Froidefontaine Formation
Rülzheim-3			7	1	Niederrödern Formation

Die Daten wurden hinsichtlich Off-Sets zwischen den einzelnen Bohrungen, Qualität der Bohrlochmesskurven und Einfluss von Bohrlochausbrüchen auf die verschiedenen Parameter untersucht.

Literaturhinweise

Geophysica (2012)





3.6.2.5 Interpretation der Logdaten

Ziel: Vorbereitende Arbeiten zur Bestimmung der Gesteinkomponenten und der Porosität aus Loggingdaten

Kurzbeschreibung

Zur Bestimmung der Lithologie und Gesteinmatrix wurden Bohrungen anhand der Logs in verschiedene petrophysikalische Zonen gegliedert.

Eingangsdaten

Loggingdaten aus Bohrungen
Bohrberichte

Beschreibung

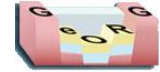
Die genaue Kenntnis der Lithologie bzw. der Gesteinmatrix ist notwendig, um Tonvolumen und Wärmeleitfähigkeit berechnen zu können. Deshalb wurden anhand der Logs die Tiefenlagen der Grenzen zwischen den verschiedenen Gesteinsschichten sowie die der stratigraphischen Grenzen exakt bestimmt. Derartige Angaben können in den Bohrberichten mit Ungenauigkeiten behaftet sein, da bei dem meist als Spülproben vorliegenden Material Vermischungen über mehrere Meter möglich sind.

Zur Bestimmung der Gesteinskomponenten und der Porosität wurden die Bohrungen in verschiedene petrophysikalische Zonen untergliedert. Die Einteilung folgt den stratigraphischen Modellhorizonten des GeORG-3D-Modells sowie der Signatur der einzelnen Logkurven. Dadurch wurden Bereiche der Formation zusammengefasst, die durch ähnliche lithologische Zusammensetzung mit vergleichbaren petrophysikalischen Trends gekennzeichnet sind. Für jede dieser Gesteinseinheiten wurde ein Dreikomponenten-System vorausgesetzt, das aus wassererfülltem Porenraum, Ton und Sand- bzw. Kalk-(Dolomit)-matrix besteht.

Literaturhinweise

Geophysica (2012)





3.6.2.5.1 Rekonstruktion der Lithologie aus Logdaten

Ziel: Ableitung der Lithologie, des Tonvolumens und der Porosität aus Logdaten

Kurzbeschreibung

Bestimmung der Lithologie aus Bohrberichten und Logs, Auswahl von 7 Referenzbohrungen

Eingangsdaten

Loggingdaten aus Bohrungen, Bohrberichte

Beschreibung

Für die 11 ausgewählten Bohrungen wurden zunächst die lithologischen Angaben aus den Bohrberichten, welche auf der Beschreibung von Spülproben und Kernbeschreibungen beruhen, mit den Logcharakteristika abgeglichen. Da sich bei den Spülproben das Material über mehrere Meter vermischt, können nur anhand der Logs die Grenzen zwischen den verschiedenen Gesteinsschichten korrekt bestimmt werden. Die genaue Kenntnis der Lithologie bzw. der Gesteinsmatrix ist notwendig, um Tonvolumen und Wärmeleitfähigkeit berechnen zu können. Weiterhin wurden die Tiefenlagen für die stratigraphischen Grenzen exakt bestimmt.

Für die petrophysikalische Analyse der Logdaten wurden aus den 11 Bohrungen wiederum 7 Referenzbohrungen ausgewählt, die repräsentativ für den Modellraum sind.

Ziel der weiteren Loginterpretation war die Bestimmung der Porosität und der auftretenden Gesteinskomponenten. In den Sedimentgesteinen war es vor allem das Ziel, das Tonvolumen zu quantifizieren und von dem Anteil der Gesteinsmatrix zu trennen. Letztere kann eine Mischung aus Sand und Kalk bzw. Dolomit sein. Anhand von Standardverfahren (Schlumberger, 1989) können Tonvolumen und Gesteinsporosität berechnet werden (siehe Abb. 3.6.2.5.1-1). Gewöhnlich wird das Log der Gammastrahlung benutzt, um den Tongehalt vom Sand- bzw. Kalkanteil zu separieren, während z. B. das Dichte-, Neutron- oder Sonic-Log für die Berechnung der Porosität herangezogen wird. Sind die volumetrischen Anteile der Gesteinskomponenten und die Porosität in der Formation bekannt, können anschließend über das geometrische Mittel kontinuierliche Profile der Wärmeleitfähigkeit erzeugt werden. In der Bohrung Soultz GPK1, in der granitisches Grundgebirge aufgeschlossen wurde, wurde die Vorgehensweise insofern modifiziert, dass die relativen Volumina von Kalifeldspat gegen Quarz und Plagioklas berechnet wurden.



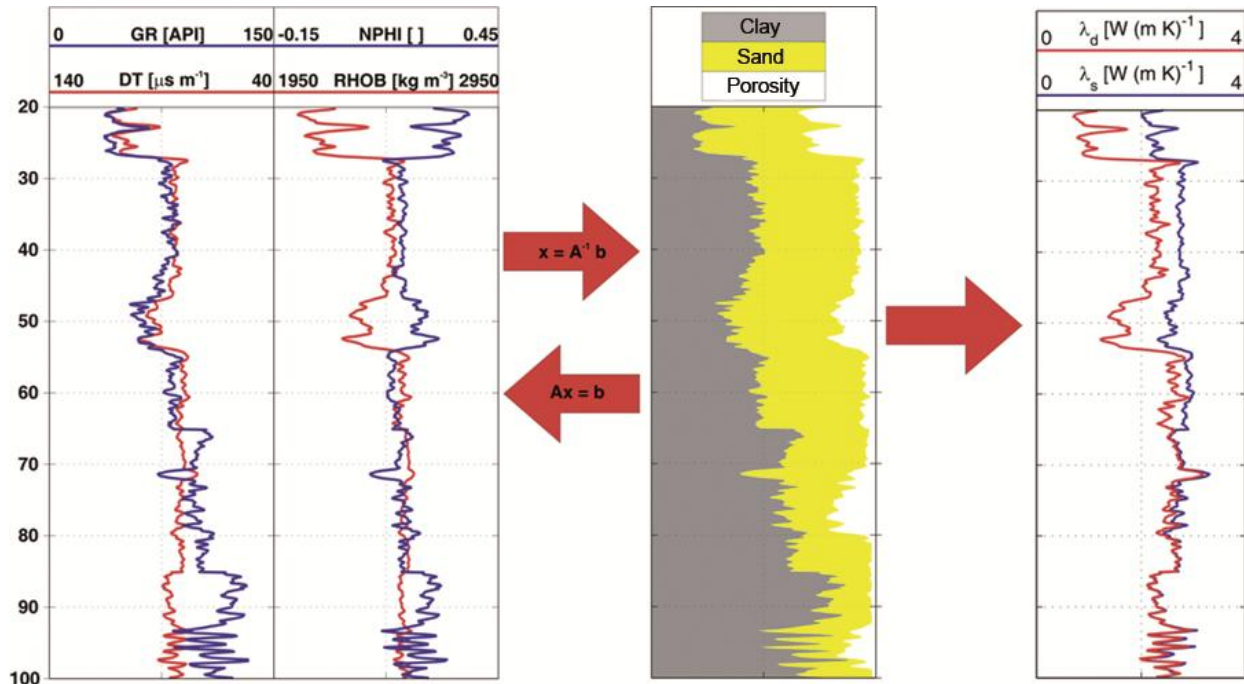
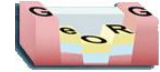


Abb. 3.6.2.5.1-1: Schema zur Berechnung kontinuierlicher Wärmeleitfähigkeitsprofile (GR: Gammastrahlung, DT: Laufzeit, NPHI: Neutronenporosität, RHOB: Dichte, λ_d : Wärmeleitfähigkeit in wassererfüllter Formation, λ_s : Wärmeleitfähigkeit in der luftgefüllten Formation. Die Darstellung der Ton-/Sandfraktion bzw. der Porosität reicht von 0 % bis 100 %. Ausprägungen einer Formation, wie ihre Zusammensetzung und der Porenanteil, erzeugen zugehörige Antwortsignale in den Logs. Über deterministische Beziehungen können aus Logdaten quantitative Aussagen zu den Gesteinkomponenten und dem Porenanteil getroffen werden, die zur Berechnung von Wärmeleitfähigkeiten herangezogen werden.

Literaturhinweise

Geophysica (2012)



3.6.2.5.2 Berechnung des Tonvolumens

Ziel: Ableitung des Tonvolumens aus Logdaten

Kurzbeschreibung

Berechnung des Tonvolumens und der Gesteinsporosität mittels Gamma-Ray-Logs anhand einer linearer Standardbeziehung.

Eingangsdaten

Gamma-Ray Logs

Beschreibung

Zur Bestimmung der Porosität und der auftretenden Gesteinskomponenten wurde zunächst das **Tonvolumen** quantifiziert und vom Anteil der Gesteinsmatrix getrennt.

Da für eine Kalibrierung keine Kerndaten zum Tonvolumen verfügbar waren, wurde zur Ermittlung des Tonvolumens und der Gesteinsporosität folgende lineare Standardbeziehung (Schlumberger, 1989) auf das Log der Gammastrahlung angewendet:

$$GR_{LOG} = (GR_{LOG} - GR_{MIN}) / (GR_{MAX} - GR_{MIN})$$

mit

GR_{LOG} = abgelesener Wert der GR-Kurve

GR_{MAX} = maximaler Wert der GR-Kurve entspricht ~ 100 % Ton (Tonlinie)

GR_{MIN} = minimaler Wert der GR-Kurve entspricht ~ 0 % ton (tonfreie Formation, Matrixlinie)

Die Ton- bzw. Matrixlinien (Sand bzw. Karbonat) wurden unter Berücksichtigung der lithologischen Beschreibung für die verschiedenen Gesteinseinheiten ausgewählt. Die Matrixlinien für Sand- bzw. Karbonat liegen zwischen 20 API und 30 API, während die Tonlinien zwischen 110 API und 130 API variieren. Für sämtliche Bohrungen wurde die Berechnung des Tonvolumens anhand des GR-Logs mit weiteren Logs kontrolliert, um den Tonanteil nicht unter- bzw. überbewerten.

Eine Ausnahme bildet der kristalline Abschnitt in der Bohrung Soultz GPK-1. Er wurde deshalb gesondert betrachtet. Ab 900 m Tiefe besteht in dieser Bohrung die Gesteinsabfolge aus Granit. Er setzt sich aus unterschiedlich hohen Anteilen von Feldspat (Plagioklas und Kalifeldspat), Quarz und Glimmer zusammen. Für das Dreikomponenten-System wurde statt des Tonanteils in den Sedimenten das Volumen von Kalifeldspat berechnet, welches sich durch einen hohen Wert im GR-Log auszeichnet. Die Matrix spiegelt den Anteil von Plagioklas, Quarz und Glimmer wieder. Da das Porenvolumen zu vernachlässigen ist, liegt der Wasseranteil bei nahezu Null. Im Kristallinabschnitt wurden insgesamt wesentlich höhere GR-Werte gemessen als in den Sedimenten, so dass für die Kalifeldspat- bzw. Matrixlinien die Werte 200 API bzw. 340 API festgelegt wurden.

Literaturhinweise

Geophysica (2012)



3.6.2.5.3 Berechnung der Porosität

Ziel: Ableitung der Porositäten aus Logdaten

Kurzbeschreibung

Bestimmung der Porosität anhand von Sonic-Logs

Eingangsdaten

Sonic-Logs

Beschreibung

Die Bestimmung der **Porosität** der Gesteine ist generell anhand von Widerstand-, Neutron-, Dichte- und Sonic- Logs möglich. Aufgrund der Datenlage eignet sich zur Berechnung der Porosität in den Sedimenten der Referenzbohrungen die Laufzeitmessung (Sonic-Log) am besten. Hierzu wurde folgende Gleichung nach Wyllie et al. (1956) angewendet:

$$\Delta t = \Phi \Delta t_w + (1 - \Phi)(V_{SH} \Delta t_{SH} + (1 - V_{SH}) \Delta t_M)$$

mit

Δt = abgelesener Wert der Laufzeitkurve [ms]

Δt_w = akustische Laufzeit von Wasser [ms]

Δt_{sh} = akustische Laufzeit von Ton [ms]

Δt_m = akustische Laufzeit tonfreier Matrix (Sandstein, Kalkstein) [ms]

V_{SH} = Tonvolumen

Φ = Porosität

Der Berechnung wurden Literaturdaten der akustischen Laufzeiten der Gesteinskomponenten (Tonstein, Kalkstein, Sandstein) zugrunde gelegt (Schön 2004; Schlumberger 1989, vgl. Tab. 3.6.2.5.4-1).

Da für die Bohrung Soultz GPK-1 nur das Dichtelog durchgängig vorhanden ist, wurde hier die Porosität über folgende Formel - ähnlich der Wyllie-Gleichung - bestimmt:

$$RHO_b = \Phi RHO_w + (1 - \Phi)(V_{SH} RHO_{SH} + (1 - V_{SH}) RHO_M)$$

mit

RHO_b = abgelesener Wert des Dichtelogs (Gesamtdichte) [g/cm³]

RHO_w = Dichte des Formationsfluids (Süßwasser = 1 g/cm³) [g/cm³]

RHO_{SH} = Korndichte von Ton [g/cm³]

RHO_M = Korndichte tonfreier Matrix (Sandstein, Kalkstein) [g/cm³]

Φ = Porosität

In Tab. 3.6.2.5.3-1 sind die Ergebnisse der Bestimmung der Porosität aus der Logauswertung zusammengestellt.



Tab. 3.6.2.5.3-1: Statistische Werte zur Porosität, die aus den Logs berechnet wurde.

	Min	Max	Mean	Std.abw.
Pleistozäne und pliozäne Lockergesteine (bis blg)	0,18	0,6	0,35	0,08
Tertiäre Landau-Formation (bis bhy)	0,00	0,57	0,22	0,08
Tertiäre Froidefontaine- bis Bruchsal-Formation (bis bff)	0,00	0,6	0,18	0,10
Tertiäre Schliegen- bis Pechelbronn-Formation (bis bt)	0,00	0,48	0,14	0,08
Keuper und Jura (bis bku)	0,00	0,6	0,04	0,06
Oberer Muschelkalk und Obere Dolomit-Formation des Mittleren Muschelkalks (bis tms)	0,00	0,06	0,00	0,01
Unterer und Mittlerer Muschelkalk (bis bmu)	0,00	0,12	0,00	0,01
Perm und Buntsandstein (bis tkr)	0,00	0,64	0,06	0,07
Kristallin (kr)	0,00	0,7	0,01	0,03

Abb. 3.6.2.5.3-1 zeigt ein Beispiel für die Bestimmung von Tonvolumen, Komponentenzusammensetzung und Porositätsverteilung in einer Bohrung.



