



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Möglichkeiten und Limitierungen in der Erstellung und
Visualisierung von dreidimensionalen geologischen
Modellen unter Verwendung spezialisierter GIS
Software“

Verfasser

Matthias Dirnberger

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 455

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Diplomstudium Kartographie und Geoinformation

Betreuer:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Danksagung

Ich möchte mich hiermit bei meinem Betreuer Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl sehr herzlich für seine Unterstützung und seine Geduld bei der Betreuung meiner Diplomarbeit bedanken. Auch gilt mein Dank der Firma *BLP Geoservice* aus Linz - im Besonderen DI Philippe Brandner und Mag. Martin Leymüller - für ihr Vertrauen bei der Vergabe und Umsetzung dieses Diplomarbeitsthemas.

Meinen Kommilitonen möchte ich hiermit auch meinen Dank ausdrücken, sowie mich für eine unvergessliche Zeit mit euch bedanken. Insbesondere bei Thomas und Christoph, die mir bei Korrekturarbeiten und technischen Fragen beigestanden haben. Ein großer Dank gilt auch meiner Freundin Sonja, die mich während des Schreibens der Diplomarbeit ertragen musste und immer wieder aufs Neue angespornt hat. Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie für deren Motivation und Unterstützung bedanken. Ohne euch wäre mein Studium nie möglich gewesen.

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung.....	iii
Verwendete Abkürzungen	vii
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xiv
Abstract.....	xv
Vorwort.....	xvi
1 Einleitung.....	1
1.1 Einführung in das Thema	1
1.2 Forschungsstand und Zielsetzung.....	2
2 3D in der Geovisualisierung.....	6
2.1 Restriktionen der analogen Kartographie und Geovisualisierung	6
2.1.1 Der statische Charakter	7
2.1.2 Der isolierende Charakter.....	8
2.1.3 Der selektive Charakter	9
2.1.4 Der passive Charakter	9
2.2 Neue Herausforderungen in der Geovisualisierung und der zukunftsorientierten Kartographie.....	11
2.3 3D in der Kartographie und Geovisualisierung	15
2.3.1 Aktuelle Möglichkeiten der 3D –Geodatenverarbeitung	16
2.4 3D in der Geologie.....	20
2.4.1 Anforderungen an ein dreidimensionales geologisches (Basis-Modell).....	22
3 Grundlagen , Aufbereitung und Management von geologischen Daten	24
3.1 Datengrundlage für geologische Modelle	25
3.1.1 Direkte Begehungen/Erhebungen	25
3.1.2 Reflexionsseismik und Ground Penetrating Radar (GPR)	26

3.1.3 Bohrsondierungen	29
3.1.4 Digitale Geländemodell.....	33
3.2 Datenaufbereitung	34
3.3 Datenbanken	35
4 3D Modellierung von geologischen Strukturen	37
4.1 Modellbegriff	38
4.2 Interpolationsmöglichkeiten von raumbezogenen Messdaten	42
4.2.1 Deterministische Interpolationsmethoden	45
4.2.2 Stochastische Interpolationsmethoden – Geostatistik.....	53
4.2.3 Vor - und Nachteile der Geostatistik bei der Erstellung dreidimensionaler geologischer Modelle	74
4.3 Repräsentationsformen von 3D Körpern	76
4.3.1 Oberflächenbasierende Repräsentationsformen.....	77
4.3.2 Volumenbasierende Repräsentationsformen	83
4.4 Topologie.....	89
4.4.1 9-Intersection Modell:	92
5 Visualisierung von geologischen Strukturen	99
5.1 Visualisierungsmethoden für dreidimensionale geologische Modelle	100
5.1.1 Rich Internet Applications	102
5.1.2 Geo-Browser.....	103
5.1.3 Universal 3D	104
5.1.4 Softwarespezifische Viewer	105
5.2 Vertikale und horizontale Überhöhung	107
6 „State of the Art“- Software in der 3D Geologie	110
6.1 Eigenständige Softwarelösungen	110
6.1.1 GSI3D	111
6.1.2 3D GeoModeller.....	113
6.1.3 GoCAD.....	113

6.1.4 Rockworks 15	114
6.2 Plug-Ins	116
6.2.1 BoreIS	116
7 Praktische Umsetzung der Arbeiten anhand des Beispiels „Gallneukirchen“ (OÖ)	119
7.1 Ausgangspunkt – Belastungssituation	119
7.2 Datengrundlage	120
7.2.1 Eigenschaften der Datengrundlagen	121
7.3 Entscheidung für Rockworks 15	124
7.4 Datenintegration – DBMS	125
7.5 Stratigraphische Modellierung (Fence, Striplogs, Solid)	128
7.5.1 Modellierungsprozess des stratigraphischen Modells	129
7.5.2 Visualisierung des stratigraphischen Interpolationsergebnisses	132
7.6 Grundwasserkörpermodellierung	133
7.6.1 Modellierungsprozess des Grundwasserspiegels	134
7.6.2 Visualisierung des Grundspiegelergebnisses	136
7.7 Profilableitung	137
7.8 Belastungsmodellierung	137
7.8.1 Modellierungsprozess der Belastungskörper	140
7.8.2 Visualisierung der Belastungskörper	142
7.8.3 Sphärenmodelle der Belastungen	143
7.9 Exportmöglichkeiten – Interoperabilität	145
8 Zusammenfassung	146
8.1 Ziele und Ergebnisse der Arbeit	146
8.2 Fazit und Ausblick	147
Literatur	149
Lebenslauf	b

Verwendete Abkürzungen

3D	Dreidimensional
ALS	Airborne Laser Surveying
AR	Augmented Reality
ArcSDE	Arc Spatial Database Engine
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BGS	British Geological Survey
BLUE	Best Linear Unbiased Estimator
BoreIS	Borehole Information System
BTXE	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol
CAD	Computer Aided Design
CPT	Cone Penetration Test
CSG	Constructive Solid Model
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DGM	Digitales Geländemodell
DSS	Decision Support System
DTM	Digital Terrain Model
GIS	Geographische Informationssysteme
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Global Positioning System
GSI3D	Geological Surveying and Investigation in 3 Dimensions
GUI	Graphical User Interface (Graphische Bedienoberfläche)
HTML	Hypertext Markup Language
IDW	Inverse Distance Weighting (Inversive Distanzwichtung)
IMU	Inertial Measuring Unit
KGS	Kriginggleichungssystem

KML	Keyhole Markup Language
LIDAR	Light Detection and Ranging
MS	Microsoft
MTBE	Methyl-Tert-Butylether
OGC	Open Geospatial Consortium
OK	Ordinary Kriging
PDF	Portable Document Format
RIA	Rich Internet Application
TEN	Tetrahedral Network
TIN	Triangular Irregular Network
U3D	Universal 3D
UTM	Universal Transverse Mercator
VR	Virtual Reality

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Oblong Industries User-Interface.....	14
Abbildung 2: LIDAR Datenerhebung (Quelle: http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/images/lidar_schematic.jpg).....	17
Abbildung 3: Gladiatorenschule Carnuntum (Quelle: http://carnuntum.7reasons.at/).....	19
Abbildung 4: Modellerstellungprozess - Datenerhebung (eigene Quellen)	24
Abbildung 5: Direkte Begehungen und Erhebungen (Quelle: GROSHONG [GRO-06, Seite 26]).....	26
Abbildung 6: Reflexionsseismik (Quelle: http://idw-online.de/pages/de/image?id=69481&display_lang=de_DE).....	27
Abbildung 7: Reflexionsseismik 2 (Quelle: GROSHONG [GRO-06, Seite 31])	28
Abbildung 8: GPR (Quelle: http://carnuntum.7reasons.at/).....	29
Abbildung 9: GPR - Daten (Quelle: http://carnuntum.7reasons.at/)	29
Abbildung 10: Sondierungsmessdiagramme (Quelle linke Abbildung: GROSHONG [GRO-06, Seite 28]; Quelle rechte Abbildung: BLP GeoServices GmbH)	30
Abbildung 11: Bohrlochgeometrie (Quelle: HOULDING [HOU-00, Seite 22])	32
Abbildung 12: Bohrlochgeometrie - Einstellungen (Quelle: HOULDING [HOU-00, Seite 22]).....	33
Abbildung 13: Prozess der Modellerstellung (eigene Bearbeitung)	38
Abbildung 14: Modellierungsablauf (Quelle GAU [GAU-10, Seite 67] – eigene Bearbeitung)	41
Abbildung 15: Konstruktion von Thiessen Polygone (Quelle: HAGGET et al. [HAG-77] in http://www.gitta.info/Accessibilit/de/html/UncProxAnaly_learningObject4.html).....	46
Abbildung 16: Natural Neighbour Interpolation (Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/51/Natural-neighbors-coefficients-example.png)	48
Abbildung 17: Spline - Interpolation (Quelle: http://werner.yellowcouch.org/Papers/antenna/index.html).....	52

Abbildung 18: Ablauf einer geostatistischen Schätzung (Quelle: GAU [GAU-10, Seite 27] - eigene Darstellung)	56
Abbildung 19: Teile eines Variogramms (Quelle: http://homepage.univie.ac.at/doris.riedl/modelle/modelle2010/tut_geostat/images/variogram_teile.gif)	61
Abbildung 20: Theoretisches Variogramm (eigene Quelle)	63
Abbildung 21: Experimentelles Variogramm - Potenzmodell (eigene Quelle)	65
Abbildung 22: Experimentelles Variogramm - Lineares Modell (eigene Quelle)	66
Abbildung 23: Experimentelles Variogramm - Logarithmisches Modell (eigene Quelle)	66
Abbildung 24: Experimentelles Variogramm - Sphärisches Modell (eigene Quelle)	67
Abbildung 25: Experimentelles Variogramm - Exponentielles Modell (eigene Quelle)	68
Abbildung 26: Experimentelles Variogramm - Gauß'sches Modell (eigene Quelle)	69
Abbildung 27: GRID – Oberfläche in Rockworks 15 (eigene Bearbeitung)	78
Abbildung 28: Beispiel einer Oberfläche mit der SHAPE - Methode (Quelle: ABDUL-RAHMAN, A., PILOUK, M.: Spatial Data Modeling for 3D GIS. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 2008, Seite 28. , eigene Bearbeitung)	78
Abbildung 29: 2D – Tin Oberfläche (Quelle: ABDUL-RAHMAN, A., PILOUK, M.: Spatial Data Modeling for 3D GIS. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 2008, Seite 28. , eigene Bearbeitung)	79
Abbildung 30: nicht erfüllte Umkreisbedingung (links), erfüllte Umkreisbedingung (rechts)	80
Abbildung 31: Grundprinzip der Boundary Representation (Quelle: http://www.uni-weimar.de/cms/fileadmin/bauing/files/professuren/ism/Abschlussarbeiten/DA_Schneider_2006.pdf , Seite 13)	81
Abbildung 32: Oberflächenbasierende Objektdarstellungsmethoden (Quelle: ABD-08, Seite 32)	82
Abbildung 33: Voxeldarstellung – 3D Array (Quelle: http://www.everygraph.com/product/voxel3d/pic/dog.png)	83
Abbildung 34: Quadtree Struktur (eigene Abbildung)	84

Abbildung 35: Octree Repräsentation eines Körpers (Quelle: Abdul Rahman, ABD-08, Seite 34)	85
Abbildung 36: Vorgehensweise beim CSG - Verfahren (Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8b/Csg_tree.png).....	86
Abbildung 37: 3D TIN Körper (Quelle: ABD-08, Seite 36)	87
Abbildung 38: Volumenbasierende Objektdarstellungsmethoden (Quelle: ABD-08, Seite 37).....	88
Abbildung 39: Gegenüberstellung von Geometrie und Topologie am Beispiel eines Busliniennetzes (Quelle: DE LANGE [DEL-02, Seite 163])	89
Abbildung 40: Stratigraphische Kontakte (Quelle: JAN-10, Seite 80)	91
Abbildung 41: 8 Topologische Körper – Körper Relationen nach dem 9-Intersection Modell zwischen Körper A und Körper B (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 131).....	93
Abbildung 42: Topologische Relationen nach dem 9-Intersection Modell zwischen Fläche A und Körper B (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 125).....	94
Abbildung 43: Topologische Relationen nach dem 9+-Intersection Modell zwischen Linie A und Körper B (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 126).....	95
Abbildung 44: Darstellung der Kontaktbeziehungen zweier Flächen mithilfe der 9+-Contact Matrix (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 127).....	97
Abbildung 45: Darstellung der Kontaktbeziehungen einer Fläche mit einem Körper mithilfe der 9+-Contact Matrix (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 128)	97
Abbildung 46: Modellerstellungsprozess - Visualisierung (eigene Quelle).....	99
Abbildung 47: Subsurface - Datenvisualisierung mittels Google Earth [Quelle: DEP-10, Seite 109]	104
Abbildung 48: Rockplot (Quelle: eigene Darstellung)	106