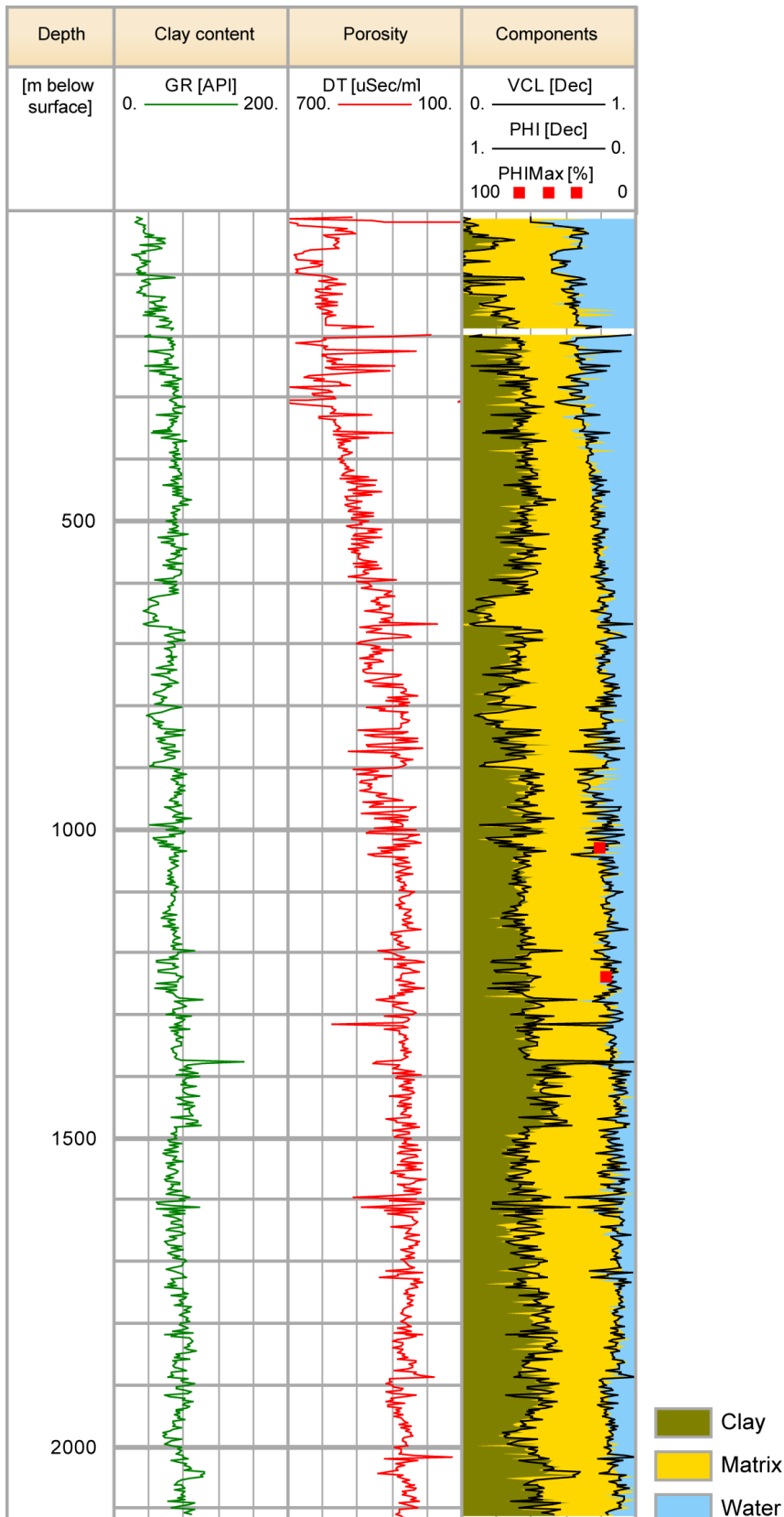
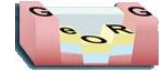


Abb. 3.6.2.5.3-1: Beispiel einer Porositätsberechnung. Die roten Punkte zeigen die wenigen zum Vergleich verfügbaren Ergebnisse von Porositätsbestimmungen am Bohrkern.



3.6.2.5.4 Berechnung der Wärmeleitfähigkeitsprofile

Ziel: Ableitung der Wärmeleitfähigkeiten aus Logdaten

Kurzbeschreibung

Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten auf Grundlage der berechneten Gesteinskomponenten und abgeleiteten Porositätswerten.

Eingangsdaten

Gesteinskomponenten und Porositätswerte

Beschreibung

Die berechneten Gesteinskomponenten und die von Dichte- bzw. Laufzeitlogs abgeleiteten Porositätswerte dienen als Eingangsdaten für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeitsprofile. Kennt man den Volumenanteil der verschiedenen Gesteinskomponenten und die Porosität, so können Logs der Wärmeleitfähigkeit generiert werden.

Die Beziehung zwischen der effektiven Wärmeleitfähigkeit der saturierten Formation λ_s , der Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix λ_m und des in der Formation enthaltenen Wassers λ_w kann mittels geometrischem Mittel beschrieben werden:

$$\lambda_s = \lambda_w \phi + \lambda_m (1 - \phi),$$

wobei

- λ_w = Wärmeleitfähigkeit von Wasser,
- λ_m = Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix,
- λ_s = Wärmeleitfähigkeit des wassererfüllten porösen Gesteins und
- ϕ = Porosität (Wassergehalt in %).

Die Wärmeleitfähigkeit wird von der prognostizierten Gesteinszusammensetzung abgeleitet. Die Wärmeleitfähigkeit für die verschiedenen Gesteinskomponenten (Ton, Kalkstein und Sandstein bzw. Feldspat, Quarz und Glimmer im Kristallin der Soultz GPK-1) wurde anhand von Literaturdaten (Schön, 2004; Clauser & Huenges, 1995 und Clauser, 2003) definiert. Diese Werte für die Matrixwärmeleitfähigkeit sind in Tabelle 3.6.2.5.4-1 Tab. 3.6.2.2- zusammengestellt. Für das Wasser in der Formation wurde eine Wärmeleitfähigkeit von $0,59 \text{ (W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$ eingesetzt.



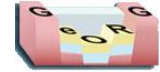
Tab. 3.6.2.5.4-1: Startwerte für die verschiedenen Komponenten (ρ_{Matrix} : Matrixdichte, DT_{Matrix} : Matrixlaufzeit, λ_{Matrix} : Matrixwärmeleitfähigkeit).

Components	ρ_{Matrix} [g cm ⁻³]	DT_{Matrix} [$\mu\text{s m}^{-1}$]	λ_{Matrix} [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Fluid	1	700	0,59
Pure sandstone	2,65	172	6,5
Limestone	2,71	155	3,1
Marl	2,68	163	4,5
Dolomite	2,87	135	3,9
Clay	2,55	330	1,41,7
Anhydrite	2,96	178	5,4
Granit	2,5-2,7	167-270	2-4,5
Biotite	3,0	187	3,14
Plagioclase	2,68	154	1,63
Muscovite	2,83	172	2,34
Quartz	2,65	151	6,50
Chlorite	2,8	182	4,21
Potash feldspar	2,59	168	2,41

Zur Verifizierung der nach oben genannter Formel berechneten Wärmeleitfähigkeiten sollten diese, wenn möglich, mit Kerndaten aus der gleichen Bohrung verglichen werden. Die ist nur für die Gesteinsfolgen der Bohrung GPK1 der Fall, für die Kerndaten aus dem Muschelkalk, dem Buntsandstein und dem Kristallin vorliegen. Für die anderen stratigraphischen Einheiten liegen aus den anderen betrachteten Bohrungen keine Kerndaten vor. Hier wurde versucht, Daten aus benachbarten und auch weiter entfernten Bohrungen zum Vergleich heran zu ziehen.

Literaturhinweise

Schön (2004), Clauser & Huenges (1995), Clauser (2003), Geophysica (2012)



3.6.2.5.5 Berechnung der Wärmeproduktionsrate

Ziel: Ableitung der Wärmeproduktionsrate aus Logdaten

Kurzbeschreibung

Berechnung der Wärmeproduktionsrate für sieben Referenzbohrungen aus Gamma-Ray-Logs für die stratigraphischen Modelleinheiten.

Eingangsdaten

Gamma-Ray-Logs

Beschreibung

Für sieben Referenzbohrungen wurde aus den jeweiligen Gamma-Ray-Logs die Wärmeproduktionsrate A für die stratigraphischen Modelleinheiten nach dem empirischen Ansatz von Bucker & Rybach (1996) berechnet.

$$A = 0.0158 (GR-0.8)$$

mit

$$A = \text{radiogene Wärmeproduktion } [\mu\text{W m}^{-3}]$$

$$GR = \text{Gamma-Ray-Werte [API]}$$

In der Tabelle 3.6.2.5.5-1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Durchschnittswerte der ermittelten Wärmeproduktionsraten der Modelleinheiten zusammenfassend dargestellt.

Tab. 3.6.2.5.5-1: Statistische Werte zur Wärmeproduktionsrate in $\mu\text{W m}^{-3}$, die aus dem Gamma-Ray-Log berechnet wurden.

Einheit	Min	Max	Mean	Std.abw.
Pleistozäne und pliozäne Lockergesteine (bis blg)	0,35	1,80	1,08	0,33
Tertiäre Landau-Formation (bis bhy)	0,21	1,93	1,02	0,20
Tertiäre Froidefontaine- bis Bruchsal-Formation (bis bff)	0,43	2,88	1,16	0,26
Tertiäre Schliegen- bis Pechelbronn-Formation (bis bt)	0,31	0,24	1,37	0,24
Keuper und Jura (bis bku)	0,17	4,41	1,63	0,34
Oberer Muschelkalk und Obere Dolomit-Formation des Mittleren Muschelkalks (bis tms)	0,39	2,67	1,05	0,36
Unterer und Mittlerer Muschelkalk (bis bmu)	0,54	2,88	1,39	0,52
Perm und Buntsandstein (bis tkr)	0,28	2,92	1,07	0,37
Kristallin (kr)	1,91	6,89	3,92	0,51

Die Wärmeproduktionsrate variiert in den tertiären und mesozoischen Sedimentabfolgen zwischen $1,02 \mu\text{W m}^{-3}$ und $1,63 \mu\text{W m}^{-3}$, wobei die Unterschiede im Wesentlichen auf den Tonanteil zurückzuführen sind. Im granitischen Kristallin, mit seinen hohen Gehalten an radioaktiven Elementen Kalium, Thorium und Uran, ist der Wert der Wärmeproduktion mit $3,92 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ deutlich erhöht.

Literaturhinweise Bucker & Rybach (1996), Geophysica (2012)



Das vorliegende Dokument ist Teil des „Fachlich-Technischen Abschlussberichts - Teil 3“ des INTERREG IV-Projekts „GeORG – Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben“.

Der komplette Bericht (Teil 1-4) ist unter www.geopotenziale.eu zum Download bereit gestellt.



3.6.2.6 Konduktives Temperaturmodell

Ziel: Erstellung eines konduktiven 3D-Temperaturmodells im „Pilotgebiet Hydrogeologie“

Kurzbeschreibung

Erstellung eines konduktiven 3D-Temperaturmodells im „Pilotgebiet Hydrogeologie“ zwischen Rastatt und Landau auf Grundlage von Logauswertungen

Eingangsdaten

Porosität, Matrixwärmeleitfähigkeit, Effektive Wärmeleitfähigkeit, Wärmeproduktion

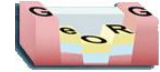
Beschreibung

Beschreibung des Modellaufbaus, der Modellkalibration und der Ergebnisse der konduktiven 3D-Temperaturmodellierung im „Pilotgebiet Hydrogeologie“

Literaturhinweise

Geophysica (2012)





3.6.2.6.1 Modellaufbau

Ziel: Aufbau des konduktiven 3D-Temperaturmodells

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Modelleigenschaften und des technischen Workflows zur Modellerstellung

Eingangsdaten

Porosität, Matrixwärmeleitfähigkeit, Effektive Wärmeleitfähigkeit, Wärmeproduktion und weitere Modellrandbedingungen

Beschreibung

Für die dreidimensionale Simulation des Wärmetransports wurde der Programmcode „Shemat-Suite“ (Rath et al., 2006) verwendet, welcher in seiner ursprünglichen Form auf dem Finite-Differenzen (FD) Programm „SHEMAT“ (Clauser 2003) basiert.

Die Geometriedaten wurden aus dem im Rahmen des GeORG-Projektes erstellten geologischen Modells ausgelesen. Die Lage des Temperaturmodellgebietes ist in Abb. 3.6.2.6.1-1 dargestellt.

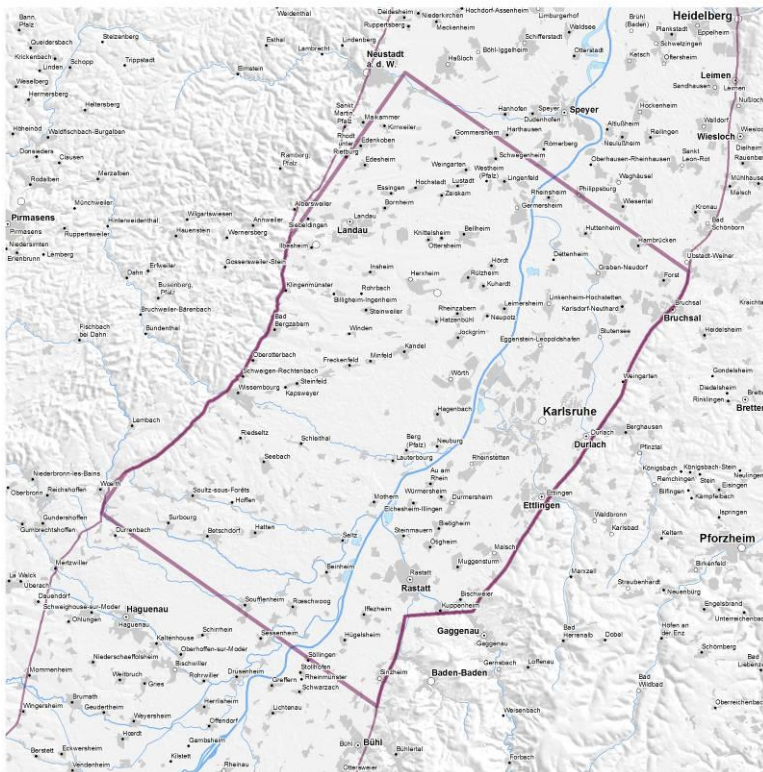


Abb. 3.6.2.6.1-1: Lage des konduktiven Temperaturmodells (dicke Linie) im GeORG-Modellgebiet (dünne Linien).

Das Temperaturmodell ist vertikal aus neun Modellschichten aufgebaut, die denen des geologischen 3D-Modells entsprechen (vgl. Kap. 3.5). Der geologische Bau ist durch zahlreiche Störungen stark kompliziert. Diese Komplexität ließ einen direkten Export eines Gitters („Voxel“) aus GoCad nicht zu, so dass auf die Software Argus ONE (Open Numerical Environments) zurückgegriffen wurde, welche es ermöglichte, die als ASCII-Punktdatei (xyz) aus GoCad exportierten Daten einzulesen und das numerische Modell mittels einer flexibel gestalteten Skriptsprache zu erstellen (siehe Abb. 3.6.2.6.1-2). Diese Vorgehensweise erlaubt es, an beliebiger Stelle des Modells Gitter mit unterschiedlicher Ausdehnung zu erstellen. Wegen des FD-



Programms muss das Gitter rechtwinklig sein (siehe Abb. 3.6.2.6.1-1).

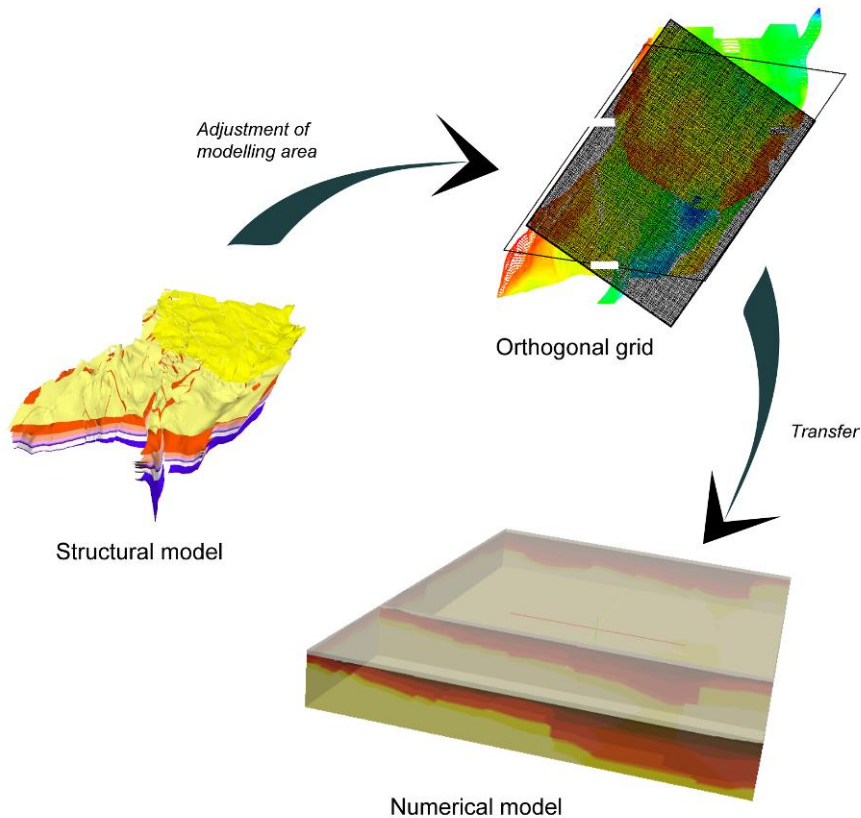


Abb. 3.6.2.6.1-2: Überführung des digitalen Strukturmodells (links) in das numerische Modell mit der Software Argus ONE. Überführung des Modellgebietes in das Programm „shemat suite“ unter Berücksichtigung eines rechtwinkligen Modellgitters.

Aufgrund der Größe des Modellgebietes von 41,04 km x 58,34 km in horizontaler und 5,6 km in vertikaler Ausdehnung wurde eine Auflösung von 250 m in horizontaler und 56 m in vertikaler Richtung gewählt. Die zur Verfügung stehende Linux Workstation mit einem 6-Kern Prozessor und 12 GB RAM ermöglichte es, das resultierende Modell mit fast 4 Millionen Gitterknoten zu berechnen.

Das regionale Temperaturmodell wird als ein rein konduktives thermisches Regime berechnet. Das bedeutet, dass auf dem FD-Gitter nur die Wärmetransportgleichung gelöst wird. Die Wärmeleitfähigkeit wird im Modell temperaturabhängig berechnet, da sie je nach Gestein und Temperatur beträchtlich variiert. Im Programm Shemat-Suite wird diese Temperaturabhängigkeit nach Zoth & Hänel (1988) berechnet.

Am oberen Modellrand wird über eine feste Temperaturvorgabe eine Dirichlet-Randbedingung gesetzt. Sie ist die mittlere Jahrestemperatur an der Bodenoberfläche, welche je nach Bodenbeschaffenheit und Klima (Niederschlag, Schneebedeckung etc.) bis zu 2 bis 3 K über der mittleren Jahrestemperatur der Luft liegen kann (z.B. Smerdon et al. 2006). Da das Modellgebiet relativ groß ist und die Temperaturdaten für eine lokal aufgelöste Bestimmung der Bodentemperatur nicht ausreichen, wurde zu den mittleren Jahrestemperaturen als konservative Näherung 1 K addiert und die Höhenabhängigkeit der Temperatur berücksichtigt (adiabatische Temperaturabnahme von 0,6 K pro 100 m).



Die untere Randbedingung stellt der basale Wärmestrom dar. Hier gibt es kompilierte Daten in Werner & Parini (1980) sowie Hurter & Hänel (2002), welche aber die advective Beeinflussung beinhalten (Werte zwischen 80 und über 120 mW m⁻²) und nicht den reinen basalen Wärmestrom darstellen. Daher muss diese Randbedingung über Testläufe angepasst werden (siehe nächstes Kapitel). Die Eigenschaften des geothermischen Modells sind in Tab. 3.6.2.6.1-1 und Tab. 3.6.2.6.1-2 zusammengefasst (zur Ableitung dieser Eigenschaften siehe Kap. 3.6.2.5).

Tab. 3.6.2.6.1-1: Eigenschaften des geothermischen 3-D Modells.

Parameter	Wert
Modellgröße	41,04 km x 58,43 km x 5,6 km
Gittergröße, Auflösung	164 x 233 x 100; 250 m x 250 x 56m
Zellenanzahl	3 821 200
Basaler Wärmestrom q in 5 km Tiefe u. NN	86 mW m ⁻²
Oberflächentemperatur	Je nach Topographie, bei 100 m ü. NN: 11 °C
Geologische Einheiten	9
Thermische Randbedingungen	Oben: T konstant., unten: q konstant
Wärmeleitfähigkeit	f(T)

Tab. 3.6.2.6.1-2: Thermische Eigenschaften des Modells, ermittelt nach den oben beschriebenen Methoden (Durchschnittswerte, ermittelt aus der Loganalyse). Im Zuge der iterativen Modellanpassung wurden für zwei Modelleinheiten die effektiven Wärmeleitfähigkeiten modifiziert (fett), um eine bessere Anpassung an gemessene Temperaturen zu erzielen.

Einheit	Porosität	Matrixwärmeleitfähigkeit [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Eff. Wärmeleitfähigkeit [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Wärmeproduktion [μW m ⁻³]
Pleistozäne und pliozäne Lockergesteine (bis blg)	0,35	3,26	1,71	1,08
Tertiäre Landau-Formation (bis bhy)	0,21	2,72	1,97 (1,90)	1,02
Tertiäre Froidefontaine- bis Bruchsal-Formation (bis bff)	0,18	2,57	2,00	1,16
Tertiäre Schliengen- bis Pechelbronn-Formation (bis bt)	0,14	2,29	1,92	1,37
Keuper und Jura (bis bku)	0,04	1,82	1,75	1,63
Oberer Muschelkalk und Obere Dolomite des Mittleren Muschelkalks (bis tms)	0,01	2,39	2,38	1,05
Unterer und Mittlerer Muschelkalk (bis bmu)	0,01	2,22	2,20	1,39
Perm und Buntsandstein (bis tkr)	0,05	3,65	3,38	1,07
Kristallin (kr)	0,01	3,65	3,65 (4,20)	3,92

Für die Modellierung wurden zwei verschiedene Ansätze gewählt. Zunächst wurde jede Modelleinheit mit der effektiven Wärmeleitfähigkeit belegt, wie sie aus der Datenanalyse resultierte. Zusätzlich wurde aufgrund der ermittelten Tiefenabhängigkeit der Porosität im Tertiär eine Modifizierung des Programmcodes vorgenommen. Danach variieren die Porositäten je nach Tiefenlage, so dass keine effektive Wärmeleitfähigkeit in das Modell eingeht, sondern im Modell eine effektive Wärmeleitfähigkeit aus den Porositäten und





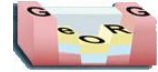
Matrixwärmeleitfähigkeiten über das geometrische Mittel berechnet wird. Dabei werden die Porositäten an der Oberfläche auf 35 % gesetzt und nehmen linear bis zu 1000 m u. GOK auf 10 % ab. Für tertiäre Abfolgen, die tiefer als 1000 m unter Gelände liegen, wird die Porosität bei 10 % festgehalten. Für die darunter folgenden mesozoischen und älteren Schichtglieder wird grundsätzlich kein Porositätstrend angenommen.

Als weitere Modelleingangsgröße wird die Wärmeproduktionsrate berücksichtigt, die durch den radioaktiven Zerfall der natürlich auftretenden Radionuklide bestimmt wird (siehe Tab. 3.6.2.6.1-2 und Kap. 2.6.2.5.4).

Literaturhinweise, Externe Links

Clauser (2003), Rath et al. (2006), Zoth & Hänel (1988), Geophysica (2012)
www.argusint.com





3.6.2.6.2 Stationäre Modellierung des Temperaturfeldes

Ziel: Modellkalibrierung und Darstellung der Ergebnisse

Kurzbeschreibung

Kalibrierung des Modells mit korrigierten BHT-Werten und Temperaturlogs.

Eingangsdaten

konduktives 3D-Temperaturmodell, korrigierte BHT-Werte

Beschreibung

Für die Modellkalibrierung wurden korrigierte BHT-Werte sowie Temperaturlogs aus verschiedenen Bohrungen benutzt (Datenquelle u.a. FIS-Geophysik und BRGM). Allerdings bilden viele dieser Logs gestörte Temperaturverteilungen ab. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass Messungen z. T. kurz nach Bohrende durchgeführt wurden. Andererseits können sich sowohl in den Temperaturdaten der Logs als auch der BHT-Messungen Bereiche mit thermischen Anomalien, also mit natürlichem, advektivem Wärmetransport abzeichnen.

Die Ergebnisse der Simulationsläufe unter rein konduktiven Bedingungen wurden mit gemessenen Temperaturlogs aus Bohrungen in Beziehung gesetzt. An den meisten Standorten treten erhebliche Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Temperaturen auf, was auf die oben genannten Effekte zurückzuführen ist (z. B. Abb. 3.6.2.6.2-1). Lediglich eine Bohrung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (siehe Abb. 3.6.2.6.2-2). Es ist davon auszugehen, dass dieses Temperaturprofil weitgehend ein konduktives Temperaturfeld nachzeichnet und für eine Kalibrierung des Temperaturmodells geeignet ist.



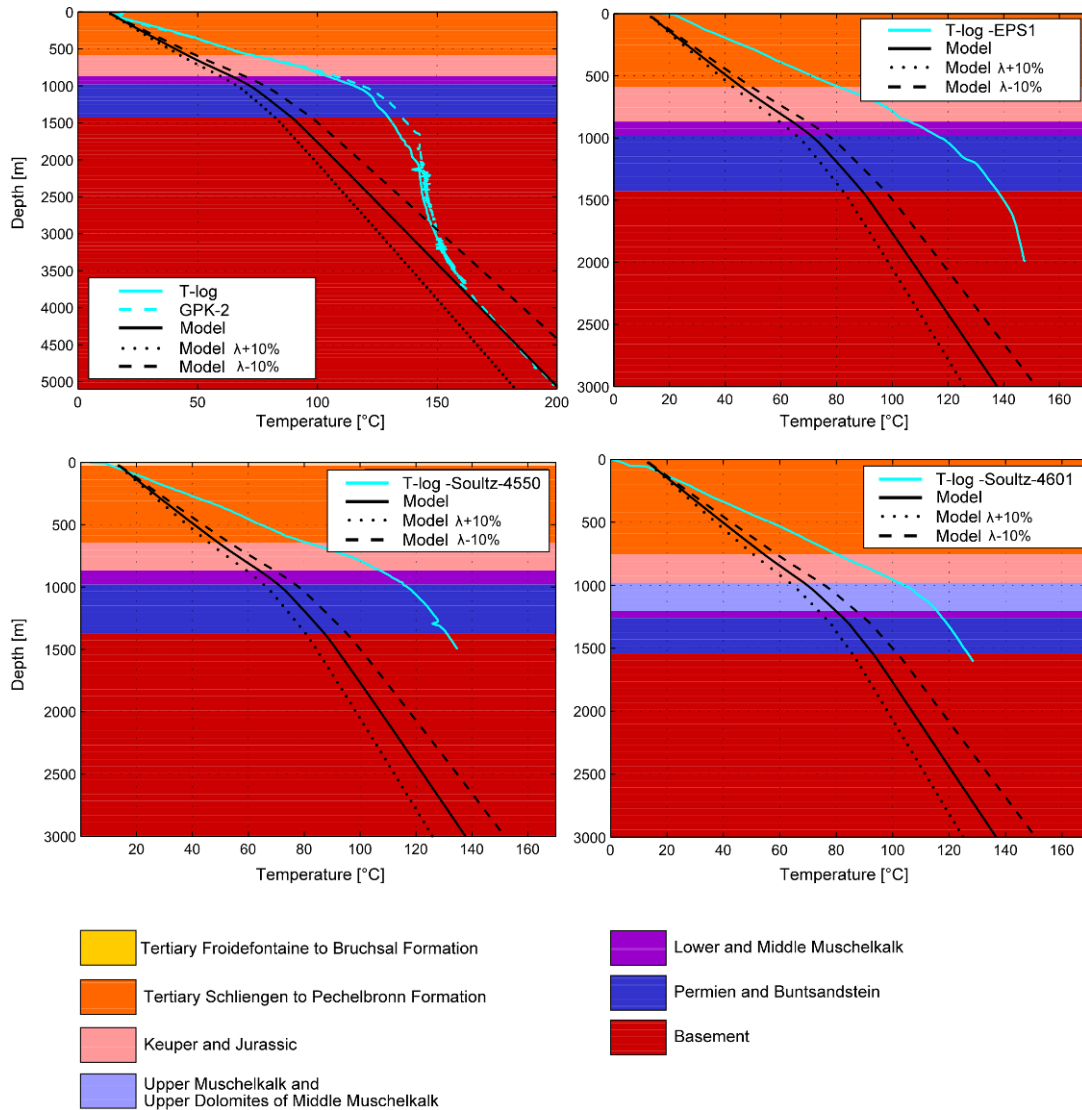


Abb. 3.6.2.6.2-1: Vergleich von Modellergebnissen und gemessenen Temperaturen: Bohrungen im Bereich Soutlz-sous-Forêts. Die Temperaturlogs sind ungestört (Genter et al. 2010). Somit sind die Abweichungen zum konduktiven Modell auf advektiven Wärmetransport zurückzuführen.

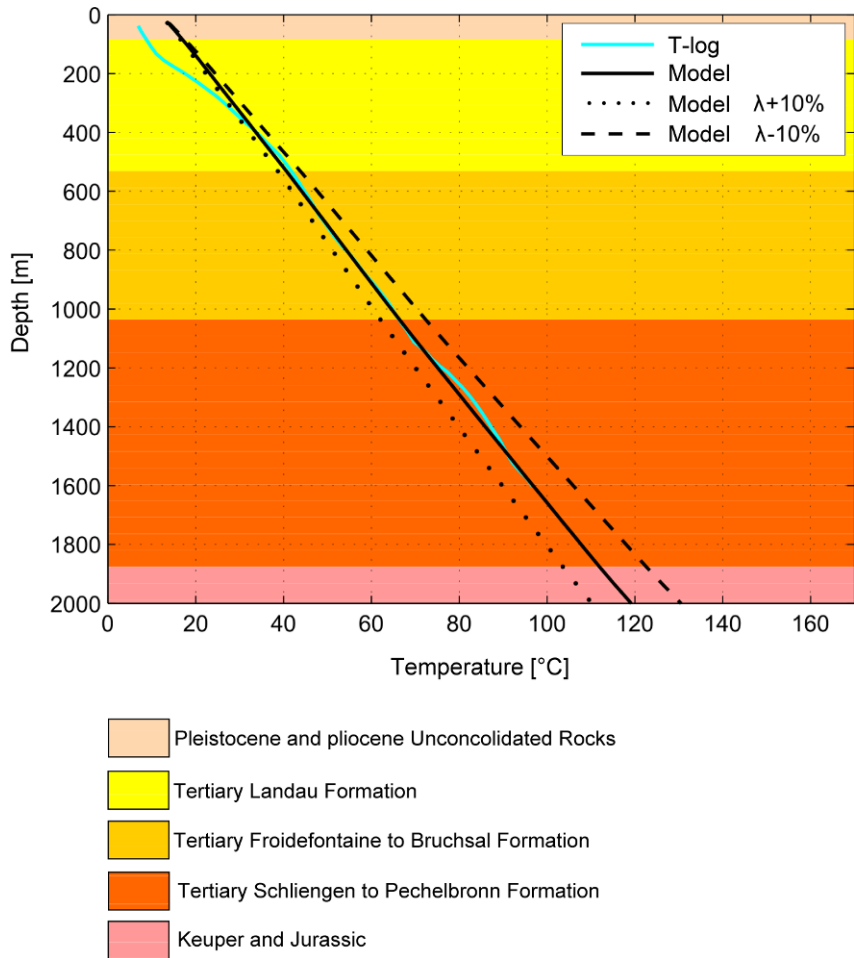
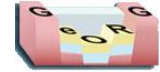


Abb. 3.6.2.6.2-2: Vergleich von Modellergebnissen und gemessenen Temperaturen. Das offenbar ungestörte Log eignet sich zur Kalibrierung des konduktiven Temperaturmodells.