Abbildung 49: oberes Profil: Effekt einer 3:1 vertikalen Überhöhung auf die Mächtigkeit. Unteres Profil: keine Überhöhung (Quelle: GRO-06, Seite 140).....	109
Abbildung 50: Graphische Bedienoberfläche von GSI3D [KES-09, Seite 4]	112
Abbildung 51: FENCE - Diagramm in GSI3D [Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/1/15/Faulted_gsi3d_model.JPG].....	112
Abbildung 52: Geländemodell des Untersuchungsgebietes (eigene Quelle)	124
Abbildung 53: Ausschnitt der Registerunterteilung beim Datenbankimport (eigene Quellen)	125
Abbildung 54: Kriging - Protokoll der Tegeloberkante (eigene Darstellung aus Rockworks 15)	131
Abbildung 55: Süd-Ost Ansicht der Stratigraphie (mit Orthofoto, eigene Quelle).....	133
Abbildung 56: Grundwasserspiegel - Kriging Report (eigene Quelle).....	135
Abbildung 57: Wasserspiegelinterpolation (eigene Quellen)	136
Abbildung 58: Profil DD1 (eigene Quelle).....	137
Abbildung 59: Direct - Push – Bohrgerätschaft (eigene Quelle)	138
Abbildung 60: Belastungskörpermodellierung (eigene Quelle).....	141
Abbildung 61: Benzol - Belastungskörper (eigene Quelle)	142
Abbildung 62: Sphärenmodellierung mit Zwischenstauer (eigene Quelle).....	144
Abbildung 63: ArcScene - Export (eigene Quelle)	145
Abbildung 64: Stratigraphie, südöstliche Ansicht (eigene Quelle)	i
Abbildung 65: Profil DD1 (eigene Quelle).....	ii
Abbildung 66: Profil EE1 (eigene Quelle).....	iii
Abbildung 67: Profil HH1 (eigene Quelle).....	iv
Abbildung 68: Profil II1 (eigene Quelle).....	v
Abbildung 69: Profil JJ1 (eigene Quelle)	vi
Abbildung 70: Benzolbelastung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle).....	vii
Abbildung 71: BTEX-Belastung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle).....	viii
Abbildung 72: MTBE-Belastung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle)	ix

Abbildung 73: TriTetra-Belastung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle)	x
Abbildung 74: Sphärenmodellierung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle).....	xi

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenbankeneigenschaften (eigene Bearbeitung nach STEINMETZ [STE-07, Seite 60]).....	36
Tabelle 2: Messstellenbezeichnungen (eigene Quelle)	121
Tabelle 3: Abfolge der Startigraphie einer Bohrsondierung (eigene Quelle)	122
Tabelle 4: Profilmesspunkte (eigene Quelle).....	137
Tabelle 5: Direct - Push - Sondierungen (eigene Quelle)	139
Tabelle 6: Prüf - und Maßnahmenswellenwerttabelle (eigene Quellen)	140

Abstract

This diploma thesis describes the fundamental theoretical and practical tools for generating three-dimensional geological subsurface models of a particular investigation area. One goal is to describe the modeling process at itself.

Another main objective of this work is to illustrate the various methods for collecting basic data of geological structures. A comprehensive part deals with the interpolation and representation methods of spatial data and also with the topology – topic in the field of geology. Visualization of three-dimensional bodies is also a part of the geological modeling process. An attempt was also to show the actual state of the art of this science. This kind of modeling can be used as a decision support system for complex geological subsurface processes but requires expert knowledge of the decision maker.

All data for this diploma thesis was provided by BLP geoservices. The paper wants to represent a cost-efficient and high-performing solution for building three-dimensional geologic bodies. It shows one possible approach among others. It was an attempt to find an efficient and quick way from data extraction to the final visualization of the result.

Vorwort

Diese Diplomarbeit beschreibt das wesentliche theoretische und praktische Rüstzeug zur Erstellung von dreidimensionalen geologischen Untergrundmodellen eines bestimmten Untersuchungsgebiets. Das Ziel dabei ist, den Prozess der Modellerstellung zu beschreiben.

Vorrangiges Ziel der Arbeit soll das Aufzeigen verschiedenster Möglichkeiten der Gewinnung der Datengrundlagen von geologischen Strukturen sein. Ein umfassender Teil der Arbeit beschäftigt sich mit den Interpolations- und Repräsentationsmethoden von raumbezogenen Daten und der Thematik der Topologie im Bereich der Geologie. Doch nicht nur die Modellierung von dreidimensionalen Körpern selbst, sondern auch die Visualisierung dieser soll als Teil des Modellierungsprozesses angesehen werden. Außerdem wurde versucht, auf den augenblicklichen Stand der Technik, den sogenannten „state of the art“, einzugehen. Diese Art der Modellierung kann zur Entscheidungsfindung bei komplexen geologischen Untergrundprozessen herangezogen werden und erfordert daher auch fachliches Wissen des Entscheidungsträgers.

Alle für die Modellierung relevanten Daten wurden durch den Auftraggeber dieser Diplomarbeit, BLP Geoservices, zur Verfügung gestellt. Diese Diplomarbeit versucht darüber hinausgehend einen idealen Mittelweg zwischen kostengünstiger und leistungsstarker Lösung bei der Erstellung von dreidimensionalen, geologischen Körpern. Es wurde versucht, einen effizienten und vor allem schnellen Weg von der Datengewinnung bis zur endgültigen Visualisierung des Endergebnisses zu finden.

1 Einleitung

Die Erde kann zu einer bestimmten Zeit durchaus nur ein Aussehen gehabt haben. Direkte Auskunft hierüber gibt sie nicht. Wir stehen ihr gegenüber wie der Richter gegenüber einem Angeklagten, der jede Auskunft verweigert, und haben die Aufgabe, die Wahrheit auf dem Wege des Indizienbeweises zu ermitteln.

- Alfred Wegener [WEG-29, Vorwort]

Dieses Zitat beschreibt die Problematik der Geowissenschaften und speziell die Problemstellung der Geologie sehr gut. Durch die Zugänglichkeit der Erdoberfläche ist diese vollständig beschrieben. Im Gegensatz dazu sind die Strukturen im Untergrund nur bedingt zugänglich. Es ist notwendig durch spezielle Techniken zu versuchen, geologischen Strukturen mittels unterschiedlich erfasster Indizien indirekt zu bestimmen und all diese Informationen miteinander in Verbindung zu setzen.

1.1 Einführung in das Thema

Die Erde ist hinlänglich ihrer Erdoberfläche vollständig beschrieben. Jedoch in Bezug auf die Strukturen und Eigenschaften, die sich unter dieser Erdoberfläche befinden, werden meist nur Vermutungen angestellt. Es gibt vorwiegend nur punktuelle Informationen, die sich mit den Vorkommnissen im geologischen Bereich beschäftigen. Es ist nicht möglich flächendeckende, nicht interpolierte, Informationen über die Vorgänge im Untergrundbereich erheben zu können, da es einerseits viel zu aufwendig und andererseits auch viel zu kostspielig wäre. Es gibt jedoch mitunter Untersuchungsgebiete, die es verlangen sich mit ihrer geologischen Untergrundsituation näher zu beschäftigen.

Analoge geologische Karten, die sich mit der Untergrundsituation eines bestimmten Gebiets beschäftigen, liefern Informationen über geologische Strukturen im Untergrund des betreffenden Gebietes. Es ist jedoch für Laien oft sehr schwierig geologische Karten richtig zu interpretieren und verstehen zu

können, da sie in Bezug auf die Restriktionen der traditionellen Kartographie und Geoinformation eingeschränkt sind. Hinlänglich dieses Problems kann die 3D Geovisualisierung mit Hilfe von speziellen Geographischen Informationssystemen Abhilfe schaffen. Sie kann die Restriktionen beseitigen und sich den neuen Herausforderungen der modernen, mehrdimensionalen Geoinformation und deren Visualisierungsmöglichkeiten stellen.

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll nun versucht werden, sich mit den Möglichkeiten und Limitierungen in der Erstellung und Visualisierungen von dreidimensionalen geologischen Modellen näher zu beschäftigen. Dabei spielt nicht nur die Datengrundlage, sowie die Aufbereitung und das Management dieser geologischen Daten eine wesentliche Rolle, sondern auch die Modellierung der daraus erstellbaren Modelle und deren Visualisierung selbst.

1.2 Forschungsstand und Zielsetzung

In Bezug auf die Erstellung und Visualisierung von dreidimensionalen geologischen Modellen gibt es erst in den letzten Jahren einige Softwareapplikationen, die sich damit beschäftigen. Einige Softwarepakete sind als eigenständig zu bezeichnen, andere werden als Plug-In Programme angeführt. Im Internet sind einige Webseiten zu finden, die sich mit dem Thema der dreidimensionalen Geologie beschäftigen und auch auf Software verweisen. Jedoch bei der Erstellung und Visualisierung im Bereich von dreidimensionalen geologischen Modellen weist der derzeitige Forschungsstand Lücken auf, wobei diese Diplomarbeit dazu beitragen soll diese Lücke zu schließen.

Die in dieser Diplomarbeit behandelten Forschungsfragen, die beantwortet werden sollen, sind folgende:

- **Welche Methoden und Arbeitsabläufe spielen bei der 3D Modellierung von geologischen Strukturen eine zentrale Rolle?**

- **Welche Visualisierungsmöglichkeiten von geologischen Körpern gibt es? Welche dieser Möglichkeiten ist die ideale Visualisierungsmöglichkeit und was ist nach der Modellierung bei dieser Visualisierung der geologischen Körper zu berücksichtigen?**
- **Wie ist der derzeitige Stand der Softwaretechnologien hinsichtlich der Modellierung und Visualisierung in der 3D Geologie und wie bewährt diese anhand eines konkreten praktischen Projektes?**

Wie bereits besprochen, soll nicht nur auf die gängigen Softwareapplikationen der 3D Geologie und das Datenmanagement in dieser Arbeit eingegangen werden. Ziel ist es auch, die Modellierung dieser Modelle näher zu beschreiben. Im Hinblick auf die Modellierung sind dabei auch die Interpolationsmöglichkeiten zu besprechen, die es erst ermöglichen aus punktuellen Messwerten flächendeckende Daten zu lukrieren. Ebenfalls ist es wichtig, über die Repräsentationsformen von dreidimensionalen Modellen im Bereich der Modellierung zu berichten. Im Anschluss daran besitzt das Thema der Topologie innerhalb der dreidimensionalen Geologie ebenfalls Daseinsberechtigung in dieser Diplomarbeit. Im Anschluss zur Modellierungsthematik sollen auch die Visualisierungsmöglichkeiten von geologischen Modellen besprochen werden.

Der daraus resultierende, strukturierte Aufbau der Arbeit lautet folgendermaßen:

- Im ersten Kapitel soll auf das Thema eingegangen werden, d.h. es gibt eine kurze Einführung zum Thema und die Schilderung der Zielsetzung und des Forschungsschwerpunktes.
- In den folgenden fünf Kapiteln sollen die theoretischen Grundlagen des Themas behandelt werden. Als Erstes wird über das Thema 3D in der Geovisualisierung versucht, einen Einstieg in die Thematik zu finden. Im zweiten Kapitel wird auf die Grundlagen, Aufbereitung und das Management von geologischen Daten eingegangen. Im dritten und umfassendsten Kapitel soll die Modellierung von geologischen

Strukturen näher betrachtet werden. Im Anschluss zu diesem Kapitel behandeln die beiden letzten Kapitel die Thematik der Visualisierung von geologischen Strukturen und den augenblicklichen „State of the Art“ der 3D Geologie.

- Im siebenten Kapitel wird die praktische Umsetzung anhand der Beispiels „Gallneukirchen“ (OÖ) behandelt und das theoretische Rüstzeug praktisch angewandt.
- Nach der praktischen Umsetzung der Diplomarbeit folgen die Zusammenfassung, sowie das Resümee des Ergebnisses.
- Am Ende dieser Arbeit sollen einige beispielhafte Abbildung der erstellten Modelle präsentiert werden.