Weiterhin wurde die Sensitivität des Temperaturfeldes gegenüber dem Wärmestrom an der Basis des Modells an diesem Profil getestet. Es zeigt sich, dass ein Wert von 86 mW m^{-2} an der Modellbasis von -5000 m NN die Daten gut wider spiegelt. Diese Werte werden auch in anderen Publikationen bestätigt (Clauser & Villinger 1990, Schellschmidt & Schulz 1992, Genter et al. 2010). Schellschmidt & Schulz (1992) geben für das kristalline Basement in Soutz-sous-Forêts einen Wert von $82 \pm 8 \text{ mW m}^{-2}$ an, welcher gut mit den in dieser Studie bestimmten Werten übereinstimmt. Auch der von Clauser (1988) auf verschiedene Arten bestimmte basale Wärmestrom im Oberrheingraben von 80 mW m^{-2} bis 88 mW m^{-2} liegt in diesem Bereich.

Dies zeigt auch der Modellvergleich mit den Daten aus Soutz-sous-Forêts (siehe Abb. 3.6.2.6.2-1). Während im oberen Bereich der untersuchten Bohrung offensichtlich eine advective Beeinflussung des Temperaturprofils vorherrscht (siehe auch Schellschmidt & Schulz 1992), werden im Bohrlochtiefsten die Temperaturen mit dem Modell gut reproduziert.

Um die Sensitivität des Temperaturfeldes gegenüber der Wärmeleitfähigkeit zu untersuchen, wurden die ermittelten Mittelwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Modellschichten (siehe Tab. 3.6.2.6.1-2) um 10 % erhöht bzw. erniedrigt und die Temperaturverteilung mit diesen modifizierten Werten modelliert. Die Ergebnisse wurden für verschiedene Bohrungen dargestellt (vgl. Abb. 3.6.2.6.2-1, Abb. 3.6.2.6.2-2). Die sich daraus ergebende Variation kann je nach Tiefenlage einen erheblichen Einfluss auf die vorhergesagte Temperatur haben. Sie beträgt bei -2000 m NN in der in Abb. 3.6.2.6.2-2 dargestellten Bohrung bereits ca. 18 K.



In Abb. 3.6.2.6.2-1 sind für einige Bohrungen die Abweichungen zwischen den mit dem konduktiven Modell errechneten Temperaturen und 802 korrigierten BHT-Werten in der entsprechenden Tiefe dargestellt. Die Güte der Korrektur kann vielfach nicht eindeutig bestimmt werden. Nach Hermanrud et al. (1990) können die Abweichungen vom wahren Wert auch nach der Korrektur noch bis zu 9 K betragen. Aus diesem Grund und auch wegen den natürlichen Störungen durch advektiven Wärmetransport eignen sich die BHT-Werte nur sehr bedingt zur Modellkalibrierung. Trotzdem erlaubt die Darstellung der Temperaturabweichungen zwischen Modell und gemessenen Werten eine zumindest teilweise quantitative Aussage über die flächenhafte Verteilung der Bereiche mit erhöhtem advektiven Wärmetransport. Sehr deutlich wird dies in den Bereichen Landau und Soultz-sous-Forêts, wo starke positive Anomalien beobachtet werden (rote Kreise in den Abbildungen). Die rosa bis weißen Kreise deuten Bereiche an, in denen nur eine geringe bis keine Abweichung zwischen modellierten Temperaturen und gemessenen Werten vorliegt. Dort dominiert somit der konduktive Temperaturtransport. Diese guten Übereinstimmungen finden sich vor allem im zentralen Bereich des Grabens. Insbesondere in den flacheren Bohrungen im Nordosten des geothermischen Modellgebietes liegen die modellierten Temperaturen über den gemessenen. Dort herrschen in den zu Grundwassermessstellen ausgebauten Bohrungen nach unten gerichtete Vertikalströmungen vor.

Die radiogene Wärmeproduktion trägt zu einer Zunahme des Wärmestroms mit abnehmender Teufe bei, da zu der basalen Wärmestromdichte als konstante Randbedingung am unteren Modellrand das Produkt aus Teufenabschnitt und zugehöriger Wärmeproduktion hinzu kommt. Das bedeutet, dass an der Oberfläche der Wärmestrom einige mW m^{-2} höher ist und je nach den Mächtigkeiten der einzelnen Schichten variieren kann. Das Kristallin hat beispielsweise eine relativ hohe Wärmeproduktionsrate von knapp $4 \mu\text{W m}^{-3}$, so dass der Wärmestrom um 4mW m^{-2} pro 1000 m Schichtmächtigkeit zunimmt. Als Beispiel ist für den Standort Soultz-sous-Forêts der Beitrag der radiogenen Wärmeproduktion am Wärmestrom dargestellt (siehe Abb. 3.6.2.6.2-3). Aus den Schichtmächtigkeiten und entsprechenden Wärmeproduktionsraten kann somit analog für jeden Standort der Beitrag der radiogenen Wärmeproduktion zur Wärmestromdichte an der Oberfläche berechnet werden.



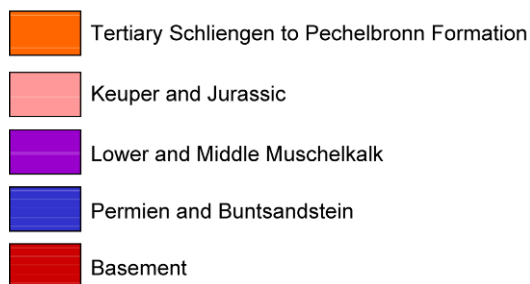
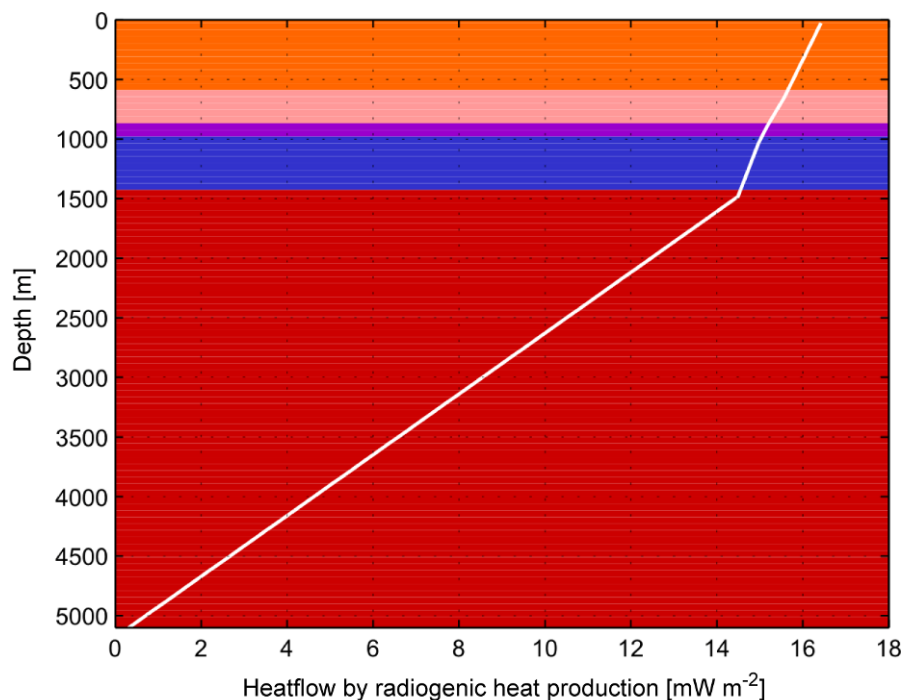


Abb. 3.6.2.6.2-3: Radiogene Wärmeproduktion [mW m^{-2}] am Standort Soutz-sous-Forêts. Der gesamte Wärmestrom setzt sich aus dem basalen Wärmestrom von 86 mW m^{-2} und den hier dargestellten Werten in der jeweiligen Tiefe zusammen.

Literaturhinweise

Geophysica (2012), Clauser & Villinger (1990), Schellschmidt & Schulz (1992), Genter et al. (2010)



3.7 Geopotenzialkarten

Ziel: Ableitung flächenhafter Informationen zu Geopotenzialen und Darstellung der Ergebnisse in Kartenform

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Ableitung unterschiedlicher Nutzungspotenziale und Erstellung von Geopotenzialkarten: Eingangsdatensätze, Bewertungsgrundlagen, GIS-Workflow

Eingangsdaten

Abgeleitete digitale Datensätze aus dem geologischen 3D-Modell und dem Temperaturmodell

Beschreibung

Die Geopotenzialkarten geben flächenhaft für das Projektgebiet Auskunft zu verschiedenen Geopotenzialthemen.

Für die folgenden Themen wurden Geopotenzialkarten erstellt:

- Temperaturen in unterschiedlicher Tiefe
(6 Karten: 500 - 3000 m unter Gelände in 500 m- Schritten)
- Geothermische Potenzialabschätzungen auf Grundlage der Temperaturen in unterschiedlicher Tiefe
(6 Karten: 500 - 3000 m unter Gelände in 500 m- Schritten)
- Tiefenlage unterschiedlicher Isothermen
(3 Karten: 60, 100 und 150 °C)
- Geologische Schnitte entlang unterschiedlicher Isothermen
(3 Karten: 60, 100 und 150 °C)
- Temperaturen an der Oberfläche geothermischer Einheiten
(6 Karten)
- Geothermische Potenzialabschätzung auf Grundlage der Temperaturen an der Oberfläche geothermischer Einheiten
(6 Karten)
- Gewinnbare Wärmemenge geothermischer Einheiten
(5 Karten)
- Speicher- und Barrierepotenzial für die Gasspeicherung
(10 Karten: 6 Speicher- und 4 Barrierekomplexe)



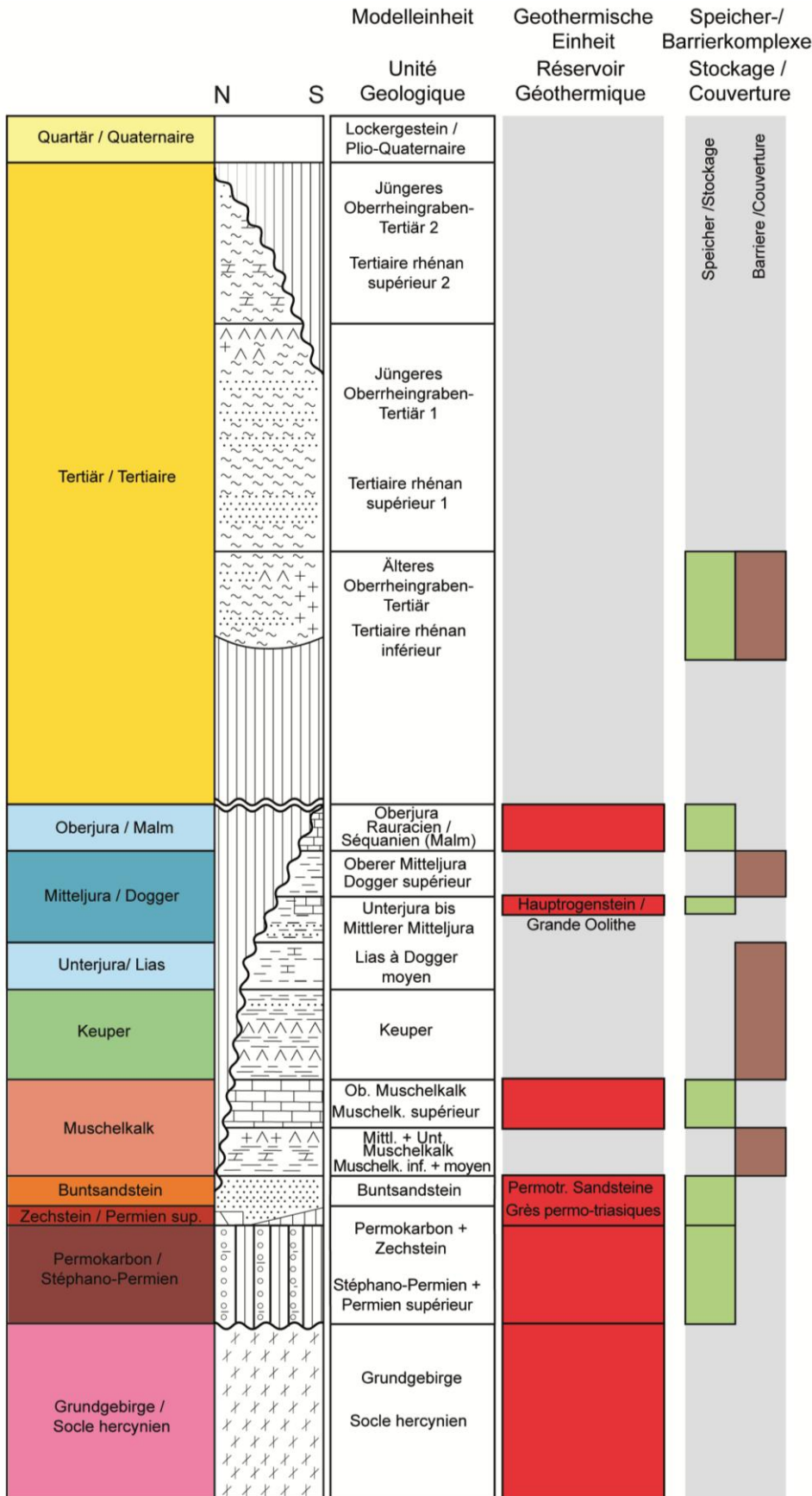
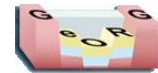


Abb. 3.7-1: Säulenprofil (aus FTA 1: 1.5-01)





Die jeweiligen Unterkapitel (3.7.1, 3.7.2, 3.7.3) beschreiben die jeweiligen Eingangsdaten und Bewertungsgrundlagen sowie den GIS- Workflow.

Kapitelverweise

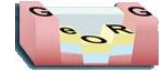
3.6 (Geothermisches 3D-Modell), 3.5 (Geologische 3D-Modellierung), 3.7.1, 3.7.2, 3.7.3

2.4

Atlasblätter

5.1.1 - 6.10





3.7.1 Ableitung des Nutzungspotenzials für Gasspeicher

Ziel: Ableitung flächenhafter Informationen zum Nutzungspotenzial für Gasspeicher und Darstellung der Ergebnisse in Kartenform

Kurzbeschreibung

Ableitung des Nutzungspotenzials für Gasspeicher und Erstellung der Speicher- und Barrierepotenzialkarten: Eingangsdatensätze, Bewertungsgrundlagen, GIS-Workflow

Eingangsdaten

digitale Daten zu Mächtigkeiten und Tiefenlage der betrachteten Einheiten aus dem geologischen 3D-Modell

Beschreibung

Das Kapitel beschreibt die Vorgehensweise zur Ableitung des Nutzungspotenzials für Gasspeicher, vornehmlich zur Speicherung von CO₂ (Bewertungskriterien). Zur fachlichen Diskussion siehe Kapitel 2.4.8.

Eingangsdaten für die Bewertung bilden digitale Daten zur Schichtlagerung und Mächtigkeit, abgeleitet aus dem geologischen 3D-Modell. Die Bewertungskriterien basieren auf der Tiefenlage und Mächtigkeit von Speicher- und Barrierekomplexe.

Folgende Speicher- (SK) und Barrierekomplexe (BK) wurden bearbeitet:

- Älteres Oberrheingraben-Tertiär (SK und BK)
- Oberjura (SK)
- Oberer Mitteljura (BK)
- Hauptrogenstein (SK)
- Keuper und Unterjura (BK)
- Oberer Muschelkalk (SK)
- Unterer und Mittlerer Muschelkalk (BK)
- Permotriassische Sandsteine (SK)
- Permokarbon (SK)

Kapitelverweise

2.4.8

Atlasblätter

6.1 - 6.10





3.7.1.1 Eingangsdaten

Ziel: Ableitung benötigter Daten für die Potenzialbewertung ausgewählter Potenzialeinheiten für die Gasspeicherung

Kurzbeschreibung

Beschreibung der Eingangsdaten für die Potenzialbewertung ausgewählter Einheiten als Speicher- oder Barrierekomplex für die Gasspeicherung

Eingangsdaten

Digitale Daten zu Mächtigkeiten und Tiefenlage der betrachteten Einheiten aus dem geologischen 3D-Modell

Beschreibung

Die Eingangsdaten für die Ableitung des Nutzungspotenzials für die Gasspeicherung stammen aus dem geologischen 3D-Modell (Schichtlagerung sowie z.T. Mächtigkeiten) bzw. aus Mächtigkeitsverteilungen die in die geologische 3D-Modellierung eingeflossen sind (siehe Kapitel 3.5)

Kapitelverweise

3.2.2.4 (Mächtigkeitsverteilungen)

3.5 (Geologische 3D-Modellierung)

3.5.10 (Ableitung von Produkten aus dem geologischen 3D-Modell)

Atlasblätter

6.1 - 6.10





3.7.1.2 Bewertungskriterien

Ziel: Wahl geeigneter Kriterien zur Potenzialabschätzung für Gasspeicher

Kurzbeschreibung

Beschreibung der verwendeten Bewertungskriterien für die Potenzialbewertung ausgewählter Einheiten als Speicher- oder Barrierekomplex für die Gasspeicherung

Beschreibung

Die Klassifikation von Speicher- und Barrierekomplexen basiert auf der Mächtigkeit und der Tiefenlage der Speicher- und Barrieregesteine (Diamond et al. 2010, Müller & Reinhold 2011). Die Klassenbildung richtet sich nach folgenden Grenzwerten:

- Speicherkomplexe: Mächtigkeit > 10 m, Tiefenlage der Oberfläche > 800 m unter Gelände,
- Barrierekomplexe: Mächtigkeit > 20 m, Tiefenlage der Basis > 800 m unter Gelände.