THEORETISCHE VORÜBERLEGUNGEN

TEIL I

2 3D in der Geovisualisierung

Die Wissenschaft der 3D Geovisualisierung in sogenannten Geoinformationssystemen hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Laut HAKE/GRÜNREICH & MENG [HAK-02, Seite 552] wird ein Geoinformationssystem (GIS) als

- ***Ein Informationssystem für die Erfassung, Verwaltung sowie anwendungsbezogene Verarbeitung und Präsentation von Geodaten (Daten mit Raumbezug)***

definiert.

Die Möglichkeit, raumbezogene Daten in einem dreidimensionalen Kontext zu betrachten, erleichtert es dem Laien wie auch dem Spezialisten, komplexe Sachverhalte besser zu verstehen. Mit dem Einzug der dritten Dimension in die Geovisualisierung sind auch die Notwendigkeit der Abstraktionen in der Datenaufbereitung und die damit einhergehenden Informationsverluste obsolet geworden. In dem folgenden Kapitel soll über die Restriktionen der traditionellen Kartographie und Geoinformation diskutiert werden und auf die neuen Herausforderungen der modernen Kartographie und zukunftsorientierten Geovisualisierung eingegangen werden. Weiter soll in diesem Kapitel der momentane Stellenwert der 3D Visualisierungsmöglichkeiten innerhalb der Geoinformationswissenschaften besprochen werden.

2.1 Restriktionen der analogen Kartographie und Geovisualisierung

Kartographie im konventionellen und traditionellen Sinne hat eine Vielzahl an Einschränkungen bei der Darstellung von raumbezogenen Informationen. Die Fortschritte in der rechnergestützten Technologie, sowie die Daten, die zur Verfügung stehen, erlauben es aber heute, laut DYKES [DYK-05, Seite 295-296], 3D zu nutzen, um geographische Daten zu visualisieren. Mehr als je zuvor ist es

heute möglich informationsreiche, interaktive, realistische und dynamische Visualisierungsprozesse auch in der 3D – Technologie zu nutzen.

Doch welche genauen Beschränkungen und Charakteristika gibt es in der konventionellen kartographischen Darstellung und wie weit können wir diese Beschränkungen mithilfe der 3D – Visualisierung umgehen? Das folgende Kapitel beschreibt die Restriktionen nach DRANSCH [DRA-97, Seite 6] und soll auch klären, welche neuen Möglichkeiten uns der Einsatz der dritten beziehungsweise vierten Dimension in der computergestützten, modernen Kartographie und Geoinformation gibt.

2.1.1 Der statische Charakter

Der statische Charakter der traditionellen kartographischen Darstellung, wie es DRANSCH [DRA-97, Seite 6-7] beschrieben hat, war eines der großen Probleme mit der die Kartographie noch bis vor einigen Jahren zu kämpfen hatte. Kartographische Darstellungen konnten lediglich Raumzustände zeigen, jedoch eine Wiedergabe von bestimmten Zeitabläufen war nicht oder nur über Umwege möglich. Die Schwierigkeiten, Änderungen von Zuständen anzuzeigen, führten dazu, die Zeitkomponente in kartographischen Werken oft nicht mit einzubeziehen. MUEHRCKE [MUE-78, Seite 128] formulierte es so: **„By making static maps...cartographers may simplify their job but they largely ignore the fact, that time is a vital part of the world“**. Um diesen Missstand der statischen Beschränkung auszubessern, wurden im Zuge des Entwicklungsprozesses in der traditionellen Kartographie Bewegungssignaturen entworfen, die beispielsweise Lageveränderungen von Objekten in einer bestimmten Zeit zeigen sollten. Für Entwicklungen von verschiedenen Zuständen sollten Gegenüberstellungen mittels Zeitreihenkarten helfen, Sachverhalte besser verstehen zu können. Auch gab es die Möglichkeiten, nicht nur einzelne Zustände zu bestimmten Zeitpunkten darstellen zu können, sondern auch deren relative oder absolute Differenzen in Karten zu zeigen. Das Problem dieser Darstellungen bleibt jedoch offensichtlich. Wiederum werden lediglich statische Darstellungen

gezeigt, denn die Dynamik der Veränderung, sprunghaft oder kontinuierlich, stetig oder unstetig, konnten in solchen Karten nicht wiedergegeben werden.

2.1.2 Der isolierende Charakter

Der isolierende Charakter ist, laut DRANSCH [DRA-97, Seite 7-8], ein weiteres Problem der traditionellen kartographischen Darstellung. Der abzubildende Georaum kann lediglich in eine zweidimensionale, begrenzte Kartenfläche übertragen werden und diese Beschränkung führt dazu, dass nur ein Bruchteil der Geoobjekte und deren Merkmale in der Karte repräsentiert werden. Eine beliebige Schichtung von Zeichen ist nicht möglich, da ab einem gewissen Maß an Signaturen und Zeichen deren Unterscheidbarkeit und Lesbarkeit nicht mehr gegeben ist. Diese Tatsache hat zu Folge, **„dass das Gesamtsystem im kartographischen Modell auf einzelne Objekte und einzelne räumliche, kausale oder funktionale Beziehungen reduziert wird und die Systemzusammenhänge aufgelöst werden“** – DRANSCH [DRA-97, Seite 7]. Dadurch ist die Darstellung des gesamten Wirkungsgefüges nicht möglich. Um diese Nachteile umgehen zu können, wurden verschiedene Präsentationsformen entwickelt, um den Verlust von Informationsebenen vorzubeugen. Beispielsweise Mehrschichtenkarten bei denen Ebenen, die in Zusammenhang stehen, graphisch übereinandergelegt werden konnten. Auch gab es die Möglichkeit, Einzelkarten in einer Kartenreihe nebeneinander oder transparente Deckblätter (Oleatenkarte) übereinander zu legen. Dabei muss der Kartenleser versuchen, die einzelnen Karten in einem Denkprozess zueinander in Beziehung zu setzen, was jedoch oft ungeübte Kartennutzer vor ein Problem stellen konnte. Die Nachteile der Darstellungen sind, dass sie komplex sind und dadurch Wahrnehmung wie auch Interpretation beeinträchtigen können. Es ist auch sehr schwierig, mehrere Einzelkarten derart im analytischen Denkprozess zu verknüpfen, um analytischen Nutzen daraus zu ziehen und ist lediglich sehr geübten Kartennutzern möglich.

Zur inhaltlichen Isolierung kommt laut DRANSCH [DRA-97, Seite 8] die für diese Arbeit sehr wichtige Komponente der räumlichen Isolierung traditioneller, kartographischer Darstellung hinzu. Inhaltliche und räumliche Isolierung stehen in

enger Beziehung zueinander. Sollen geographische Sachverhalte mittels einer begrenzten Karte oder eines begrenzten Modells dargestellt werden, so muss immer eine Reduzierung der Realität vorgenommen werden. Diese Generalisierung kann inhaltlich oder räumlich sein und auch in einer unterschiedlichen Gewichtung vorgenommen werden. Soll eine räumliche Isolierung relativ gering gehalten werden, so muss man eine größere inhaltliche Isolierung der geographischen Sachverhalte vornehmen und umgekehrt genauso.

2.1.3 Der selektive Charakter

Eine weitere Restriktion der traditionellen Kartographie ist laut DRANSCH [DRA-97, Seite 8-9] ihr selektiver Charakter. Es wird bei jedem traditionellen kartographischen Produkt lediglich eine Art der Darstellung gezeigt. Daten können jedoch auf verschiedenste Art analysiert und visualisiert werden. Diese Transformation der Daten hin zum fertigen kartographischen Produkt erfolgt in mehreren Teilprozessen, bei denen beispielsweise die Auswahl der Daten, des Maßstabes, der geometrischen und inhaltlichen Generalisierung und deren Klassifizierung, sowie die Auswahl des Darstellungstyps und der graphischen Gestaltung getroffen werden. Sämtliche Entscheidungen werden dabei vom Kartenautor getroffen und sind daher subjektiv. Die einzelnen Teilprozesse können deshalb auch als Filterprozesse angesehen werden, die vom Kartenersteller überwacht und dem Kartennutzer danach präsentiert werden. Es ist daher keine Abbildung des absoluten Modells der Wirklichkeit, sondern nur ein mögliches Modell der Realität. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass traditionelle, kartographische Darstellungen immer nur einen bestimmten Aspekt der Daten und ihrer Merkmale zeigen können. Einen Gesamtüberblick über die vorhandenen Daten kann sie jedoch nicht geben.

2.1.4 Der passive Charakter

Die vierte und damit letzte Beschränkung der traditionellen Kartographie ist laut DRANSCH [DRA-97, Seite 9-10] wiederum die Restriktion resultierend aus dem passiven Charakter. Die traditionelle Form der Kartographie hat den enormen

Nachteil, dass sie kein interaktives Kommunikationsmittel ist und daher vom Benutzer nicht nutzungsorientiert verändert werden kann. In der traditionellen Kartographie sind der Prozess der Erstellung und der Prozess der Nutzung voneinander getrennt. Der Prozess der Erstellung wird von einer anderen Person durchgeführt als der Prozess der Nutzung. Daher kann der Kartenersteller lediglich die Karte für einen Nutzertypen konzipieren und nicht auf individuelle Anforderungen der Kartennutzer und dessen Bedürfnisse eingehen. Das Medium der traditionellen Kartographie ist das Papier. Durch diese Eingeschränktheit ist daher das Medium der traditionellen Darstellung kartographischer Sachverhalte als passiv und statisch anzusehen. Es kann aus Gründen der Lesbarkeit nur eine begrenzte Menge an Information in analogen Karten gezeigt werden. Daher ist dieser Art der Kartographie sehr kosten- und zeitintensiv, sodass es in der Regel nur eine Karte ohne Alternativkarte zu einem bestimmten Sachverhalt gibt.

Die Vielzahl an Restriktionen der traditionellen Kartographie hatte die Folge, dass in der Vergangenheit Karten erstellt wurden, die in einem abgegrenzten Raum einen selektiven Sachverhalt zu einem bestimmten Zeitpunkt zweidimensional darstellen und dabei nicht auf die individuellen Vorgaben des Kartennutzers eingingen. Diese Beschränkungen wurden mit der stetigen Entwicklung der rechnergestützten Technologie in den letzten Jahren immer weiter in den Hintergrund gedrängt. Es stellen sich daher ganz neue Herausforderungen für den Bereich der Geovisualisierung und damit auch der Kartographie, die die vorher besprochenen Beschränkungen fast vollgehend auflösen.

2.2 Neue Herausforderungen in der Geovisualisierung und der zukunftsorientierten Kartographie

Aufgrund der Entwicklungen, die am Ende des letzten Kapitels besprochen wurden, war es nun auch möglich neue Anforderungsschwerpunkte der Kartographie und Geoinformation zu definieren. Diese zu definierenden Herausforderungen werden in DYKES et.al. [DYK-05, Seite 6] als **„geovisualization research challenges“** bezeichnet. Diese Aufgaben beziehen sich auf die neuen Möglichkeiten, die sich durch die Entwicklungen in der Hard – und Softwaretechnologie aufgetan haben und auch noch werden. Eine der Herausforderungen ist der Umgang der Geovisualisierung mit der **Möglichkeit der experimentellen, multimodalen Repräsentation von Karten und Kartenverwandten Ausdrucksformen**. Es soll eine der zukünftigen Arbeitsgebiete innerhalb der Geovisualisierungsforschung sein, die Technologie zu verstehen und zu fördern, um diese zum Informationsgewinn und zur Manipulation von raumbezogenen Daten nutzen zu können. Dadurch können Karten mehr Informationsvolumen und Dynamik bekommen, im Gegensatz zur traditionellen Kartographie und Geovisualisierung, bei der der dargestellte Raum als flach - also zweidimensional - und statisch angesehen werden kann. Jedoch existiert noch immer die Auffassung und das Paradigma der Geovisualisierung mit der Annahme, dass die Abstraktion von Information - die Generalisierung - essentiell für die Gewinnung von Erkenntnis ist. Daher ist es laut DYKES [DYK-05, Seite 7] wichtig, den wissenschaftlichen Fortschritt voranzutreiben und Vorteile aus den neu entwickelten Technologien zu ziehen, wie beispielsweise die Möglichkeiten der VR (Virtual Reality), multisensorische Repräsentationsformen sowie fortgeschrittene Arten der Interaktion von raumbezogenen Datenmodellen, um daraus Vorteile für die Geovisualisierung zu ziehen.

Eine weitere Herausforderung für die Geovisualisierung ist der **Umgang mit sehr großen Datensätzen**. Raumbezogene Daten mit steigendem Speicherkapazitätsaufwand und zunehmend komplexer Struktur stellen laut DYKES [DYK-05, Seite 7] die Geovisualisierung vor eine stetig steigende Herausforderung. So sollte es Ziel sein, die Technologie, in den Bereichen die

Nutzen für die Geovisualisierung haben, voranzutreiben. Während man sich in den Anfängen der Geovisualisierung auf die Ausschöpfung des menschlichen Potentials beim Extrahieren der Bedeutung von komplexen Datensätzen verlassen musste, ist es nun Aufgabe der Wissenschaft, Methoden zu entwickeln, um mit solchen großen Datensätzen effizient arbeiten zu können. Letztlich sollte dann das menschliche Verständnis dazu genutzt werden, um einen Untersuchungsprozess zu steuern, der auf der visuellen Verarbeitung, dem Fachwissen und modern rechnergestützter Techniken basiert, um Modelle und Beziehungen zwischen ihnen und deren Bedeutung aufzulösen. Hauptpunkt dabei ist, dass viele existierende Methoden und Werkzeuge geographisches Wissen und Bedeutung nicht in effizienter Art und Weise entschlüsseln können. Und hier sollten auch die Herausforderung der neuen Geovisualisierung gesehen werden. Es hängt jedoch nicht nur von der Entwicklung von entsprechenden neuen Werkzeugen und Methoden ab, sondern es erfordert auch enorme Anstrengungen in der gezielten Theoriebildung, in der Repräsentation und dem Management von raumbezogenen Wissen, um effizient mit großen Datensätzen umgehen zu können.

Annäherungen in der Telekommunikation und Ausgabetechnologie machen Multi-User – Systeme laut DYKES [DYK-05, Seite 7-8] zu einem weitaus effektiveren, durchdachteren, zugänglicheren und einfacheren Werkzeug zur Informationsgewinnung. Der Umgang mit raumbezogenen Daten erfordert ebenfalls **koordinierte Arbeit von Gruppen**. Die traditionelle Geovisualisierungswissenschaft konzentriert sich jedoch noch immer auf individuelle Experten, die in einem isolierten, privaten Bereich arbeiten. Daraus resultieren Werkzeuge und Methoden im Umgang mit raumbezogenen Daten, die sehr individuell sind. Es ist nun Aufgabe, eine neue Generation von Techniken und Kompetenzen zu entwickeln, um die Zusammenarbeit hinsichtlich der Geovisualisierung verbessern zu können. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die kognitiven, sozialen und „Usability“-Probleme gelegt werden, sowohl unter Mitarbeitern als auch zwischen Mensch und Computer.

Technologie ist, laut DYKES [DYK-05, Seite 8], ein wesentlicher Treiber in der Entwicklung der Geovisualisierung. Man kann sehr viel von Disziplinen lernen, die die ***nutzungsorientierte Gestaltung*** für ihre Wissenschaft entdeckt und weitergenutzt haben. Hierbei wird der Nutzer des Systems mit all seinen Zielen, Aufgaben und Erwartungen in den Mittelpunkt gestellt. Es sollten Werkzeuge geschaffen werden, die die menschlich-räumliche Wahrnehmung und das Potential der visuellen Repräsentation dafür nutzen, um das Denken, Lernen, die Problemlösungen und Entscheidungsfindungen von Nutzern zu unterstützen.

Wie zu erkennen ist, sind aus den Restriktionen der traditionellen Kartographie und Geovisualisierung, die im vorigen Kapitel besprochen wurden, Großteils neue Herausforderungen für die Wissenschaft geworden. Aus statischen Karten, die in einem abgegrenzten Raum einen selektiven Sachverhalt zu einem bestimmten Zeitpunkt zweidimensional darstellen und dabei nicht auf die individuellen Vorgaben des Kartennutzers eingehen, sollen nun durch experimentelle, multimodale, mehrdimensionale und interaktive Karten oder kartenverwandte Darstellungen ersetzt werden, die von einer koordinierten Gruppe von Experten erstellt werden und in denen sich ein dynamischer Sachverhalt nutzungsorientiert darstellen lässt und dabei von vielen Kartennutzern bearbeitet werden kann, basierend auf einem großen Datensatz.

Die Herausforderungen, der die Geovisualisierung und zukunftsorientierte Kartographie, DYKES [DYK-05, Seite 6-8] zufolge, gegenüberstehen, sind zusammenfassend also folgende:

- ***Möglichkeit der experimentellen, multimodalen Repräsentation von Karten und Kartenverwandten Ausdrucksformen.***
- ***Umgang mit sehr großen Datensätzen.***
- ***Koordinierte Arbeit von Gruppen bei der Erstellung, Analyse und Visualisierung von raumbezogenen Daten.***
- ***Nutzungsorientierte Gestaltung für den Kartennutzer.***

Es gibt auch bereits Technologien, die die Entwicklung hin zu solchen Produkten beschreiben. In einem Onlineartikel der Zeitung DER STANDARD [STA-11] im Real-Einsatz wird über die Firma Oblong Industries berichtet, die mithilfe eines sehr innovativen Userinterface verschiedenste Sachverhalte visualisieren und auch steuern kann. Mittels eines speziellen Handschuhs, der laut den Verantwortlichen der Firma auch bald nicht mehr notwendig sein wird, wird die Benutzeroberfläche gesteuert. Diese Technologie ermöglicht laut den Herstellern eine interaktive Visualisierung von sehr großen Datenmengen und ermöglicht auch mehreren Usern zeitgleich die Benutzeroberfläche zu steuern [OBL-11]. Auch ist es mithilfe des Systems möglich, raumbezogene Visualisierungen steuern und bearbeiten zu können. Die folgende Abbildung zeigt das Interface-System bei der Visualisierung und Steuerung von raumbezogenen Daten.



Abbildung 1: Oblong Industries User-Interface

2.3 3D in der Kartographie und Geovisualisierung

Die Restriktionen und daraus resultierenden Herausforderungen der Geovisualisierung haben großen Einfluss auf die weiteren Entwicklungen in der Kartographie und Geovisualisierung. 3D ist ein nicht mehr wegzudenkender Bereich dieser Wissenschaft. Aus diesem Grund soll auf den nächsten Seiten die grundlegenden Begriffe geklärt und näher beschrieben werden. Auch sollen Möglichkeiten der 3D Geodatenakquierung und deren Weiterverarbeitung gezeigt werden.

Um sich mit der Möglichkeit der 3D-Darstellung von raumbezogenen Sachverhalten in der Kartographie und Geoinformation auseinandersetzen zu können, sollte als erstes der Begriff der Dimensionen definiert werden. In der Geoinformatik ist folgende Definition für die Dimensionalität eines Geoinformationssystem laut BILL [BIL-99a] (in HILBRING [HIL-05, Seite 9-10]) üblich:

- **Zweidimensional:**

„(ein Geoinformationssystem ist zweidimensional) wenn sich seine Geometriedaten lediglich auf x und y – Koordinaten (Planimetrie) beziehen und keine Höhenangaben vorliegen.“

- **Zweieinhalbdimensional:**

„(Ein Geoinformationssystem ist zweieinhalbdimensional) wenn zur Lagegeometrie die Höhe z als Attribut gespeichert ist. Diese Art der Höhenintegration wird auch als Sachdatenabsorption bezeichnet.“

- **Dreidimensional:**

„(Ein Geoinformationssystem ist dreidimensional), wenn die x, y und z – Koordinaten in hinreichender Dichte vollständig für das gesamte Teilgebiet abgespeichert sind.“

Werden die Lageparameter zusätzlich mit Zeitparameter (t) ergänzt, kann man im Bereich der Geoinformation auch von Vierdimensionalität sprechen.

2.3.1 Aktuelle Möglichkeiten der 3D – Geodatenverarbeitung

Es gibt innerhalb der Kartographie und Geoinformation zahlreiche Schwerpunkte, die sich mit dem Thema der Dreidimensionalität beschäftigen. Es wäre jedoch unmöglich, alle Tätigkeitsfelder in dieser Arbeit näher zu erläutern. Im Folgenden sollen zwei Beispiele der 3D – Geodatenverarbeitung näher beschrieben werden, um dadurch einen besseren Einblick in die Vielfältigkeit der Thematik zu ermöglichen.

LIDAR

Light Detection and Ranging (LIDAR), oder auch Airborne Laser Surveying genannt (ALS), ist laut TSE, GOLD und KIDNER [TSE-08, Seite 162] eine relativ neue, unabhängige Technologie, welche digitale Geländemodelle und digitale Oberflächenmodelle, die in weiterer Folge in Kapitel 2.1.4 besprochen werden, automatisiert produzieren kann. Es ist eine laserbasierende Technologie, welche ein Signal absendet und die zurückkehrenden Signale von der topographischen Oberfläche wieder aufnimmt. Eine LIDAR–Einheit ist aus dem eigentlichen Laser, einem Global Positioning System (GPS) und einem Inertial Measuring Unit (IMU) aufgebaut. Die LIDAR–Einheit kann mit einem Flugzeug, einem Helikopter oder einem Satelliten kombiniert werden und dient als Quelle und Empfänger eines Laserimpulses. Mithilfe der Informationen der zusätzlich verwendeten GPS und IMU Messinstrumente ist es möglich, den absoluten Standort und die Orientierung der LIDAR–Sensoren zu rekonstruieren. Die Inertial Measuring Unit wird zur Korrektur der Fehler des Roll-Nick-Gier – Winkels (Roll-Pitch-Yaw – Winkel) verwendet. Dieser Winkel gibt Auskunft über die drei möglichen Drehbewegungen eines Flugkörpers während der Aufnahme und dient der Beschreibung der Orientierung der Trägereinheit des LIDAR–Systems im dreidimensionalen Raum. Das GPS Messinstrument beschreibt die Flughöhe sowie die Flugbahn und wird mit einer Ground Control – Einheit am Boden gekoppelt, um die Genauigkeit zu erhöhen. Die folgende Abbildung zeigt die Methodik der Vorgehensweise bei einer LIDAR–Datenerhebung.

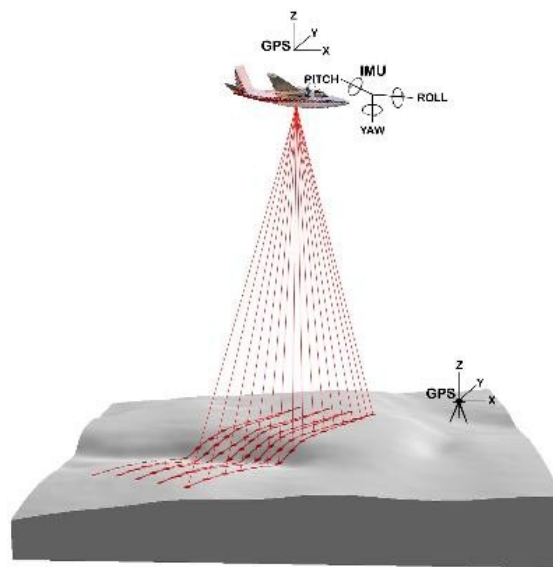


Abbildung 2: LIDAR Datenerhebung (Quelle:
http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/images/lidar_schematic.jpg)

Neben der Verwendung von LIDAR-Daten für Digitale Geländemodelle oder Digitale Oberflächenmodelle, die auch als Rohdaten für weiterführende geologische Modellierung genutzt werden, gibt es laut VERMA, KUMAR und HSU [VER-06, Seite 1] auch Methoden zur Ermittlung und Rekonstruktion von dreidimensionalen, geometrischen Modellen von komplexen Gebäuden in einem städtischen Gebiet mithilfe von LIDAR-Daten. Dabei werden aus den als Punktwolken vorhandenen Daten Oberflächeninformationen mittels Modellierungsalgorithmen extrahiert und weiterverwendet.

Augmented Reality

In den letzten Jahren werden laut LIAROKAPIS et. al. [LIA-05, Seite 1] geographische Daten, die vorher für Geographische Informationssysteme genutzt wurden, immer häufiger für Augmented Reality (AR) verwendet.