Für die Ableitung der Potenziale wird daher benötigt:

Speicherpotenzial:

- Schichtlagerung an der Oberfläche des Speicherkomplexes
- Mächtigkeit des Speicherkomplexes

Barrierepotenzial:

- Schichtlagerung an der Basis des Barrierekomplexes
- Mächtigkeit des Barrierekomplexes

Die für die Speicherung von CO₂ nach wirtschaftlich-technischen Randbedingungen günstigen Bereiche zwischen 1000 bis 2500 m unter Gelände werden in den Geopotenzialkarten farblich gesondert dargestellt.

Eine ausführliche Diskussion der Bewertungskriterien zur Potenzialabschätzung für Gasspeicher erfolgt in Kapitel 2.4.8 (FTA Teil 2).

Literaturhinweise

Diamond, Leu & Chevalier (2010), Müller & Reinhold (Hrsg.) (2011)

Kapitelverweise

3.5 (Geologische 3D-Modellierung)

3.7.1 (Eingangsdaten)

2.4.8.1

Atlasblätter

6.1 - 6.10



3.7.1.3 Auswertung und Datenexport

Ziel: Erstellung der Potenzialkarten

Kurzbeschreibung

Auf Grundlage der Bewertungskriterien werden die Eingangsdaten in einem ArcGIS- Workflow verarbeitet. Die fertigen Shape- und Raster-Daten bilden die Eingangsdaten für die kartographische Umsetzung (in Form von Karten für Druck und Mapviewer).

Eingangsdaten

Digitale Daten zu Mächtigkeiten und Tiefenlage der betrachteten Einheiten aus dem geologischen 3D-Modell

Beschreibung

- Kriterium Mächtigkeit (*Thickness (Raster)*):

- Reklassifizierung (*Reclassify*) für Speicherkomplexe: 0 - 10 m (*class = 1*) und > 10 m (*class = 2*)
- Reklassifizierung (*Reclassify*) für Barrierekomplexe: 0 - 20 m (*class = 1*) und > 20 m (*class = 2*)
- Umwandlung in Flächenpolygone (*Convert to Shapefile*)

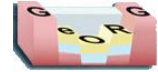
- Kriterium Tiefenlage (*Position base/top (Raster)*):

- Umrechnung von mNN auf m unter Gelände
- Reklassifizierung: 0 - 800 m (*class = 1*) und > 800 m (*class = 2*)
- Umwandlung in Flächenpolygone (*Convert to Shapefile*)

- Kombination der Mächtigkeits- und Tiefenlage-Information:

- Verknüpfung der Polygon-Daten („Union“) (*Combine Shapefiles*)
- Selektion aller Flächen ohne Potenzial (*area without potential*) (mindestens einmal *class = 1*)
- Selektion aller Flächen mit Potenzial (*area with potential*) (nur *class = 2*)
- Verschneidung der Raster der Tiefenlage mit Potenzialflächen (*Clip Raster: depth information in area with potential*)





3.7.1-1 Storage potential (CCS)

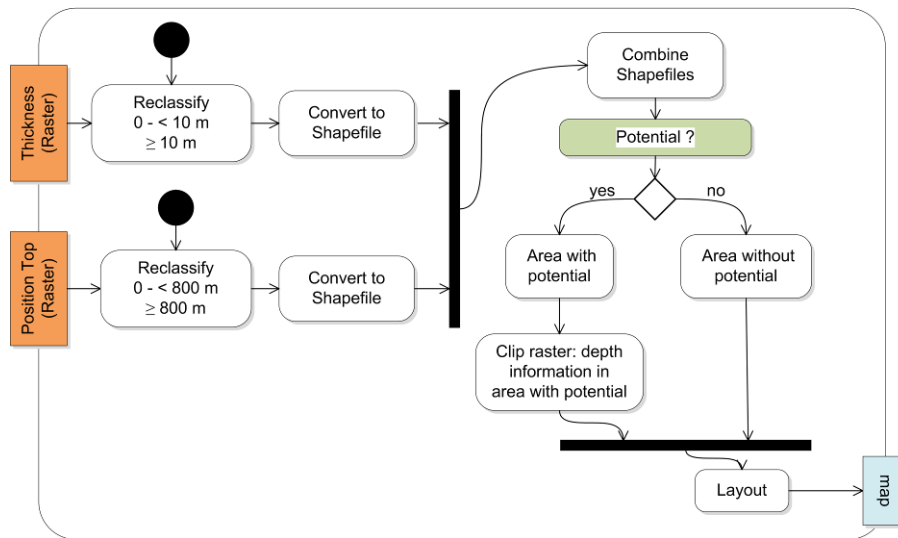


Abb. 3.7.1-1: UML-Workflow Ableitung Speicherpotenzial

3.7.1-2 Cap rock potential (CCS)

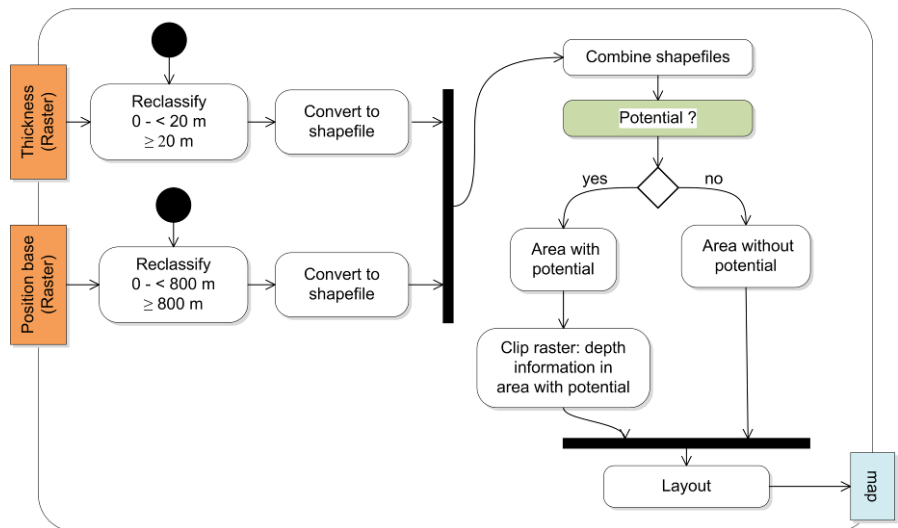


Abb. 3.7.1-2: UML-Workflow Ableitung Barrieropotenzial

Ergebnis:

Flächenpolygon aller Flächen ohne Potenzial und Raster der Tiefenlage in Bereichen mit Potenzial

Atlasblätter

6.1 - 6.10



3.7.2 Ableitung des Geothermischen Potentials

Ziel: Ableitung flächenhafter Informationen zum geothermischen Potenzial und Darstellung der Ergebnisse in Kartenform

Kurzbeschreibung

Ableitung des geothermischen Potentials und Erstellung der Geothermischen Potenzialkarten: Eingangsdatensätze, Bewertungsgrundlagen, GIS-Workflow

Eingangsdaten

- Temperaturdaten aus geostatistischem Temperaturmodell
- Verschnitt des geostatistischen Temperaturmodells mit dem geologischen 3D-Modell

Beschreibung

Das Kapitel beschreibt die Vorgehensweise zur Ableitung des geothermischen Potentials. Zur fachlichen Diskussion siehe Kapitel 2.4 (FTA Teil 2).

Eingangsdaten für die Bewertung bilden digitale Daten aus dem geostatistischen Temperaturmodell sowie dessen Verschnitt mit dem geologischen 3D-Modell.

Für die folgenden Themen wurden Potenzialkarten erstellt:

- Temperaturen in [m unter Gelände] für die Tiefenstufen 500, 1000, 1500, 2000, 2500 und 3000
- Geothermisches Potenzial auf Grundlage der Temperatur für die Tiefenstufen 500, 1000, 1500, 2000, 2500 und 3000 m unter Gelände
- Tiefenlage in [m unter Gelände] für die Isothermen 60, 100 und 150 °C
- Geologischer Schnitt in [m unter Gelände] entlang der Isothermen 60, 100 und 150 °C
- Temperaturen in [°C] an der Oberfläche der geothermischen Einheiten Oberjura, Hauptrogenstein, Oberer Muschelkalk, Buntsandstein, Permokarbon und Grundgebirge
- Geothermisches Potenzial auf Grundlage der Temperaturen an der Oberfläche der geothermischen Einheiten Oberjura, Hauptrogenstein, Oberer Muschelkalk, Buntsandstein, Permokarbon und Grundgebirge

Kapitelverweise

2.4.5 (Temperaturverteilung im Untergrund)

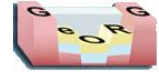
2.4.6 (Geothermische Einheiten)

3.6.1.6 (Geostatistische Temperaturmodellierung: Auswertung und Datenexport)

Atlasblätter

5.1.1 - 5.15.2





3.7.2.1 Eingangsdaten

Ziel: Ableitung benötigter Daten für die Potenzialbewertung geothermischer Einheiten

Kurzbeschreibung

Ableitung des geothermischen Potenzials und Erstellung der geothermischen Potenzialkarten: Eingangsdatensätze, Bewertungsgrundlagen, GIS-Arbeiten

Eingangsdaten

Temperaturdaten aus geostatistischem 3D-Modell, Daten aus geologischem 3D-Modell, Temperaturen an geologischen Horizonten (Kombination beider Modelle)

Beschreibung

Eingangsdatensätze sind im Gocad abgeleitet aus dem Temperaturmodell, der Kombination des Temperaturmodells mit dem geologischen 3D-Modell und dem geologischen 3D-Modell (Beschreibung zur Ableitung der Daten siehe 3.6.1.6)

Kapitelverweise

3.5.10 (Ableitung von Produkten aus dem geologischen 3D-Modell)

3.6.1.6 (Geostatistische Temperaturmodellierung: Auswertung und Datenexport)

Atlasblätter

5.1.1 - 5.15.2





3.7.2.2 Bewertungskriterien

Ziel: Wahl geeigneter Kriterien zur Bewertung des geothermischen Potenzials

Kurzbeschreibung

Beschreibung der verwendeten Bewertungskriterien für die Potenzialbewertung geothermischer Einheiten.

Beschreibung

Bewertungskriterien kommen nur bei den Karten der „Geothermische Potenzialabschätzung auf Grundlage der Temperatur“ zu tragen, da bei den übrigen Temperaturkarten die Temperaturen ohne Bewertung dargestellt werden.

Auf den Karten der geothermischen Potenzialabschätzung werden die Temperaturen in Temperaturklassen unterteilt, basierend auf den benötigten Temperaturen unterschiedlicher geothermaler Nutzung:

< 60 °C: balneologische Anwendung und Wärmeversorgung

≥ 60 - 100 °C: direkte Heizwärmegewinnung

> 100 - 150 °C: Stromerzeugung

> 150 °C: sehr hohes Potenzial für Stromerzeugung

Zur fachlichen Diskussion der Bewertungskriterien siehe Kapitel 2.4.2 (FTA Teil 2).

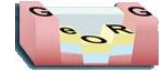
Kapitelverweise

2.4.2

Atlasblätter

5.1.1 - 5.15.2





3.7.2.3 Auswertung und Datenexport

Ziel: Erstellung von geothermischen Potenzialkarten

Kurzbeschreibung

Auswertung und Datenexport: Workflow in ArcGIS. Die fertigen Shapefile- und Rasterdaten bilden die Eingangsdaten für die kartographische Umsetzung (in Form von Karten für Druck und Mapviewer).

Eingangsdaten

Digitale Temperaturdaten aus dem geostatistischen Temperaturmodell sowie Daten der Verbreitung geothermischer Einheiten aus dem geologische 3D-Modell

Beschreibung

Kartenthema „Geothermisches Potenzial auf Grundlage der Temperatur für unterschiedliche Tiefenstufen“ und „Geothermisches Potenzial auf Grundlage der Temperaturen an der Oberfläche der geothermischen Einheiten“: Klassifizierung der Temperaturen nach geothermischer Nutzung (siehe Kapitel 3.7.3.2).

Für die Kartenthemen „Temperaturen in verschiedenen Tiefenstufen“, „Isothermen“, „Geologischer Schnitt entlang der Isothermen“ und „Temperaturen an der Oberfläche geothermischer Einheiten“ erfolgt nach der Import in ArcGIS und gis-technischer Nachbearbeitung keine weitere Potenzialbewertung.

Externe Links

<http://maps.geopotenziale.eu> (Mapviewer)

Kapitelverweise

3.5.10 (Ableitung von Produkten aus dem geologischen 3D-Modell)

3.6.1.6 (Geostatistische Temperaturmodellierung: Auswertung und Datenexport)

3.7.3.2

Atlasblätter

5.1.1 - 5.15.2





3.7.3 Abschätzung des Wärmeinhaltes und des technischen geothermischen Potenzials

Ziel: Ableitung flächenhafter Informationen zum geothermischen Potenzial („Heat in Place“) und Darstellung der Ergebnisse in Kartenform

Kurzbeschreibung

Ableitung des geothermischen Potenzials und Erstellung der Potenzialkarten zur gewinnbaren Wärmemenge: Eingangsdatensätze, Bewertungsgrundlagen, GIS-Workflow

Eingangsdaten

Geologisches 3D - Modell
Geostatistisches Temperaturmodell

Beschreibung

Für die geothermisch nutzbaren Einheiten wurden der Wärmeinhalt sowie das technische Potenzial zur geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) abgeschätzt. Der Wärmeinhalt entspricht der Wärmemenge, die bei der Abkühlung des Gesteins auf die Temperatur an der Erdoberfläche theoretisch gewonnen werden kann (Jung et al. 2002). Die nutzbare Wärmemenge ist der Teil des Wärmeinhalts, der technisch gewonnen bzw. genutzt werden kann. Er hängt von der Art der Nutzung und vom Erschließungskonzept ab.

Literaturhinweise

Jung et al. (2002)

Kapitelverweise

2.4.7 (Abschätzung des Wärmeinhalts und der theoretisch gewinnbaren Wärmemenge)

Atlasblätter

5.16 - 5.20





3.7.3.1 Eingangsdaten

Ziel: Ableitung flächenhafter Informationen zum technischen geothermischen Potenzial („Heat in Place“) und Darstellung der Ergebnisse in Kartenform

Kurzbeschreibung

Ableitung des technischen geothermischen Potenzials für Potenzialkarten der theoretisch gewinnbaren Wärmemenge in geothermischen Einheiten: Eingangsdatensätze, Bewertungsgrundlagen, GIS-Workflow

Eingangsdaten

Temperaturen, Mächtigkeiten und Schichtlagerungsdaten

Beschreibung

Für die Berechnung des Wärmeinhalts und der gewinnbaren Wärmemenge (siehe nächstes Kapitel) wurden aus dem geologischen 3D-Modell und dem geostatistischen Temperaturmodell für jede der geothermisch nutzbaren Einheiten folgende Datensätze abgeleitet (siehe Kapitel 3.5.10 und 3.6.1.6):

- Mächtigkeit
- Temperatur an der Oberfläche
- Temperatur an der Basis

Zusätzlich wurde der Datensatz der langjährigen Temperaturmittelwerte verwendet (Eingangsdatensatz für das geostatistische Temperaturmodell, siehe Kapitel 3.6.1.1.3 Bodentemperaturen).

Die benötigten Werte für Dichte und spezifische Wärmekapazitäten beruhen auf Daten aus der Labordatenbank des LGRB (Dichte) und einer beim LGRB durchgeführten Internetrecherche.

Kapitelverweise

- 3.2.2.4 (Mächtigkeitsverteilungen)
- 3.5.10 (Ableitung von Produkten aus dem geologischen 3D-Modell)
- 3.6.1.6 (Auswertung und Datenexport)
- 3.6.1.1.3 (Bodentemperaturen)

Atlasblätter

5.16 - 5.20



3.7.3.2 Methodik

Ziel: Berechnung des Wärmeinhalts und der gewinnbaren Wärmemenge für ausgewählte geothermische Einheiten

Kurzbeschreibung

Beschreibung der verwendeten Methodik für die Berechnung des Wärmeinhalts und der gewinnbaren Wärmemenge ausgewählter geothermischer Einheiten.

Eingangsdaten

Temperaturen, Mächtigkeiten und Schichtlagerungsdaten aus dem geologischen 3D-Modell und dem geostatistischen Temperaturmodell

Beschreibung

Die Abschätzung des Wärmeinhaltes und des technischen geothermischen Potenzials erfolgte nach der Volumenmethode von Muffler & Cataldi (1978), die u. a. auch bei Jung et al. (2002) für die Potenzialabschätzung in Deutschland und in modifizierter Form bei Dezayes et al. (2008) für den Buntsandstein im Oberrheingraben Anwendung fand (zur fachlichen Diskussion siehe Kapitel 2.4.7).

Beschreibung der Berechnungsmethode:

Wärmeinhalt

$$E_{th} = c_G * \rho_G * V * (T_G - T_S)$$

E_{th} : Wärmeinhalt [J] (*Heat in Place*)

c_G : spezifische Wärmekapazität des Gesteins [J/kg*K] (*Heat capacity*)

ρ_G : Dichte des Gesteins [kg/m³] (*Rock density*)

V : Gesteinsvolumen [m³] (*Volume*)

T_G : Temperatur des Gesteins [°C]

T_S : Temperatur an der Erdoberfläche [°C], mittlere Jahrestemperatur (*Average air temperature*)

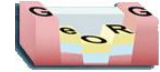
Umsetzung im Projekt:

a) spezifische Wärmekapazität [J/(kg*K)] und Dichte [kg/m³]

Tab. 3.7.3.2-01: verwendete Werte für Dichte und spezifische Wärmekapazität.

geothermische Einheit	Dichte (Rohdichte) [kg/m ³]	spez. Wärmekapazität [J/(kg*K)]
Hauptrogenstein Grande Oolithe	2600	740
Oberjura Rauracien/Séquanien (Malm)	2700	740
Oberer Muschelkalk Muschelkalk supérieur	2400	730
Permotriassische Sandsteine Grès permo-triasiques	2300	710
Grundgebirge Socle hercynien	2600	900



b) Volumen [m³]

Das Volumen wurde aus der Mächtigkeit der Einheit berechnet. Dazu wurden die Mächtigkeitsverteilungen verwendet die in die Modellierung des 3D-Modells eingingen, bzw. für den Hauptrogenstein und Oberjura wurde die Mächtigkeit aus dem 3D-Modell abgeleitet. Es wurde mit Gesamtmächtigkeiten gerechnet.

c) mittlere Temperatur [°C]

Die Gesteinstemperatur wurde als mittlere Temperatur der Einheit berechnet. (*Temperature at base, Temperature at top*)

d) Temperatur der Erdoberfläche [°C]

Verwendet wurde das Raster der Oberflächentemperaturen, das für die geostatistische Temperaturmodellierung erstellt wurde (siehe Kapitel 3.6.1.1.3).

gewinnbare Wärmemenge

$$E_n = R * E_{th}$$

E_n : gewinnbare Wärmemenge [J] (*Theoretically exploitable heat*)

R: Recovery Faktor (Gewinnungsfaktor) (*Recovery factor*), dimensionslos

E_{th} : Wärmeinhalt [J]

Umsetzung im Projekt

a) Wärmeinhalt [J]

Berechnung siehe oben

b) Recovery Faktor

$$R = R_F * R_T$$

Zur Berechnung verwendete Parameter:

R_F : Flächenfaktor (*Area factor*), 0,33 (nach Schellschmidt, Hurter 2003)

R_T : Temperaturfaktor = $((T_G - T_{IN}) / (\text{mittlere } T_G - T_S))$

T_{IN} : Injektionstemperatur (*Injection temperature*), 25 °C (nach Schellschmidt, Hurter 2003)

Für das Kristalline Grundgebirge wurden 2 Berechnungen durchgeführt:

- Berechnung für Bereiche über 100 °C und flacher als 5000 m unter Gelände
- Berechnung für Bereiche über 100 °C und bis 7000 m unter Gelände.

Literaturhinweise

Dezayes et al. (2008), Hurter & Schellschmidt (2003), Muffler & Cataldi (1972), Jung et al. (2002), Glassley (2010)

Kapitelverweise

3.6.1.1.3, 3.6.1.6.3, 3.5.10.2, 3.6.1.6.1

Atlasblätter

5.16 - 5.20





3.7.3.3 Auswertung und Datenexport

Ziel: Erstellung von Potenzialkarten

Kurzbeschreibung

Auf Grundlage der Bewertungskriterien werden die Eingangsdaten in einem ArcGIS-Workflow verarbeitet. Die fertigen Rasterdaten bilden die Eingangsdaten für die kartographische Umsetzung in Form von Karten für Druck und Mapviewer.

Eingangsdaten

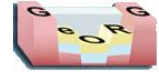
Digitale Daten aus dem geologischen 3D-Modell und dem geostatistischen Temperaturmodell, Werte für Gesteinsdichte und spezifische Wärmekapazität aus Literaturrecherche und LGRB-Labordatenbank

Beschreibung

Für die in Kapitel 3.7.3.2 beschriebene Formel werden eine Reihe von Eingangsdatensätzen verwendet, die im Folgenden beschrieben werden (ArcGIS-Workflow):

- grundsätzlich: alle Raster haben die gleiche Ausdehnung (→ Basis-Raster), Zuweisung des Koordinatensystems DHDN3
- spezifische Wärmekapazität des Gesteins (*Heat capacity*):
 - Parametrisierung des Basis-Rasters mit einheitlichem Wert (*Reclassify*), siehe Tabelle Kapitel 3.7.3.2
- Dichte des Gesteins (*Rock density*):
 - Parametrisierung des Basis-Rasters mit einheitlichem Wert (*Reclassify*), siehe Tabelle Kapitel 3.7.3.2
- Gesteinsvolumen (*Volume*):
 - falls Mächtigkeits-Raster nicht bereits vorhanden: Import der Gocad-Daten in ArcGIS
 - Multiplizierung der Zellen des Mächtigkeits-Rasters mit 10.000 (→ Zellengröße 100x100, Berechnung im Raster-Calculator)
- Temperatur des Gesteins (*Temperature at base and at top*):
 - Import der Gocad-Daten in ArcGIS
 - Berechnung der durchschnittlichen Gesteinstemperatur im Raster Calculator: ($\text{TemperaturTop} - \text{TemperaturBasis} / 2$)
- Temperatur an der Erdoberfläche (*Average soil temperature*):
 - Datensatz ist bereits vorhanden (Eingangsdatensatz für die geostatistische Temperaturmodellierung, siehe Kapitel 3.6.1.1.3)
- Wärmeinhalt (*Calculation of „Heat in Place“*):
 - Berechnung im Raster Calculator:
($\text{Dichte} * \text{spez. Wärmekapazität} * \text{Gesteinsvolumen} * (\text{Gesteinstemperatur} - \text{Oberflächentemperatur})$)
 - Umrechnung des Wärmeinhalts auf [GJ/m²] im Raster Calculator: ($\text{Wärmeinhalt} * 10^{12}$)
- Umrechnung des Wärmeinhalts in [J] auf [GJ/m²] (*Heat in Place*):
Wärmeinhalt + 10.000.000.000.000 (multipliziert mit 1.000.000.000 für die Umrechnung auf Giga, multipliziert mit 10.000 für die Umrechnung auf m²)





- R-Faktor (*R-Factor*):

- Berechnung im Raster Calculator:
 $(0,33 * (\text{Gesteinstemperatur} - 25) / (\text{Gesteinstemperatur} - \text{Oberflächentemperatur}))$

- gewinnbare Wärmemenge (*Calculation of theoretically exploitable heat*):

- Berechnung im Raster Calculator: (*R-Faktor * Wärmehalt*)

3.7.3-1 Theoretically exploitable heat

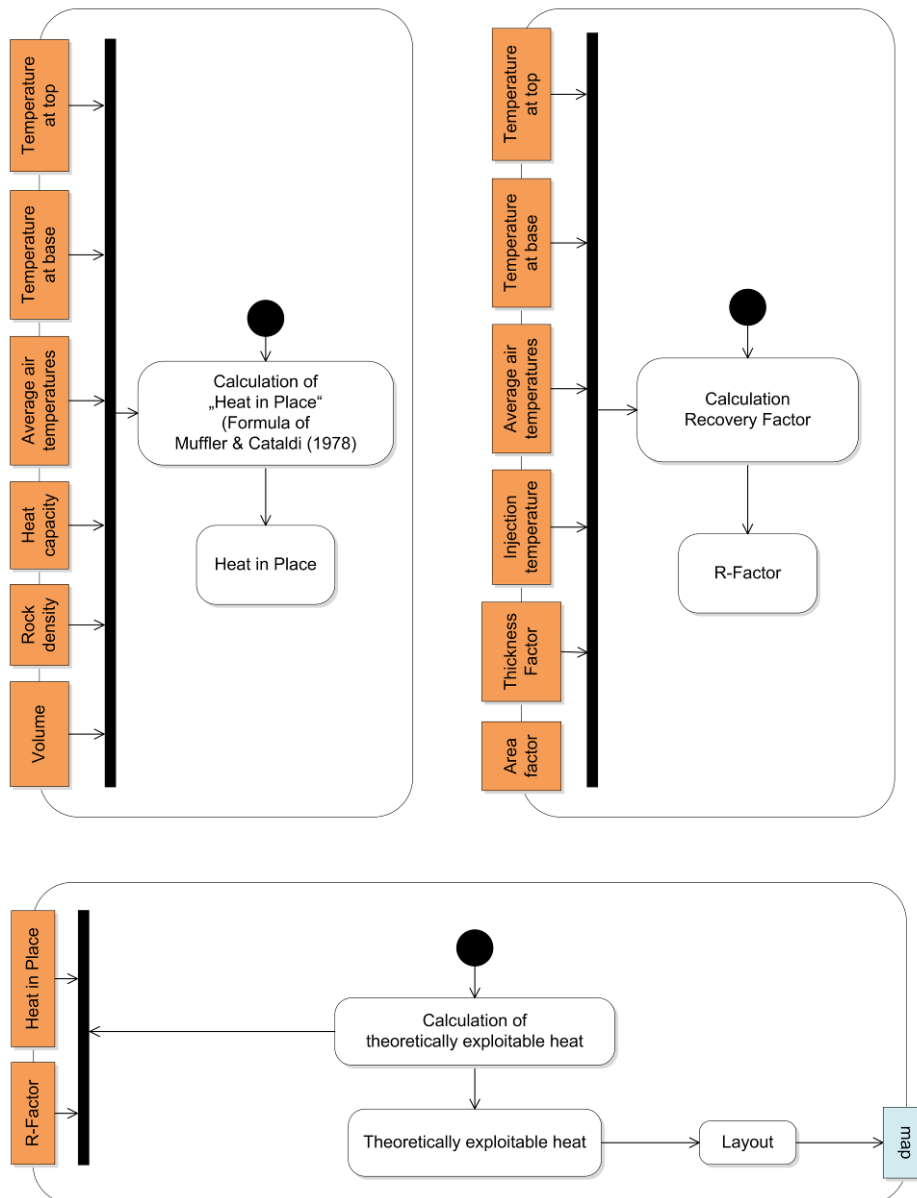


Abb. 3.7.3.3-1: UML-Workflow zur Ableitung des Wärmehalts und der theoretisch gewinnbaren Wärmemenge





- Berechnung Grundgebirge:

- Temperaturobergrenze: wird zusammengesetzt aus Top Kristallin und 100 °C-Isotherme: Gridabfrage über con-Funktion (liegt die Oberfläche der 100°C-Isotherme flacher als das Top Kristallin, wird die Tiefe des Top Kristallin übernommen; liegt dagegen das Top Kristallin flacher, wird die Tiefe der 100°C-Isotherme übernommen)
- Tiefenlage des Top Kristallin wird entsprechend geändert (Übernahme der Tiefenlage der 100 °C-Isotherme in Bereichen, in denen das Top Kristallin kühler als 100 °C ist)
- Temperaturuntergrenze: Export aus Temperaturmodell (Temperaturen in 5000 bzw. 7000 m unter Gelände)

Ergebnis:

Rasterdaten mit der theoretisch gewinnbaren Wärmemenge in [GJ/m²]

Kapitelverweise

3.7.3.1 und 3.7.3.2

Links

<http://maps.geopotenziale.eu> (Mapviewer)

Atlasblätter

5.16 - 5.20





3.8 Schnittstellen und Ausgabemedien

Ziel: Nutzerzugang zu den Projektergebnissen

Kurzbeschreibung

Schnittstellen und Ausgabemedien: GeORG-WEB-Seite, GeORG-Kartenviewer, GeORG-Metadaten, Geodaten-Dienste

Eingangsdaten

Ergebnisdaten des Projekts

Beschreibung

Für den Zugang zu den Projektergebnissen werden folgende Schnittstellen und Ausgabemedien bereitgestellt (s.a. 1.7):

GeORG-WEB-Seite (s. 3.8.1 und 1.7.1): zentraler Einstiegspunkt zu allen Schnittstellen und Ausgabemedien

GeORG-Kartenviewer (s. 3.8.2 und 1.7.2.1): interaktive Zusammenstellung, Analyse und Druck von Karten des GeORG-Projekts im Internet

GeORG-Metadaten (s. 3.8.3 und 1.7.2.2): WEB-Suchkatalog zur gezielten Recherche nach Karten und WEB-Diensten des Projekts auf der Basis einer strukturierten Metadatenbeschreibung

Geodaten-Dienste (s. 3.8.4, 1.7.2.3 und 1.7.2.4): WEB-Karten-Dienste (Web Map Services = WMS) zur direkten Einbindung in Geoinformationssysteme (GIS) oder in andere WEB-Kartenanwendungen

Kapitelverweise

1.7 (FTA 1)





3.8.1 GeORG WEB-Seite

Ziel: Nutzerzugang zu den Projektergebnissen

Kurzbeschreibung

Schnittstellen und Ausgabemedien: GeORG-WEB-Seite: zentraler Einstiegspunkt zu allen Schnittstellen und Ausgabemedien

Eingangsdaten

Ergebnisdaten des Projekts

Beschreibung

Die seit Mai 2009 freigeschaltete, in den Sprachen Deutsch, Französisch und Englisch verfügbare GeORG-WEB-Seite ist der zentrale Zugang zum GeORG-Projekt mit allgemeinen Informationen und Verknüpfungen zu Projektergebnissen, Produkten und projektrelevanten Dokumenten. Die GeORG-WEB-Seite ist über die Partnerinstitutionen oder direkt unter der URL <http://www.geopotenziale.eu> bzw. <http://www.geopotenziale.org> erreichbar.