Augmented Reality und dessen Systeme werden laut RIEDL [RIE-10d, Seite 110-111] als „missing link“ zwischen der realen Welt und der virtuellen Welt bezeichnet. AR dient dabei dem Nutzer zur Unterstützung des Anwenders direkt am Ort des Interesses. Dabei wird das visuelle Abbild, das der Betrachter von der echten, realen Umwelt erhält durch zusätzliche Informationen aus dem virtuellen

Raum überlagert bzw. ergänzt. Die Lage des virtuellen Raumes wird dabei vom AR-System entsprechend dem augenblicklichen Standort und der Blickrichtung des AR – Systems sowie des Betrachters in den realen Raum projiziert. Laut RIEDL [RIE-10d] ergibt sich eine völlig neue Betrachtungsweise jeglicher raumbezogener Daten, da es möglich ist, diese direkt vor Ort darzustellen. Zur Generierung bzw. Wiedergabe von Virtuell Reality und damit auch Augmented Reality – Applikationen sind laut RIEDL [RIE-10d] drei Komponenten notwendig:

- **Kommunikationseinheit (Sichtgerät, Zeichenträger, Steuervorrichtung)**
- **Modellierungs -, Abspielumgebung (Builder, Formate, Browser/Viewer)**
- **Daten (3D – Koordinaten)**

Eine äußerst interessante Anwendungsmöglichkeit der AR wird beim Beispiel des internationalen Teams vom Ludwig Boltzmann Institut für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie (LBI-ArchPro) ersichtlich. Durch den Einsatz eines Ground Penetrating Radar (GPR) – Gerätes, das in weiterer Form im Kapitel 2.1.2 näher besprochen wird, konnte laut NEUGEBAUER [NEU-11] im Archäologischen Park Carnuntum eine in ihrer Vollständigkeit und Größe international einzigartige Gladiatorenschule entdeckt werden. Mit den aus der GPR – Messung gewonnenen Daten konnte unter anderem eine dreidimensionale, virtuelle Animation der Gladiatorenschule erstellt werden. Darüber hinaus wurde eine eigene Applikation entwickelt, mit der der Nutzer die 3D Visualisierung des Modells direkt im Gelände auf dem Smartphone verfolgen können. Die Visualisierung kann mittels der Software *Wikitude World Browser* betrachtet werden, die als eine mobile Augmented Reality Anwendung bezeichnet werden kann. Hierbei fungiert das kamerafähige Smartphone als Kommunikationseinheit, das mittels GPS Sensoren die genaue Position des Nutzers ermitteln kann. Als Modellierungs- und Abspielumgebung wird die Softwareapplikation *Wikitude World Browser* genutzt, mit dessen Hilfe die 3D-Daten der Animation der

Gladiatorenschule in das eingeblendete Kamerabild des Handys ergänzt werden kann.

Das nachfolgende Bild zeigt die Visualisierung der Gladiatorenschule, die mittels der Softwareapplikation und eines entsprechenden Endgerätes als Augmented Reality – Modell direkt im Archäologischen Park Carnuntum begutachtet werden kann.



Abbildung 3: Gladiatorenschule Carnuntum (Quelle: <http://carnuntum.7reasons.at/>)

2.4 3D in der Geologie

Auch die Geologie beschäftigt sich klarerweise mit raumbezogenen Daten. In dieser Disziplin haben die neuen Möglichkeiten der dreidimensionalen Darstellung ein sehr großes Potential. Geologische Strukturen mithilfe von drei Dimensionen zu beschreiben, macht es für den Nutzer wesentlich einfacher das Gefüge der Geologie ganzheitlich besser verstehen zu können. Um sich daher mit der Thematik der Dreidimensionalität in der Geologie besser befassen zu können, sollten anfänglich die Begriffe, die in Beziehung dazu stehen näher erläutert werden. Laut ELFERS et al. [ELF-04] werden der Begriff 3D-Geologie und Geokörper folgendermaßen definiert:

- 3D Geologie:

„3D-Geologie ist die Modellierung und Dokumentation des geologischen Wissens über den Untergrund als Geokörper. Dabei werden geologische Kartiereinheiten als Homogenbereiche in Bezug auf Stratigraphie, Lithologie und Genese definiert und aufgenommen (Geologisches Basismodell).“

- Geokörper:

„Geokörper sind dreidimensionale Abbilder des Untergrundes. Sie entstehen durch die geologische Modellierung, beschreiben begrenzte Körper mit gleichen Eigenschaften und sind durch Flächen (z.B. Top, Basis, Störungen) allseitig begrenzt. Die Gesamtheit der Geokörper bildet das geologische Basismodell.“

Wie auch in der konventionellen Kartographie und Geoinformation hat sich das Thema 3D auch im Fachbereich der Geologie in den letzten Jahren sehr stark entwickelt. Laut ZANCHI [ZAN-09, Seite 1] werden geologische Strukturen als dreidimensional beschrieben und können, wenn man die Zeit mit einbezieht, sogar als vierdimensional betrachtet werden. Sich mit dieser ganzheitlichen 4-

Dimensionalität von geologischen Daten zu beschäftigen, war vor der Entwicklung von 3D-Software Mitte der 1990er Jahre als fast unmöglich anzusehen. WALLACE (in [BAR-04, Seite 184 ff.]) drückte es gar so aus: **„There is no substitute for a geological map and section - absolutely none. There never was and there never will be.“** Jedoch kann diese Aussage aufgrund der letzten Entwicklungen im Bereich der 3D Rekonstruktion und Geologie als nicht weitsichtig genug tituliert werden, da man dreidimensionale geologische Modelle sehr wohl als Alternative zu geologische Karten und geologischen Profilen sehen kann. Heutzutage sind GISe, Datenbanken und 3D Visualisierungssoftwareapplikationen sehr geeignete Werkzeuge, die von Geowissenschaftlern genutzt werden, um bestimmte geologische Sachverhalte darzustellen, abzubilden, zu interpretieren, zu modellieren und schlussendlich zu analysieren.

Konventionelle Methoden der digitalen Kartierung (GIS) werden nach MALOLEPSZY [MAL-05, Seite 215-224] meist genutzt, um geologische Oberflächenkarten sowie geologische Untergrundkarten in einen digitalen zweidimensionalen Raum zu überführen. Digitale Polygone, Polylinien und Punkte repräsentieren geologische Informationen bei sich überschneidenden geologischen Strukturen. Diese Vorgehensweise scheint nicht sehr unterschiedlich im Vergleich zur traditionellen kartographischen Arbeitsmethodik. Diese digitale Art und Weise der geologischen Kartierung bedient sich, im Gegensatz zur analogen Kartierung, nur an den neuen Technologien der Datenakquirierung, Speicherung, Prozessmethodik und Visualisierung. Wie auch in der traditionellen, analogen, geologischen Kartierung wird die dritte Dimension bzw. auch die vierte dem „gewöhnlichen“ Kartenbenutzer vorenthalten. Es ist dann Aufgabe eines Spezialisten, die zweidimensionalen Karten zu interpretieren, um die geologischen Untergrundstrukturen abzubilden bzw. verstehen zu können. Leistungen der Hardware und Software ermöglichen uns heute die Speicherung, das Management sowie die Visualisierung von umfangreicheren und komplexeren Daten, die notwendig sind, um 3D geologische Strukturen zu repräsentieren.

Geologische Karten waren und sind laut ZANCHI [ZAN-09, Seite 1] sehr hilfreich, jedoch sollten sie in Zukunft wesentlich einfacher für ein breiteres Publikum zu verstehen sein, als in der Vergangenheit. Diese Aufgabe könnte die 3D Modellierung und Visualisierung von geologischen Sachverhalten, die nicht nur auf Symbole und Farben basiert, übernehmen. Die zukünftige Aufgabe der 3D Geologie soll sein, die räumlichen Verhältnisse zwischen Geokörpern darzustellen. Die Darstellung von 3D geologischen Modellen hat nicht nur den Vorteil der Präsentation für Manager, Konzerne, Politiker, Interessensgruppen und auch Kindern beim Besuch von virtuellen Museen. Der größte Vorteil liegt in der Beseitigung der Limitierung der konventionellen 2D Darstellung und dem damit verbundenen Verlust von einer Dimension und dem Verzerren der räumlichen Beziehung von Körpern. Ein weiterer Grund für die Nutzung von multidimensionalen Modellen ist der Aufbau von digitalen Daten (z.B.: Reflexionsseismik, LIDAR, usw.). Dieser Aufbau erlaubt die Manipulation in drei Dimensionen und die damit verbundene Darstellung aller verfügbaren Informationen.

2.4.1 Anforderungen an ein dreidimensionales geologisches (Basis-Modell)

Ein geologisches Modell soll nach ELFERS et al. [ELF-04, Seite 4] die Grundlage für den Aufbau von fachspezifischen Modellen der angewandten Geowissenschaften sein. Dabei ergeben sich nach ELFERS et al. [ELF-04, Seite 4] einige Anforderungen für ein geologisches (Basis-)Modell.

- ***„Lithologisch-strukturell definierte Homogenbereiche stehen in der Regel in einer stratigraphischen Abfolge.“***
- ***„Zwischen den Geokörpern des Modells muss eine Topologie aufgebaut sein (benachbarte Körper müssen sich „kennen“).“***
- ***„Geokörper müssen nach Bedarf veränderbar und untereinander kombinierbar sein.“***

- **„Teilmodelle müssen zu einem Gesamtmodell verknüpfbar sein.“**
- **„Veränderungen müssen nachvollziehbar sein.“**
- **„Die 3D-Modelle müssen auswertbar und räumlich visualisierbar sein.“**
- **„Modellbestimmende und abgeleitete Eigenschaften müssen recherchierbar und auswertbar sein.“**
- ELFERS et al. [ELF-04, Seite 4]

3 Grundlagen , Aufbereitung und Management von geologischen Daten

Die Modellierung und Visualisierung von raumbezogenen Sachverhalten im dreidimensionalen sowie speziell im geologischen Raum verlangen eine Vielzahl an Prozessschritten. Das vorangegangene erste Kapitel sollte lediglich einen Einstieg in das Thema bieten. Die ersten wichtigen Schritte bei der Modellierung und Visualisierung von geologischen Daten im dreidimensionalen Raum stellen die Generierung der Datengrundlage, die Aufbereitung und die Speicherung von diesen Daten dar.

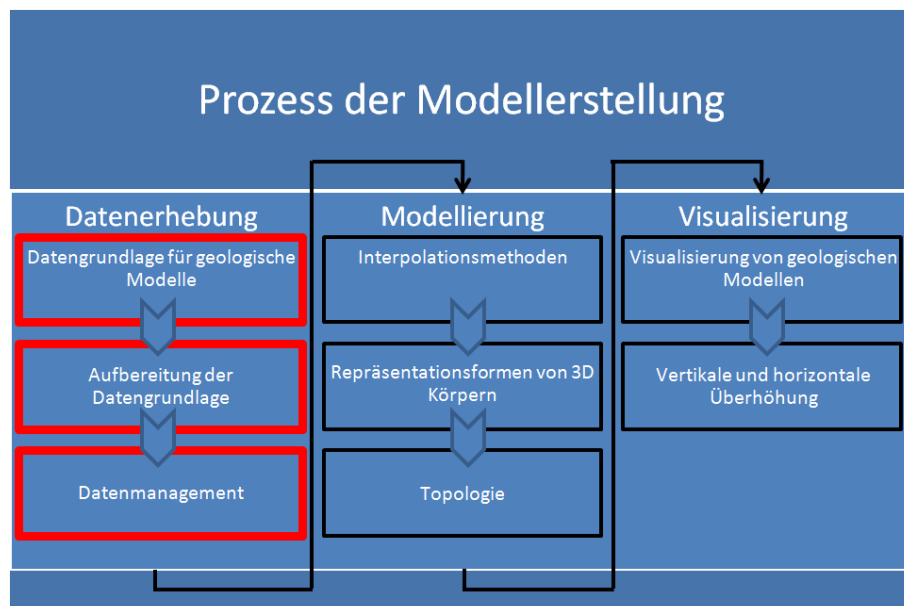


Abbildung 4: Modellerstellungsprozess - Datenerhebung (eigene Quellen)

Auf den folgenden Seiten soll kurz auf die Generierung der Daten, die Form der Ausgangsdaten sowie auf deren Aufbereitung eingegangen werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Wahl des Datenbankmanagementsystem (DBMS) sowie dessen unterschiedliche Eigenschaften.

3.1 Datengrundlage für geologische Modelle

Die Grundlage jedes Modelles ist eine bestimmte Menge an Daten, die für den Aufbau des Modells benötigt wird. Um ein geologisches Modell eines bestimmten Untersuchungsgebietes richtig darstellen zu können, wird eine ausreichende Datengrundlage benötigt. Es ist nicht möglich, lückenlos und flächendeckend im Untersuchungsgebiet geologische Daten zu erheben, und so muss - wie in den nächsten Kapiteln besprochen wird – zwischen den einzelnen Datenerhebungsstandorten mittels spezieller Methoden interpoliert werden.

Die folgenden Seiten beschreiben die verschiedenen Arten der Quellen von strukturellen Daten geologischer Gegebenheiten:

Nach GROSHONG [GRO-06, Seite 26-32] sind die wichtigsten Informationen für die Interpretation von geologischen Strukturen an einem bestimmten Erhebungsort, die Koordinaten der Berührungspunkte zwischen einzelnen geologischen Einheiten. Die primären Quellen dieser Informationen sind direkte Begehungen/Erhebungen an bestimmten Orten im Untersuchungsgebiet, Daten der Reflexionsseismik und schlussendlich die Bohrsondierungen selbst.

3.1.1 Direkte Begehungen/Erhebungen

Laut GROSHONG [GRO-06, Seite 26] ist es von Vorteil, in einem bestimmten Untersuchungsgebiet in einer Arbeitskarte einzutragen, an welchen Standorten bereits Begehungen und Erhebungen gemacht wurden. Die oberflächliche Topographie eines bestimmten Gebietes steht in unmittelbarer Beziehung mit der direkt darunterliegenden Geologie. Dieser Sachverhalt kann in späterer Folge somit als Richtwert für Berührungspunkte und Berührungslinien zwischen geologischen Einheiten in die Erstellung von Modellen mit einbezogen werden. Zwischen den observierten Regionen und den nicht-observierten Regionen eines Untersuchungsgebiets können - falls die geologischen Strukturen relativ simpel sind – die Berührungslinien der geologischen Einheiten abgeleitet werden und somit eine vollständige geologische Karte mit topographischer Untergrundkarte für ein Untersuchungsgebiet erstellt werden.

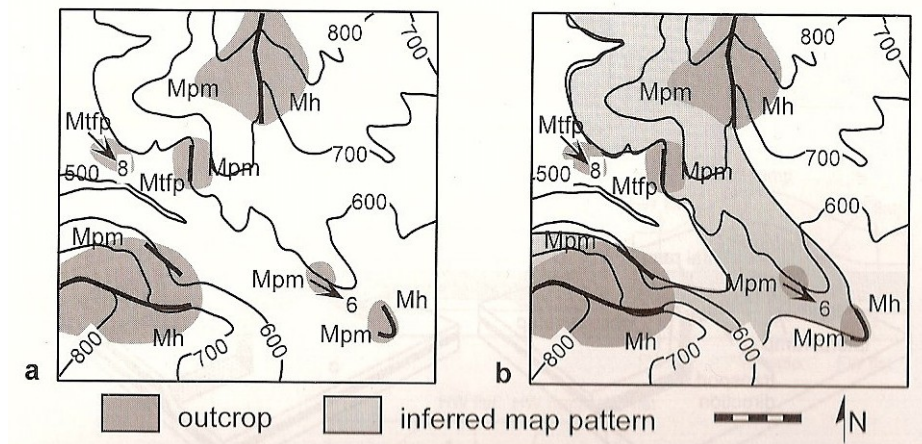


Abbildung 5: Direkte Begehungen und Erhebungen (Quelle: GROSHONG [GRO-06, Seite 26])

Auf den oben gezeigten Karten erkennt man geologische Informationen auf topologischen Grundkarten. Die Äquidistanz zwischen den Isohypsen ist in Fuß angegeben, die Länge des graphischen Maßstabs beträgt 1000 Fuß. Drei geologische Strukturen sind angezeigt, angeordnet von der ältesten zur jüngsten Formation (*Mtpf*, *Mpm*, *Mh*). Die Position der Lagerung ist durch einen Pfeil dargestellt, der in die Falllinie zeigt. Karte **a** zeigt Bereiche, in denen direkt erhoben wurde (schraffierte Fläche). Karte **b** zeigt die lückenlose, geologische Situation, bei der die Berührungslinien der geologischen Einheiten dick gezeichnet wurden, in Regionen, in denen Feldarbeit geleistet wurde, und dünn gezeichnet wurden in Gebieten, in denen die Linien abgeleitet wurden. Die heller schraffierten Flächen zeigen die interpretierten Strukturen der *Mpm* – Formationen.

3.1.2 Reflexionsseismik und Ground Penetrating Radar (GPR)

Laut GROSHONG [GRO-06, Seite 30-32] basieren viele Interpretationen über die Beschaffenheit des Untergrundes auf Profile der Reflexionsseismik. Schallenergie, die auf oder in der Nähe der Erdoberfläche erzeugt wird, wird von unterschiedlichen Schichtgrenzen im Untergrund reflektiert. Die Zeit, in der diese Reflektion zum Aufzeichnungsgerät zurückkehrt, steht direkt in Beziehung mit der Tiefe des reflektierenden Horizonts und der Geschwindigkeit zwischen der Oberfläche und dem Reflektor. Die strukturelle, geologische Interpretation von

Reflexionsseismik - Daten setzt die Konvertierung zwischen der Reflexionsdauer und der Tiefe voraus. Die Reflexionen werden anhand des Wissens, dass die Schallwellen entstehen, wenn ausgesandte Signale normal auf die reflektierenden Schichten treffen, interpretiert.

In der folgenden Abbildung kann man ein Reflexionsseismik - Profil erkennen. Das untere Profil ist im Unterschied zum oberen bereits interpretiert. Seismische Daten werden nach GROSHONG [GRO-06, Seite 30-31] als Karten oder als Profile dargestellt, in der die vertikale Achse, die die Zeit anzeigt, welche der Schall benötigt, um nach dem Absenden des Signals bei der Empfangsstation ankommt.

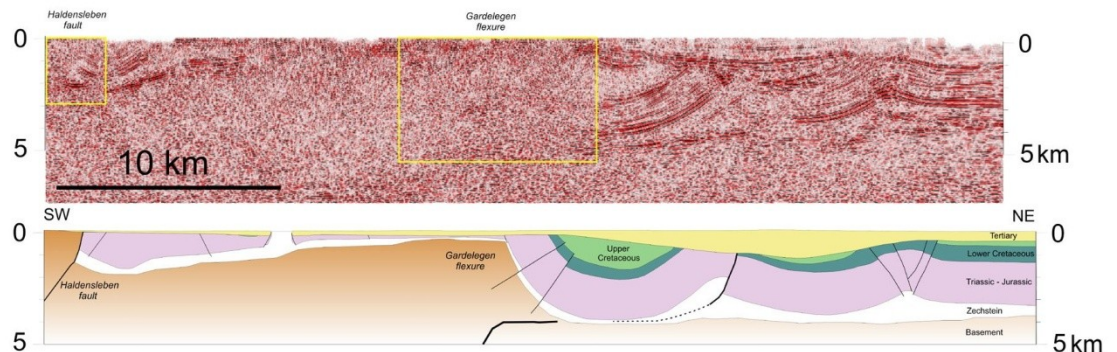


Abbildung 6: Reflexionsseismik (Quelle: http://idw-online.de/pages/de/image?id=69481&display_lang=de_DE)

Es kann jedoch sein, dass der Einfallswinkel der Schallwellen abgelenkt und somit die Tiefe der Reflexion falsch interpretiert wird (siehe folgende Abbildung). Die richtige Lage des Reflexionspunktes liegt dann abhängig vom Inklinationswinkel etwas tiefer als angenommen.

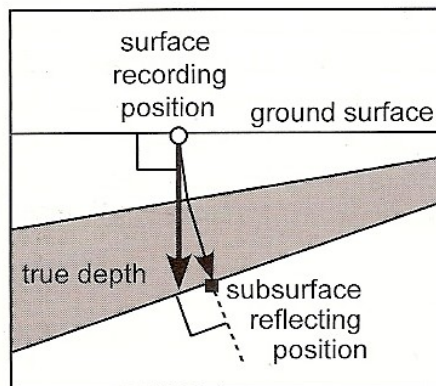


Abbildung 7: Reflexionsseismik 2 (Quelle: GROSHONG [GRO-06, Seite 31])

Eine zusätzliche Methodik, die von GROSHONG nicht erwähnt wird, ist die Ground Penetrating Radar (GPR) – Methodik. Die Anwendung der GPR – Technologie ist, laut JOL [JOL-09], sehr vielfältig, und wird in sehr vielen Disziplinen, wie beispielsweise Abschätzung von Grundwasserverschmutzungen, geotechnische Ingenieurarbeiten, Sedimentologie, Glazialogie oder auch Archäologie, eingesetzt. Die Methode nutzt Radiowellen, um das Untersuchungsgebiet zu beproben. Auch Materialien wie Holz, Beton oder Asphalt können heutzutage mittels moderner GPR–Technologie verarbeitet werden. Diese Diversität in Hinblick auf die Materialien, sowie das große Radiowellenfrequenzspektrum, das mittels dieses Verfahrens abgedeckt werden kann, ergibt eine Vielzahl an GPR–Anwendungsmöglichkeiten mit einem räumlichen Maßstab von Kilometern bis hin zu Zentimetern. Die am meist genutzte Form der Anwendung der GPR – Messung beinhaltet einen Impulsgeber und ein Empfängergerät in einer zueinander fixierten Geometrie. Ein sehr großer Vorteil dieser Methodik ist, laut JOL [JOL-09], eine zerstörungsfreie Datenaufnahme, die beispielsweise in der Wissenschaft der Archäologie von allergrößter Wichtigkeit ist.

Die Messeinheit kann beispielsweise, wie am folgenden Bild zu beobachten ist, ein zusätzlich Aufbau an einem Fahrzeug sein. Dabei wird das GPR–Gerät mithilfe des Fahrzeugs über den zu untersuchenden Geländeabschnitt bewegt und die dabei aufgenommen Daten mittels GPS – Technologie verortet.



Abbildung 8: GPR (Quelle: <http://carnuntum.7reasons.at/>)

Diese Art der zerstörungsfreien Rekonstruktion archäologischer Funde wurde beispielsweise, wie in Kapitel 1.3.1 bereits erwähnt, genutzt, um aus den gewonnenen Daten 3D Modelle zu modellieren. Die folgende Abbildung zeigt die Rohdaten der GPR-Methode am Beispiel der kürzlich mittels einer Pressemeldung veröffentlichte (5. September 2011) Entdeckung einer Gladiatorenschule im Archäologischen Park Carnuntum in Österreich.

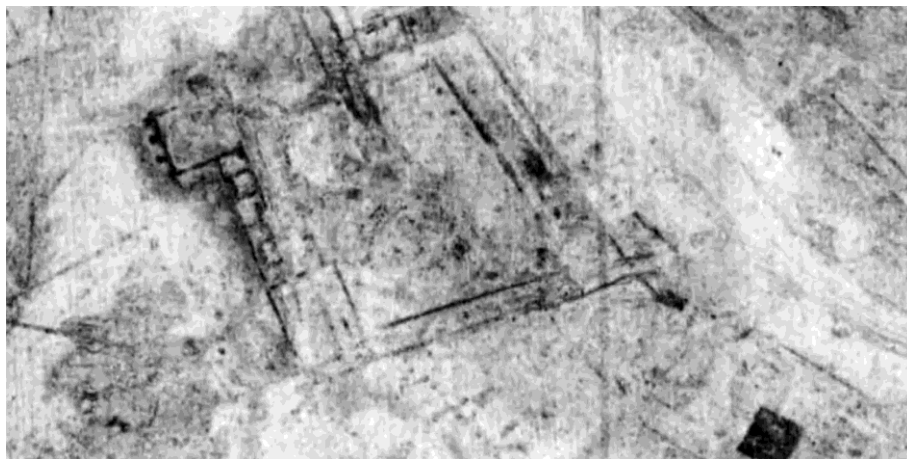


Abbildung 9: GPR - Daten (Quelle: <http://carnuntum.7reasons.at/>)

3.1.3 Bohrsondierungen

Bohrsondierungen liefern, laut GROSHONG [GRO-06, Seite 27-29], Bodeninformationen eines bestimmten Standortes über die Lage von geologischen Grenzen. Informationen von diesen Messungen werden mit Hilfe

unterschiedlicher Techniken aufgenommen und in sogenannten „Well Logs“ (Sondierungsmessdiagrammen) gespeichert.