Rubrik „Produkte“: Zugang zu Projektergebnissen und Produkten

Die Rubrik „Produkte“ gibt eine Übersicht der wichtigsten Ergebnisdokumente und Produkte des Projekts. Zahlreiche Links liefern weitere Informationen zu den einzelnen Produkten und ermöglichen ihren Online-Zugriff. Eine allgemein verständliche Information zum Projekt in Deutsch und Französisch liefern der GeORG-Film und die GeORG-Broschüre sowie der deutsche, französische und englische GeORG-Flyer. Ein räumlicher Zugang zu den GeORG-Karten und Geodaten in Deutsch, Französisch und Englisch ist über den GeORG-Kartenviewer möglich. Dieser ist mit der Anwendung GeORG-Metadaten gekoppelt, die eine systematische Beschreibung der GeORG-Themen und ihrer Verfügbarkeit liefert. Der in Deutsch und Französisch erhältliche Fachlich-Technische Abschlussbericht setzt sich aus insgesamt vier Teilen zusammen. Die Teile 1 bis 3 beschreiben das fachliche Projektergebnis und der Teil 4 umfasst den GeORG-Atlas mit 98 Kartenblättern, die für den Ausdruck im Format DIN A3 optimiert wurden. Sämtliche Dokumente sind im PDF-Format als Gesamt- oder Einzeldateien erhältlich.

Rubriken „Service“ und „Extranet“: Zugang zu Projektdokumenten

In der Rubrik „Service“ kann nach öffentlichen Dokumenten wie Projektveröffentlichungen, Projektbeschreibungen, Pressemeldungen und –berichten sowie Präsentationsmaterial zum Projekt gesucht werden. Neben der Freitextsuche kann die Recherche nach den drei Kriterien Projektbereiche, Sprache (Deutsch, Französisch, Englisch) und Dokumenttyp eingegrenzt werden. Zuletzt eingestellte Dokumente werden in einem separaten Informationsbereich aufgelistet.

In der mittels Login und Passwort zugänglichen Rubrik „Extranet“ werden zusätzlich zu den öffentlichen Dokumenten die Recherche und der Zugriff auf projektinterne Dokumente wie Protokolle oder projektinterne Richtlinien ermöglicht. Der Extranet-Bereich dient vorwiegend als Kommunikationsplattform zwischen den Projektpartnern und am Projekt beteiligten Institutionen und Firmen. Bei berechtigtem Interesse und können die Projektpartner den Zugang zum Extranet-Bereich auch an Dritte weitergeben.

Für die technische Umsetzung der GeORG-WEB-Seite wurde der Webanwendungs-Server Zope verwendet (Zope 2013).

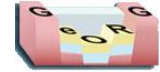
Literaturhinweise, Externe Links

GeORG-WEB-Seite (2013) : <http://www.geopotenziale.eu> bzw. <http://www.geopotenziale.org>.

Zope (2013): <http://www.zope.org/>.

Kapitelverweise 1.7.1





3.8.2 GeORG Kartenviewer

Ziel: Nutzerzugang zu den Projektergebnissen

Kurzbeschreibung

Schnittstellen und Ausgabemedien: GeORG-Kartenviewer: interaktive Zusammenstellung, Analyse und Druck von Karten des GeORG-Projekts im Internet

Eingangsdaten

Ergebnisdaten des Projekts

Beschreibung

Der GeORG-Kartenviewer erlaubt die interaktive Zusammenstellung, Analyse und den Druck von Karten des GeORG-Projekts im Internet. Der Kartenviewer ist in den Sprachen Deutsch, Französisch und Englisch verfügbar. Alle Karten werden bis zu einem maximalen Maßstab von 1 : 80 000 angezeigt. Die Visualisierung der Karten (z. B. Klassifizierungen, Legenden, Farbdarstellungen) orientiert sich dabei an den Darstellungen im Fachlich-Technischen Abschlussbericht Teil 4 (GeORG-Atlas). Der Themenbaum des Kartenviewer ist wie der GeORG-Atlas in die Themenblöcke (1) Basisdaten, (2) Schichtlagerungsdaten, (3) Geologische Schnitte, (4) Mächtigkeitsdaten, (5) Temperaturdaten, (6) Heat in Place und (7) Gasspeicherdaten gegliedert.

Der Funktionsumfang des Kartenviewer umfasst neben zahlreichen Standardfunktionen (z.B. Zoom- und Panfunktionen, Ortssuche, Anordnung von Karten per Drag & Drop, Einstellung der Transparenz von Karten, Zugriff auf Metadaten, Attributabfrage, Hinzufügen externer WMS-Dienste) auch Sonderfunktionen zum Erzeugen vertikaler Schnitte mit einer maximalen Länge von 50 km, horizontaler Schnitte mit einer maximalen Ausdehnung von 30 x 30 km und prognostischer Bohrprofile. Kartenansichten können als Druck ausgegeben oder vom Nutzer gespeichert und bei folgenden Sitzungen wieder geladen werden. Koordinaten lassen sich sowohl in landesüblichen Koordinatensystemen (Gauß-Krüger Zone 3, NTF France II und CH1903_LV03) als auch im europäischen System ETRS89-UTM Zone 32 M sowie als geographische Koordinaten (WGS84) anzeigen. Für die Berechnung der Koordinaten wird die offene Programmbibliothek PROJ.4 verwendet (PROJ.4 2013)

Der GeORG-Kartenviewer lässt sich über die GeORG-WEB-Seite, die „GeORG-Metadaten“ oder direkt über die URL <http://maps.geopotenziale.eu> aufrufen. Die technische Umsetzung des GeORG-Kartenviewer basiert auf der JavaScript-Bibliothek OpenLayers (OpenLayers 2013) und den JavaScript- bzw. Ajax-Frameworks ExtJS (ExtJS 2013) und GeoExt (GeoExt 2013). Bei den Sonderfunktionen zum Erzeugen vertikaler und horizontaler Schnitte sowie prognostischer Bohrprofile handelt es sich um Entwicklungen der Fa. WWL (WWL 2013) auf Basis von C++.

Externe Links

GeORG-Kartenviewer: <http://maps.geopotenziale.org>.

ExtJS (2013): <http://www.sencha.com/products/extjs>.

GeoExt (2013): <http://www.geoext.org>.

OpenLayers (2013): <http://www.openlayers.org>.

PROJ.4 (2013): <http://trac.osgeo.org/proj>.

WWL (2013): WWL Umwelplanung und Geoinformatik GbR <http://www.wwl-web.de>.

Kapitelverweise

1.7.2.1



3.8.3 GeORG Metadaten

Ziel: Nutzerzugang zu den Projektergebnissen

Kurzbeschreibung

Schnittstellen und Ausgabemedien: GeORG-Metadaten: WEB-Suchkatalog zur gezielten Recherche nach Karten und WEB-Diensten des Projekts auf der Basis einer strukturierten Metadatenbeschreibung

Eingangsdaten

Ergebnisdaten des Projekts

Beschreibung

Der WEB-Suchkatalog „GeORG-Metadaten“ dient der gezielten Recherche nach Karten und WEB-Diensten des Projekts auf der Basis einer strukturierten Metadatenbeschreibung.

Der Suchkatalog ist in den Sprachen Deutsch, Französisch und Englisch verfügbar und bietet sowohl eine einfache als auch eine erweiterte Suchfunktion. Einfache Recherchen können auf der Basis von Schlagwörtern erfolgen, wobei die Titel, Kurzzusammenfassungen und Schlüsselwörter der Metadaten durchsucht werden. Die Suche kann auch thematisch auf einzelne Themenblöcke der Karten eingegrenzt werden. Die erweiterte Suchfunktion ermöglicht die gezielte Suche innerhalb bestimmter Felder der Metadatenbeschreibung.

Nach Auflistung der Suchergebnisse lassen sich die vollständigen Metadatenbeschreibungen von Karten und von WEB-Diensten anzeigen. Sie enthalten neben Angaben zum thematischen Inhalt und zur räumlichen Ausdehnung u.a. auch Informationen über den Online-Zugang zu den Geodaten und WEB-Diensten, über weitere Bezugsmöglichkeiten der Geodaten sowie über eventuell bestehende Zugangs- und Nutzungsbeschränkungen. Alle Kartenthemen können über die Funktion „Map Preview“ direkt in den GeORG-Kartenviewer geladen bzw. hinzugefügt werden.

Die Metadatenbeschreibungen entsprechen sowohl den Anforderungen der EU-Initiative INSPIRE als auch nationaler bzw. regionaler Geodateninfrastrukturen (GDI-DE, GDI-BW, E-GEO.CH). Die technische Umsetzung des Geoportals basiert auf dem OGC-Standard CSW 2.0.2 (Open Geospatial Consortium 2007) unter Verwendung der Open Source Software GeoNetwork (GeoNetwork 2013). Der WEB-Dienst wurde hinsichtlich der Anforderungen von INSPIRE zur Implementierung von *Discovery Services* angepasst (INSPIRE 2011).

Die Anwendung „GeORG-Metadaten“ lässt sich über die GeORG-WEB-Seite, den GeORG-Kartenviewer oder direkt über die URL <http://geo.geopotenziale.eu> aufrufen.

Literaturhinweise, Externe Links

GeoNetwork (2013): <http://geonetwork-opensource.org>

GeORG-Metadaten (2013): <http://geo.geopotenziale.eu>

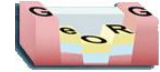
INSPIRE Infrastructure for Spatial Information in Europe (2011)

Open Geospatial Consortium (2007)

Kapitelverweise

1.7.2.2





3.8.4 Geodaten und Geodaten-Dienste

Ziel: Nutzerzugang zu den Projektergebnissen

Kurzbeschreibung

Schnittstellen und Ausgabemedien: Geodaten-Dienste: WEB-Karten-Dienste (Web Map Services = WMS) zur direkten Einbindung in Geoinformationssysteme (GIS) oder in andere WEB-Kartenanwendungen

Eingangsdaten

Ergebnisdaten des Projekts

Beschreibung

Die Karten und Geodaten des GeORG-Projekts lassen sich mit Hilfe von WEB-Karten-Diensten (*Web Map Services* = WMS) über das Internet direkt in Geoinformationssysteme (GIS) oder andere WEB-Kartenanwendungen einbinden und so mit eigenen Daten überlagern. Die Struktur der WMS-Layer und die Visualisierung der Karten (als Rasterbild) sind dabei identisch mit dem GeORG-Kartenviewer. Der WMS erlaubt auch die Abfrage der Themenattribute (*GetFeatureInfo*).

Der WMS kann über die http-Anfrage *GetCapabilities* nach seinem Leistungsumfang abgefragt werden. Neben allgemeinen Informationen, z.B. über den Anbieter des WMS und mögliche Ausgabeformate, werden als Antwort der *GetCapabilities*-Anfrage auch Angaben über die verfügbaren Themen sowie ihre räumliche Ausdehnung und Darstellung in unterschiedlichen Koordinatensystemen geliefert.

Die http-Anfragen *GetCapabilities* lassen sich für alle WMS des GeORG-Projekts im Suchkatalog „GeORG-Metadaten“ recherchieren. Sie sind in den Metadatenbeschreibungen der WMS und der Karten im Abschnitt „Transferoptionen“ angegeben. Die *GetCapabilities*-Anfrage ist notwendig, um den Dienst in andere Anwendungen einzubinden.

Die technische Umsetzung der WMS des GeORG-Projekts basiert auf dem OGC-Standard WMS 1.1.1 (Open Geospatial Consortium 2002).

Die dem GeORG-Atlas, dem GeORG-Kartenviewer und den GeORG-Karten-Diensten zugrunde liegenden Geodaten sind keine frei zugänglichen GeORG-Produkte. Diese Daten können über die folgenden Stellen der jeweiligen Länder angefragt werden: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Freiburg (Baden-Württemberg), Landesamt für Geologie und Bergbau Mainz (Rheinland Pfalz), Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Frankreich), Angewandte und Umweltgeologie, Universität Basel (Schweiz).

Literaturhinweise, Externe Links

GeORG-Metadaten (2013): <http://geo.geopotenziale.eu>.

Open Geospatial Consortium (2002)

Kapitelverweise, Interne Links

Kap. 1.7.2.3, Kap. 1.7.2.4



3.9 Literatur zu Teil 3

- Agemar, T., Schellschmidt, R. & Schulz, R. (2011): 3D-Modell der Untergrundtemperatur von Deutschland. – Der Geothermie Kongress 2011, 15.–17.11.2011: 9 S.; Bochum. – [http://www.geotis.de/homepage/Ergebnisse/F9.5_Agemar_et_al.pdf]
- Albertin, U., Kapoor, J., Randall, R., Smith, M., Brown, G., Soufleris, C., Whitfield, P., Dewey, F., Farnsworth, J., Grubitz, G. & Kemme, M. (2002): The Time for Depth Imaging. – *Oilfield Rev.*, 14: 2–15; Amsterdam.
- Arndt, D., Bär, K., Fritsche, J.-G., Kracht, M., Sass, I. & Hoppe, A. (2011): 3D structural model of the Federal State of Hesse (Germany) for geopotential evaluation. – *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 162: 353–369; Stuttgart.
- Bär, K., Arndt, D., Fritsche, J.-G., Götz, A.E., Kracht, M., Hoppe, A. & Sass, I. (2011): 3D-Modellierung der tiefeingeothermischen Potenziale von Hessen – Eingangsdaten und Potenzialausweisung. – *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 162: 371–388; Stuttgart.
- Badley, M.E. (1985): *Practical seismic interpretation*. – 266 p.; Boston (IHRDC Press).
- Baillieux, P., Schill, E. & Dezayes, C. (2011): 3D Structural regional model of the EGS Soultz site (Northern Upper Rhine Graben, France): insights and perspectives – *Proceedings, 36. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University 31.01.–02.02.2011*; Stanford.
- Bartz, J. (1974): Die Mächtigkeit des Quartärs im Oberrheingraben. – In: Illies, J.H. & Fuchs, K. (eds.): *Approaches to Taphrogenesis*: 78–87; Stuttgart (Schweizerbart).
- BGA Region Basel 15 (2011): *Geo-physical Parameters (hydraulic and thermal) of basement-rocks in the region of Basel*. – *Baugrundarchiv Region Basel*, 15; Basel.
- Bitterli, T. (1992): Die Anwendung der tektonischen Materialbilanz im östlichen Faltenjura: Modellierung der dreidimensionalen Kinematik der Weissenstein-, Farnsberg- und Passwang-Antiklinalen und Rückschlüsse auf Sockelstrukturen. – *Diss. Univ. Basel*: 170 S.; Basel.
- Bonté, D., Guillou-Frottier, L., Garibaldi, C., Bourguin, B., Lopez, S., Bouchot, V. & Lucazeau, F. (2010): Subsurface temperature maps in French sedimentary basins: new data compilation and interpolation. – *Bull. Soc. géol. Fr.*, 181 (4): 377–390; Paris.
- Boigk, H. & Schöneich, H. (1970): Die Tiefenlage der Permbasis im nördlichen Teil des Oberrheingrabens. – In: Illies, J.H. & Mueller, S. (eds.): *Graben Problems*: 45–55; Stuttgart (Schweizerbart).
- Boigk, H. & Schöneich, H. (1974): Perm, Trias und älterer Jura im Bereich der südlichen Mittelmeer–Mjösen-Zone und des Rheingrabens. – In: Illies, J.H. & Fuchs, K. (eds.): *Approaches to Taphrogenesis*: 60–71; Stuttgart (Schweizerbart).
- Bücker, C. & Rybach, L. (1996): A simple method of determine heat production from gamma-ray-logs. – *Marine and Petroleum Geology*, 13: 373–377; Amsterdam.
- Butscher C. & Huggenberger P. (2007): Implications for karst hydrology from 3D geological modeling using the aquifer base gradient approach. – *J. Hydrol.*, 342: 184–198; Amsterdam.
- Busslinger, A. & Rybach, L. (1999): Felstemperaturprognose für tiefliegende Tunnel. – *Tunnel*, 1/99: 24–35; Gütersloh.





- Carré, C. (2011): Cartographies thermiques du Graben du Rhin (partie française). – MSc Thesis, Univ. Montpellier 2, Sciences et Techniques: 51 S. – [unveröff.]
- Caumont G, Collon-Drouaillet P, Le Carlier de Veslud C, Viseur S, Sausse J (2009): Teacher's aide : Surface-based 3D modeling of geological structures. – Online Ressource: [http://www.gocad.org/~caumon/Research/Papers/Caumon_TeachersAideFull_MathGeo09.pdf]
- Clauser, C. (2003): Numerical simulation of reactive flow in hot aquifers using SHEMAT and Processing Shemat. – 331 S.; Berlin (Springer).
- Clauser, C. et al. (2002): Erkennen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe. – Endbericht zum Auftrag 9X0009-8390-0 des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS): 159 S.; Aachen (Angewandte Geophysik, RWTH Aachen).
- Clauser, C. & Huenges, E. (1995): Thermal Conductivity of Rocks and Minerals. - In: Ahrens, T. J. (ed.): Rock Physics and Phase Relations – a Handbook of Physical Constants. – AGU Reference Shelf: 105–126; Washington (Am. Geophys. Union).
- Clauser, C. & Villinger, H. (1990): Analysis of conductive and convective heat transfer in a sedimentary basin, demonstrated for the Rheingraben. – Geophys. J. Int., 100: 393–414; Oxford.
- Della Valle, G. (1981): Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung der Grundwasser des Kantons Bern: Hydrogeologie Laufental. – 159 S., 2 Beil.; Bern (WEA).
- Deming, D. (1989): Application of Bottom-Hole Temperature Corrections in Geothermal Studies. – Geothermics, 18 (5/6): 775–786; Pisa.
- Dezayes, C., Castera, J., Heilbronn, G. & Calcagno, P. (2009): Regional geological model of the Soultz-sous-Forêts geothermal field (Rhine Graben, France) – Geoth. Res. T., 33: 175–180; Davis, CA. – [<http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1028451.pdf>]
- Diamond, L. W., Leu, W. & Chevalier, G. (2010): Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO₂-Sequestrierung in der Schweiz. – Bundesamt für Energie, Publikation Nr. 290289: 23 S.; Bern.
- Dubrule, O. & Damsleth, E. (2001): Achievements and challenges in petroleum geostatistics – Petrol. Geosci., 7: 1–7; Bath.
- DWD (Deutscher Wetterdienst, ohne Jahr): Jahresmitteltemperaturen der Normalperiode 1961–1990. – Online-Ressource: [<http://www.dwd.de/mittelwerte>]
- Etris, E.L., Crabtree, N.J., Dewar, J. & Pickford, S. (2001): True Depth Conversion: More Than A Pretty Picture. – CSEG Recorder, 26 (9): 11–22; Calgary.
- Flacke, W. & Kraus, B.(2005): Working with Projections and Datum Transformations in ArcGIS: Theory and Practical Examples. – 367 S.; Norden (Points Verlag).
- Ford, M., Le Carlier de Veslud, C. & Bourgeois, O. (2007): Kinematic and geometric analysis of fault-related folds in a rift setting: The Dannemarie basin, Upper Rhine Graben, France. – J. Struct. Geol., 29: 1811–1830; Amsterdam.



- Gabriel, G., Vogel, D., Scheibe, R., Wonik, T., Krawczyk, C.M., Lindner, H. (2010): Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000. – 1 Kt.; Hannover (LIAG).
- Geophysica (2012): Logauswertung und geothermische Modellierung im Oberrheingraben zwischen Rastatt und Landau. – Erläuterungsbericht der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH Aachen: 119 S., 70 Abb., 15 Tab. – [unveröff.; Archiv LGRB]
- Genter, A. et al. (2010) : Contribution of the exploration of deep crystalline fractured reservoirs of Soultz to the knowledge of enhanced geothermal systems (EGS). – C. R. Geosci., 342 (7–8): 502-516; Paris.
- GLA/BRGM (1979): Geologisches Landesamt Baden-Württemberg / Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Hrsg.): Geothermische Synthese des Oberrheingrabens (Bestandsaufnahme) / Synthèse géothermique du Fossé Rhénan Supérieur [Bearbeiter: Tietze, R., Neeb, I., Walgenwitz, F. & Maget, P.]. – 100 S., 23 Anl., 4 Beil.; Freiburg i. Br. & Strasbourg (GLA Baden-Württemberg / Serv. Géol. Reg. Alsace).
- GLA (1981): Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (Hrsg.): Geothermische Synthese des Oberrheingrabens zwischen Karlsruhe und Mannheim, Anteil Baden-Württemberg, Bestandsaufnahme [Bearbeiter: Nägele, R. & Tietze, R.]. – 72 S.; Freiburg i. Br. (GLA Baden-Württemberg).
- Glassley, W. E. (2010): Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment. – 290 p.; Boca Raton, FL (CRC Press).
- Goutorbe et al. (2007): Comparison of several BHT correction methods: a case study on an Australian data set. – Geophys. J. Int., 170: 913–922; Oxford.
- Groshong, R. (2006): 3-D structural geology: a practical guide to quantitative surface and subsurface map interpretation. – 400 S.; Berlin (Springer).
- Gürler, B., Hauber, L. & Schwander, M. (1987): Die Geologie der Umgebung von Basel mit Hinweisen über die Nutzungsmöglichkeiten der Erdwärme. – Beitr. Geol. Karte Schweiz, N.F., 160: 33 S., 10 Taf.; Bern.
- HGK (1987): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum. - Situation heute; Möglichkeiten und Grenzen zukünftiger Entwicklungen. – 107 S.; Stuttgart/Wiesbaden/Mainz (Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg, Der Hessische Minister für Umwelt und Reaktorsicherheit, Ministerium für Umwelt und Gesundheit Rheinland-Pfalz).
- HGK (1999): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum. - Fortschreibung 1983–1999. – 155 S.; Stuttgart/Wiesbaden/Mainz (Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz).
- HGK (2007): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung im Raum Karlsruhe-Speyer. Fortschreibung 1986–2005, Beschreibung der geologischen, hydrogeologischen und hydrologischen Situation. – 90 S.; Stuttgart/Mainz (Umweltministerium Baden- Württemberg, Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz).
- Homilius, J., Plaumann, S. & Pucher, R. (2003): Geophysikalische Untersuchungen. – In: Wimmenauer, W. (Hrsg.): Erläuterungen zum Blatt Kaiserstuhl (5. Aufl.), Geol. Kt. Baden-Württ. 1 : 25 000, Bl. Kaiserstuhl [ohne Nr.]: 190–198., Beil. 3–4; Freiburg i. Br.





- Hurter, S. & Schellschmidt, R. (2003): Atlas of geothermal resources in Europe. – *Geothermics*, 32: 779–787; Pisa.
- Jodocy, M. & Stober, I. (2007): Geohydraulische und hydrochemische Daten aus dem französischen Teil des Oberrheingrabens. unveröffentlichter GeotIS-Bericht – Fachbericht RPF-LGRB: 17 S., 9 Abb., 2 Tab., 51 Anl.; Freiburg i. Br. – [unveröff.].
- Jung et al (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag; BGR/GGA, Archiv-Nr. 122 458; Hannover.
- Karich, F. (2010): Erstellung eines Standalone Programms zur Koordinatentransformation von GoCAD-Objekten im Projekt GeORG. – BSc Arbeit, Inst. Geophysik und Geoinformatik, TU Bergakademie Freiberg: 30 S.; Freiberg. – [unveröff.]
- Kühne, K. (2006): Das Fachinformationssystem Geophysik und seine Nutzung über das Internet. – In: Merkel, B., Schaeben, H., Wolkersdorfer, C. & Hasche-Berger, A. (Hrsg.): GIS – Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen, 57. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 23.06.2006, Wiss. Mitteilungen des Instituts für Geologie, 31: 227-231; Freiberg.
- Laubscher, H. (2005): Ein neues Konzept für das Verhalten der eozänen Tafeljuragräben bei der spätmiozänen Jurafaltung; der Therwil-Witterswil-Dittingen-Graben (bei Basel/Schweiz) als Muster der Grabenverfaltung. – *Mitt. Naturf. Ges. beider Basel*, 8: 167–180; Basel.
- LBEG (2013): Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.): Symbolschlüssel Geologie (4. digit. Ausg.). – 249 S.; Hannover (LBEG). – [http://www.lbeg.niedersachsen.de/download/74117/Symbolschluesel_Geologie.pdf]
- LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1993): Grundwasser, Richtlinien für Beobachtung und Auswertung. Teil 3 – Grundwasserbeschaffenheit. – 59 S.; Essen (Woeste).
- LGB-RLP (2010): Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Geologie von Rheinland-Pfalz. – 400 S., 162 Abb., 36 Tab., 3 Anl.; Schweizerbart (Stuttgart).
- Lutz, M. & Cleintuar, M. (1999): Geological results of a hydrocarbon exploration campaign in the southern Upper Rhine Graben. – *Bull. angew. Geol.*, 4, Suppl.: 3–80; Zürich.
- Mallet, J.-L. (1992): Discrete smooth interpolation in geometric modelling. – *Computer aided design*, 24: 178–191; Amsterdam.
- Müller, C. & Reinhold, K. [Hrsg.] (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland). Abschlussbericht. – Archivstück, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Berlin, Signatur 0130191: 1 Schuber.
- Muffler, P. & Cataldi, R. (1972): Methods for regional assessment of geothermal resources. – *Geothermics*, 7: 53–89; Pisa.
- Pflug, R. (1982): Bau und Entwicklung des Oberrheingrabens. – 145 S.; Darmstadt (WBG).



- Popov, Y. A., Pribnow, D.F.C., Sass, J.H., Williams, C.F. & Burkhardt, H. (1999): Characterization of rock thermal conductivity by high resolution optical scanning. – *Geothermics*, 28: 253–276.; Pisa.
- Powell, W.G., Chapman, D.S., Balling, N. & Beck, A.E. (1988): Continental Heat-Flow Density. – In: Haenel, R., Rybach, L. & Stegena, L. (Hrsg): *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*: 167–222; Dordrecht (Kluwer).
- Rath, V., Wolf, A. & Bucker, M. (2006): Joint three-dimensional inversion of coupled groundwater flow and heat transfer based on automatic differentiation: sensitivity calculation, verification, and synthetic examples. – *Geophys. J. Int.*, 167: 453–466; Oxford.
- Regierungspräsidium Freiburg – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2012): *Geologische Regelwerke*. – Online-Ressource (10.09.2012): [http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/Fachbereiche/geologie/fachberatung/geologische_regelwerke]
- Reisdorf, A.G., Wetzel, A., Schlatter, R. & Jordan, P. (2011): The Staffelegg Formation: a new stratigraphic scheme for the Early Jurassic of northern Switzerland. – *Swiss J. Geosci.*, 104: 97–146; Basel.
- Rupf, I. & Nitsch, E. (2008): *Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse*. – *LGRB-Informationen*, 21: 81 S., 10 Beil.; Freiburg i. Br.
- Rupf, I. & Armbruster, V. (2008): *Das geologische Modell des Informationssystems Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg*. – In: Merkel, B., Schaeben, H., Wolkersdorfer, C. & Hasche-Berger, A. (Hrsg.): *GIS - Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen*, 59. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 13.06.2008, *Wiss. Mitteilungen des Instituts für Geologie*, 37: 179–182; Freiberg.
- Sanjuan et al. (2010): Main characteristics of the deep geothermal brine (5 km) at Soultz-sous-Forêts (France) determined using geochemical and tracer test data. – *C. R. Geosci.*, 342: 546–559; Paris.
- Schellschmidt, R. & Schulz, R. (1992): Hydrogeothermic studies in hot dry rock project at Soultz-Sous-Forêts. – In: Bresee, J. C. (ed.): *Geothermal Energy in Europe, Soultz Hot Dry Rock Project*: 309 p.; New York (Gordon & Breach).
- Schön, J. H. (2004): Physical properties of rocks-fundamentals and principles of petrophysics. – In: Helbig, K. & Treitel, S. (eds.): *Handbook of geophysical exploration, Seismic exploration*, 18: 583 p.; Oxford (Pergamon).
- Signorelli, S. (1999): *Geothermische Messungen im NEAT Schacht Sedrun und ihre Interpretation*. – Diplomarb. Inst. Geophysik, ETH Zürich.
- SIGRS-GISOR (2012): *Systeme d'Information Geographique du Rhin Superieur / Geographisches Informationssystem des Oberrheins*. – Online-Resource (13.09.2012): [<http://sigrs-gisor.org>]
- Skiba, P., Gabriel, G., Scheibe, R. Seidemann, O. (2010): *Schwerekarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000, Bouguer-Anomalien*. – 1 Kt.; Hannover (LIAG).
- Smerdon, J.E., Pollack, H.N., Cermak, V., Enz, J.W., Kresl, M., Safanda, J. & Wehmler, J.F. (2006): Daily, seasonal, and annual relationships between air and subsurface temperatures. – *J. Geophys. Res.*, 111: D07101. – [doi:10.1029/2004JD005578]





- Spottke, I., Zechner, E. & Huggenberger, P. (2005): The southeastern border of the Upper Rhine Graben: a 3D geological model and its importance for tectonics and groundwater flow. – *Int. J. Earth Sci.*, 94: 580–593; Berlin. – [doi: 10.1007/s00531-005-0501-4]
- Sprecher, C. & Müller W.H. (1986): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Reflexionsseismik – 82. – *NAGRA Techn. Ber.*, 84–15: 168 S.; Baden (NAGRA).
- Stober, I. & Jodocy, M. (2009): Eigenschaften geothermischer Nutzhorizonte in baden-württembergischen und französischen Teil des Oberrheingrabens. – *Grundwasser*, 14: 127–137; Berlin.
- Tearpock, D.J. & Bischke, R.E. (2003): *Applied subsurface geological mapping*. – 822 S.; Upper Saddle River, NJ (Prentice Hall).
- Ustaszewski, K.M. (2004): *Reactivation of pre-existing crustal discontinuities: the southern Upper Rhine Graben and the northern Jura Mountains – a natural laboratory*. – PhD thesis, Univ. Basel: 145 S.
- Ustaszewski, K. & Schmid, S.M. (2007): Latest Pliocene to recent thick-skinned tectonics at the Upper Rhine Graben – Jura Mountains junction. – *Swiss. J. Geosci.*, 100: 293–312; Basel.
- Veeken, P.C.H. (2007): *Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterisation*. – *Handbook of geophysical exploration*. – *Seismic exploration*, 37: 509 p.; Amsterdam.
- Wielandt-Schuster, U., Nitsch, E., Anders, B., Beccaletto, L., Dresmann, H., Ellwanger, D., Haneke, J., Huggenberger, P., Weidenfeller, M. & GeORG Project Team (2012): Towards a harmonized lithostratigraphic nomenclature for the Cenozoic of the Upper Rhine Graben of Germany, France and Switzerland. – Poster, GeoHannover 2012, 1.-3.10.2012; Abstract in *Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss.*, 80: 515; Hannover.
- Wirsing, G. & Luz, A. (2007): Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Lockergesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg). – *LGRB-Informationen*, 19: 130 S.; Freiburg i. Br.
- Wirsing, G., Luz, A., Engesser, W., Koch, A., Elsass, P. & Perrin, J. (2007): Hochauflösende Reflexionsseismik auf dem Rhein und dem Rheinseitenkanal zwischen Mannheim und Rheinfelden. – *LGRB-Fachbericht*, 1/07: 60 S., 1 CD-ROM; Freiburg i. Br.
- Yilmaz, Ö. (1987): *Seismic Data processing*. – *Investigations in Geophysics*, 2: 526 p.; Tulsa, OK (Soc. Explor. Geophys.).
- Zechner, E., Kind, F., Fäh, D. & Huggenberger, P. (2001): 3-D Geological model of the Southern Rhine Graben compiled on existing geological data and geophysical reference modeling. – *Abstract Volume of the 2nd EUCOR-URGENT Workshop*, 7.–11. October, Mont Saint-Odile, Strasbourg, France: 43 p.; Strasbourg.
- Zoth, T.A. & Hänel, R. (1988): Appendix. – In: Hänel, R., Rybach, L. & Stegena, L. (eds.): *Handbook of Terrestrial Heat Flow Determinations*: 449–466; Dordrecht (Kluwer).