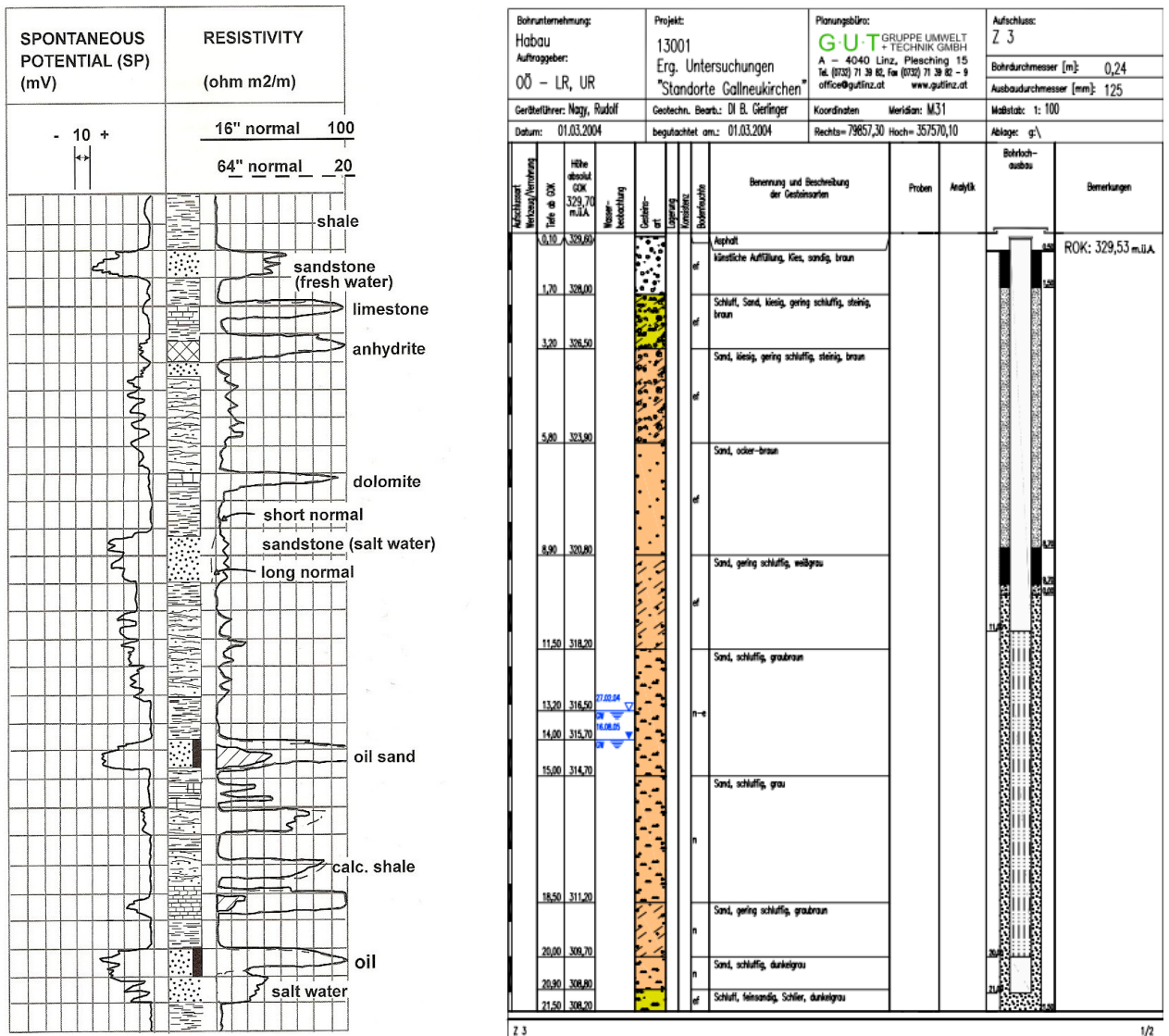


Abbildung 10: Sondierungsmessdiagramme (Quelle linke Abbildung: GROSHONG [GRO-06, Seite 28]; Quelle rechte Abbildung: BLP GeoServices GmbH)

Bei modernen Sondierungsverfahren werden, wie HUNT [HUN-07, Seite 56 und folgende] beschreibt, ein kegelförmiger Druckkopf und das Gestänge des Bohrergerätes bei variablem Druck mit Hilfe einer hydraulischen Vorrichtung kontinuierlich in den Boden gepresst. Diese Apparatur kann auf verschiedenartigen Plattformen arbeiten, wie beispielsweise kleinen portablen Einheiten, LKWs oder auch Bohrschiffen. Aufgrund des unterschiedlichen Spitzen- und Manteldruckes, laut ENVISOFT [ENV-08], kann auf die

Lagerungsdichte des zu durchdringenden Mediums und somit auf die Bodenart geschlossen werden. Diese Art des Sondierungsverfahrens wird als **Cone Penetration Test** (CPT) bezeichnet.

Ein spezielles Verfahren der CPT–Vorgehensweise stellt die **Direct – Push** Technologie dar. Bei diesem Verfahren handelt es sich, laut GEO-LOG [GEO-11], um eine multifunktionale Untersuchungsmethode, welche eine sehr präzise Charakterisierung der Vorgänge im Untergrund bei speziell kontaminierten Sondierungsstandorten darstellt. Bei dieser speziellen Form der Untergrundsondierung ist es zusätzlich zur Bodenarterfassung durch zusätzliche Sonden möglich, eine in-Situ Erfassung von flüchtigen Schadstoffen in Tiefenprofilen zu messen.

Diese Messungen sind wesentlich weniger kosten– und zeitintensiv als Messungen, bei denen Bohrungen zwecks Probenentnahmen unterbrochen werden müssen. Die Messungen können dann mithilfe der speziellen Ermittlungsmethode direkt im Bohrkanal mit einer bestimmten Tiefe verortet werden. Sie werden so, im Gegensatz zu herkömmlichen Messungen, nicht verfälscht und liefern daher für Modellierungs – und Visualisierungsarbeiten in weiterer Folge wesentlich genauere Daten in Bezug auf die vertikale Differenzierung von zu berechnenden Volumenkörpern.

Geometrie einer Bohrsondierung

Ein weiterer, wichtiger Punkt für die Modellierung ist die Geometrie der Bohrsondierung. Diese ist deshalb so wichtig, da lediglich der Standort der Bohrung an der Oberfläche genau eingemessen werden kann, jedoch nicht der Verlauf der Bohrung im Untergrund. Diese Messung des Verlaufes des Bohrkanales funktioniert mit Hilfe von indirekten Messungen, bei denen der Azimuth und die Neigung gemessen werden. Die folgende Skizze aus HOULDING [HOU-00, Seite 21-23] beschreibt den möglichen Verlauf einer Sondierung im Untergrund.

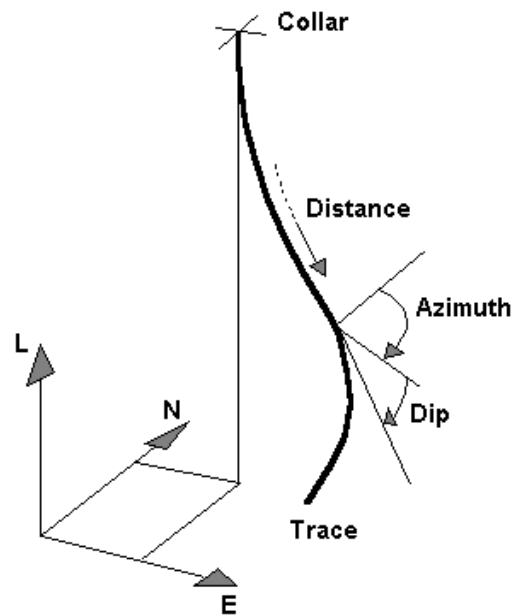


Abbildung 11: Bohrlochgeometrie (Quelle: HOULDING [HOU-00, Seite 22])

Als *Collar* wird der Ausgangspunkt auf der Oberfläche bezeichnet, an dem die Bohrsondierung gestartet wird. Hier werden auch die Koordinaten gemessen, um den Sondierungsstandort zu verorten.

Die Endteufe bezeichnet, laut WIKTIONARY [WIK-11], die von der Bohröffnung bis zum Ende der Sondierung lotrechte Entfernung.

Der Azimut bezeichnet, laut UNI-PROTOKOLLE [UNI-11], die auf Norden bezogene horizontale Richtung zu einem Punkt auf der Erdoberfläche.

Die Kenngröße *Dip* wird auch als Inklination bezeichnet und beschreibt den Neigungswinkel des Bohrverlaufs. Der Standardwert einer Sondierung, falls nichts anderes angegeben ist, ist ein geradliniger, vertikal-absteigender Kurs mit einer Inklination von 90° . Die Verlaufsgeometrie des Bohrlochs wird durch die Azimut – und Inklinationsunterschiede in den verschiedenen Tiefenstufen berechnet und danach mithilfe einer geglätteten und kontinuierlichen Kurve dargestellt.

In der folgenden Abbildung kann man nun die zuvor beschriebene Geometrie – Einstellungen einer Sondierung in einer geologischen Visualisierungssoftware sehen [HOU-00, Seite 23]:

	DISTANCE	Azimuth	Dip
1	0.00	180.00	80.00
2	6.10	182.00	81.00
3	49.40	180.00	78.00
4	89.00	191.00	76.00
5	142.00	186.00	71.00
6	189.00	186.00	64.00

Abbildung 12: Bohrlochgeometrie - Einstellungen (Quelle: HOULDING [HOU-00, Seite 22])

3.1.4 Digitale Geländemodell

Zu guter Letzt sollte auch nicht auf den Stellenwert des digitalen Geländemodells in Bezug auf die Datengrundlage von dreidimensionalen, geologischen Modellen vergessen werden. Diese Datengrundlage ist daher so wichtig, da es die oberste geologische Struktur nach oben hin abgrenzt. Außerdem ist es auch möglich, geologische Eigenheiten mittels eines Geländemodelles besser verstehen zu können.

3.2 Datenaufbereitung

Aufgrund von zahlreichen, zeitaufwendigen Arbeiten an den Ausgangsdaten, die auch auf verschiedenste Datenerfassungsmethoden, wie im vorigen Kapitel besprochen, zurückzuführen sind, ist es, laut STEINMETZ [STE-07, Seite 57-58], notwendig, über Beschreibung der durchgeführten und notwendigen Schritte des Datenmanagements zu berichten. Ursprünglich vorhandene Daten liegen oft in verschiedenartiger Form vor und müssen oft vor der Nutzung innerhalb eines Projektes aufbereitet werden. Mit dem Ziel der Vereinheitlichung und Zentralisierung der Daten ist auch die Möglichkeit gegeben, die dadurch erhaltenen Daten einer vereinfachten, gemeinsamen und zukünftigen Nutzung zuzuführen.

„Rohdaten“ können, laut STEINMETZ [STE-07, Seite 58], Attributdaten des Messstellenausbaus, Lage – und Geländedaten, Grundwasserhöhendaten oder Messwerttabellen sein. Diese Daten können oft in unterschiedlichen Dateiformaten vorliegen:

- ASCII – Dateien: Textbasierte – Dateien (American Standard Code for Information Interchange)
- MICROSOFT EXCEL – Tabellen
- MICROSOFT ACCESS – Datenbank-Dateien

Diese Rohdaten sollten zunächst darauf untersucht werden, ob notwendige Attributdaten, wie beispielweise Rechts – oder Hochwert, fehlen. Auch sollten Datensätze gestrichen werden, bei denen die zugehörige Messstelle nicht vermerkt ist oder ein Probenahmedatum nicht zu finden ist.

Weiters ist zu berücksichtigen, dass in manchen Fällen Firmen eigene Datenformate erschaffen, um eine leichtere und schnellere Integration der erhobenen Daten in die jeweilige Softwareapplikation zu gewährleisten (Bsp.: *.out – Dateien der Firma FUGRO zur schnelleren Integration in das Softwarepaket ROCKWORKS 15 der Firma ROCKWARE).

Des Weiteren zählen Daten, wie ein Digitales Geländemodell, das beispielsweise aus einem LiDAR-Datensatz aufgebaut werden kann, oder ein Orthofoto ebenfalls zu der Datengrundlage für die Visualisierung der geologischen Strukturen. Diese Daten müssen ebenfalls aufbereitet werden, damit sie für die Modellierung und Visualisierung genutzt werden können.

3.3 Datenbanken

Es ist theoretisch wünschenswert eine Speicherung aller Daten an einer zentralen Stelle in einem einzelnen Datenbankmanagementsystem zu gewährleisten. Die Vereinheitlichung und Umformung der Daten zu einer gemeinsamen Haltung innerhalb eines DBMS hat einige Vorteile. Bei einem relationalen DBMS ist eines dieser Vorteile, die bessere Wartbarkeit von Daten. Bei Serverdatenbanken, außer MS Access DBMS, kommen neben dem Vorteil der Mehrbenutzerfähigkeit, Sicherungsmaßnahmen, wie Rollback- oder Backupmechanismen hinzu, durch welche man die Datenbank auf einen beliebigen zwischengespeicherten Stand zurückspielen kann. In der folgenden Tabelle wird auf verschiedenste Vor- und Nachteile unterschiedlicher Datenbankmanagementsysteme hingewiesen. [STE-07, Seite 57-58]

	MS Access	EarthSoft Equis	ESRI ArcSDE
Stand-Alone	Ja	Nein, Speicherung in Access oder Oracle	Nein, Aufsatz zu Oracle oder MS SQL Server
Räumliche Abfragen	k.A.	k.A.	Ja
Mehrbenutzerfähigkeit	Bedingt	Ja	Ja
Rollback	Nein	k.A.	Ja
Lange Transaktion	Nein	Ja	Ja
Relationale Integrität	Ja	Ja	Ja
Graphische Bedienoberfläche	Ja	Ja	Ja (Benutzung aus ArcGIS)
Betriebssystem	MS Windows	MS Windows	Alle, für welches das unterlagernde DBMS

	unterstützt wird
--	------------------

Tabelle 1: Datenbankeneigenschaften (eigene Bearbeitung nach STEINMETZ [STE-07, Seite 60])

Bei Microsoft Access® handelt es sich um ein vollständiges, dateibasiertes, relationales Datenbankmanagementsystem mit einer GUI. Aufgrund der einfachen Handhabbarkeit in einer einzelnen Datei ist es, laut STEINMETZ [STE-07, Seite 60], für Projekte und Daten, die weitergegeben werden sollen, geeignet. Dieses Datenbankschemata ist auf eine Dateigröße von maximal zwei Gigabyte beschränkt.

Equis® von EarthSoft ist eine kommerzielle Datenbank, die speziell auf die Bedürfnisse der Speicherung, Auswertung und Visualisierung von Umweltdaten konzipiert wurde. Unter der Datenbank sind hier die Datenbankschemata (DB-Tabellen-Strukturen) zu verstehen, in denen die Daten gehalten werden. Die eigentliche Speicherung der Daten findet wiederum in MS Access® oder in ORACLE® statt. Equis bietet jedoch die Funktionalität der Integrationsmöglichkeit in andere Softwareapplikationen. Mittels Erweiterungen ist beispielsweise eine direkte Datenübergabe zu Rockworks®, MVS® oder ArcGIS® möglich. [STE-07, Seite 60]

ArcSDE (Arc Spatial Database Engine) bietet im Gegensatz zu einer gewöhnlichen (Personal) Geodatabase in ArcGIS Mehrbenutzer – Möglichkeit, im Netzwerk oder fortgeschrittene Funktionen, wie Langzeittransaktionen oder Rollbacks, und kann mit sehr großen Datenmengen umgehen.

4 3D Modellierung von geologischen Strukturen

Nachdem Fragen zu den Datengrundlagen sowie zu deren Aufbereitungen und Management im vorhergehenden Kapitel besprochen wurde, soll im dritten und umfangreichsten Kapitel der Diplomarbeit auf den Modellierungsprozess eingegangen werden. Dabei sollen Themen wie Modelldefinition, Interpolationsmethoden, Repräsentationsformen von dreidimensionalen Objekten, sowie der Begriff der Topologie näher erläutert werden.

Laut GAU [GAU-10, Seite 64] verlangt die Schätzung von unbekannten Werten, die Existenz eines Modells. Mithilfe dieses Modells soll die Basis für Schlussfolgerungen von bekannten Werten auf unbekannte, zu berechnende Werte gelegt werden.

Der Prozess der 3D Modellierung von geologischen Sachverhalten gliedert sich jedoch nicht nur in den eigentlichen Prozess der Modellierung, sondern ist ganzheitlich als Prozess der Modellerstellung zu sehen. Darunter versteht man nicht nur die Modellierung selbst, sondern auch die Erhebung, Aufbereitung und das Management für die bei der Modellierung erforderlichen Messwerte. Dieser Teil des Modellierungsprozesses wurde bereits im vorigen Kapitel besprochen. In weiterer Folge ist auch Visualisierung der Ergebnisse Teil des Modellierungsprozesses. Diese Teilbereiche gliedern sich wiederum in einzelne Teilaspekte, die wichtig sind, um den Modellierungsprozess ganzheitlich zu begreifen. Die folgende Abbildung versucht, dies zu veranschaulichen.

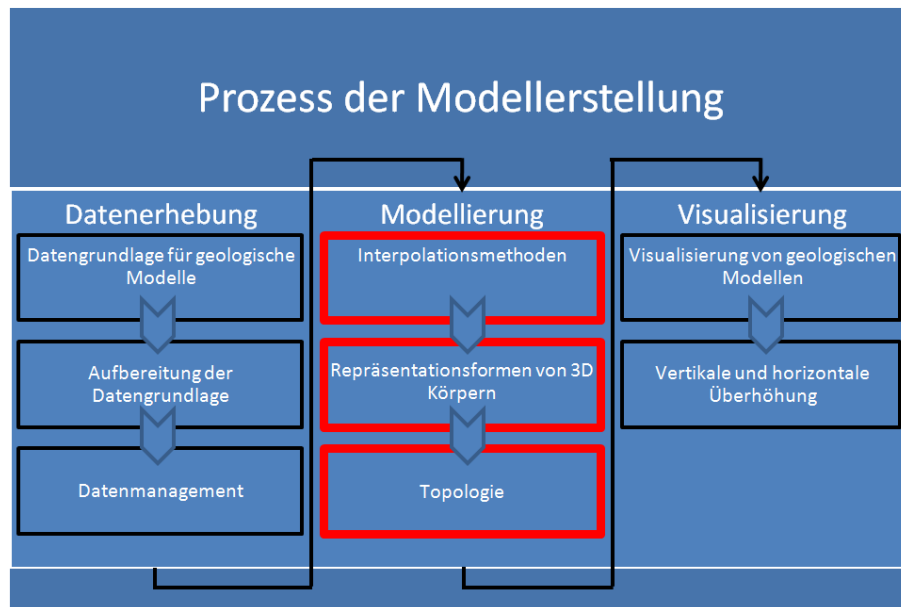


Abbildung 13: Prozess der Modellerstellung (eigene Bearbeitung)

Die Abbildung des Prozess der Modellerstellung soll keinesfalls als vollständig anzusehen sein. Sie soll lediglich die in subjektiver Sichtweise wichtigen Aspekte und theoretischen Grundlagen für die Modellerstellung zeigen. In den nun folgenden Kapiteln werden die theoretischen Teilbereiche der Modellerstellung genauer besprochen. Davor möchte ich allerdings auf den nächsten Seiten den Modelbegriff „per se“ erläutern.

4.1 Modellbegriff

Um Modelle des geologischen Untergrundes verstehen zu können, ist es wichtig, sich zuerst mit dem Modellbegriff an sich vertraut zu machen. Es gibt sehr viele Definitionen in Bezug auf das Wort Modell, die für gewisse Teilbereiche der Wissenschaft verschieden starke Aussagekraft besitzen. ALLGEMEINES ZUM MODELLBEGRIFF [MOD-11] bringt es sehr allumfassend auf den Punkt:

Ein Modell ist stets Modell von etwas, d.h. wir haben es mit einer Modellbeziehung zwischen einem gegenständlichen Komplex K (dem realen Urbild oder Original) und einem in gewissem Sinn ähnlichen Bild K' von K zu tun, das dann Modell genannt wird.

- **Was "ähnlich" bedeutet, hängt vom jeweiligen Zusammenhang ab (verkleinert, vereinfacht, in ein anderes Darstellungsmedium übertragen...)**
- **Modellierung bedeutet keinesfalls immer Veranschaulichung. Es kommt umgekehrt gerade darauf an, von den (häufig verwirrenden, unwesentlichen) Details einer Situation abzusehen und ein vereinfachtes Abbild zu entwickeln. Modellbildung geht einher mit Abstraktion.**
- **Die klassischen Naturwissenschaften sind vor allen Dingen an Erklärung und Prognose interessiert. Auch andere Wissenschaften suchen nach Modellen der physischen, sozialen und mentalen Wirklichkeit, um diese nicht nur zu erklären, sondern auch technologisch zu beherrschen.**

Die allgemeine Begriffsklärung bespricht die Aufgaben und Charakteristika des Modellbegriffs. Den Modellbegriff im Bereich der Geoinformationswissenschaften und speziell im Bereich der GISe kann man nach SAURER & BEHR [SAU-97, Seite 140] in LEYMÜLLER [LEY-01, Seite 32] wiederum in 4 Gruppen einteilen:

- Datenmodelle (Die Art der Datenspeicherung in einer Datenbank eines GIS)
- Kartographische Modelle (Die Art der Darstellung der Objekte bei ihrer Visualisierung)
- Deskriptive Modelle (Ein [meist] vereinfachtes Bild eines Objektes)
- Prognostische Modelle (Erlauben Vorhersagen von Entwicklungen) mit den Untergruppen:
 - Stochastische Modelle
 - Deterministische Modelle

In Bezug auf die zu modellierenden geologischen Prozesse wird, laut GAU [GAU-2011, Seite 52], regelmäßig auch zwischen deterministischen und stochastischen Prozessen unterschieden. Die Zuordnung zu einer dieser beiden Gruppen erfordert die Beurteilung, ob den Prozessen echte Ursachen zugrunde liegen oder die Prozesse zufallsbedingt ablaufen. Bei deterministischen Prozessen führen

eindeutige und nachvollziehbare Wirkungsmechanismen zu festen Wirkungsgrößen. Es sind also alle Einfluss – und Eingangsgrößen, die den Prozess beschreiben, vollständig und sicher bekannt. Stochastische Prozesse sind im Gegensatz dazu, solche Prozesse, bei denen das Ergebnis nicht vorhersehbar, also zufällig, ist. Die Ergebnisse solche Vorgänge können daher allenfalls mit einer gewissen, jedoch unsicheren, Eintrittswahrscheinlichkeit beschrieben werden. Laut GAU [GAU-10, Seite 52 - 55 und 77] wird jedoch davon ausgegangen, dass Zufall nicht existiert, insbesondere keine inhärente Eigenschaft der Natur ist und, dass jeder Prozess, egal in welcher Größenordnung, kausal gesteuert wird. Lediglich das Wissen über diese Prozesse wird als unvollständig angesehen. Im Bereich der geologischen Modellierung wird dies unter dem Begriff **knowledge uncertainty** zusammengefasst und beschreibt den beschränkten Stand des Wissens, zu dem auch die Unkenntnisse der Prozesse zuzuordnen sind. Demnach handelt es sich, laut BANDEMER [BAN-93], (in GAU [GAU-10, Seite 52]) nicht um eine „stochastische latente oder potentielle Unbestimmtheit..., sondern um Unkenntnis der eindeutig bestimmten Realität.“

Laut GAU [GAU-10, Seite 67] folgt aus der Tatsache, dass der notwendige Einfluss des Anwender auf den Modellierungsablauf sowie auf das daraus resultierende Modellierungsergebnis die Schlussfolgerung gestattet, dass Modelle nicht zur Darstellung von Sachverhalten dienen, sondern der Darstellung von Vorstellungen über einen bestimmten Sachverhalt. Grund dafür ist der Abstraktions– und Interpretationsprozess, der ausschließlich nur subjektiv durchzuführen ist, ohne die aber keine Modellierung durchführbar wäre. Es gibt zwei Abschnitte innerhalb des Modellierungsprozesses, in denen der Einfluss des Anwenders besonders deutlich wird:

- Im Zuge der Erkundung, Messung oder Beobachtung des zu modellierenden Phänomens.
- Im Zuge der Interpretation der Informationen dieser Erkundungen, Messungen oder Beobachtungen sowie deren Darstellungen im Laufe der Modellierung.

Jedoch kann das Ergebnis einer Modellierung und die im Modellierungsablauf damit einhergehende, unbewusste Abstraktion zwischen objektiver Realität und

subjektiver Realität sowie der bewussten Abstraktion zwischen subjektiver Realität und dem Erstellen eines Modells der Realität zu einer Problemlösung führen. Dieser Erkenntnisprozess soll helfen, durch Problemlösungsansätze im Modell eventuelle Problemlösungen in der Realität zu generieren. Die folgende Graphik soll diesen Ablauf des Erkenntnisprozesses und der Modellierung schematisch skizzieren:

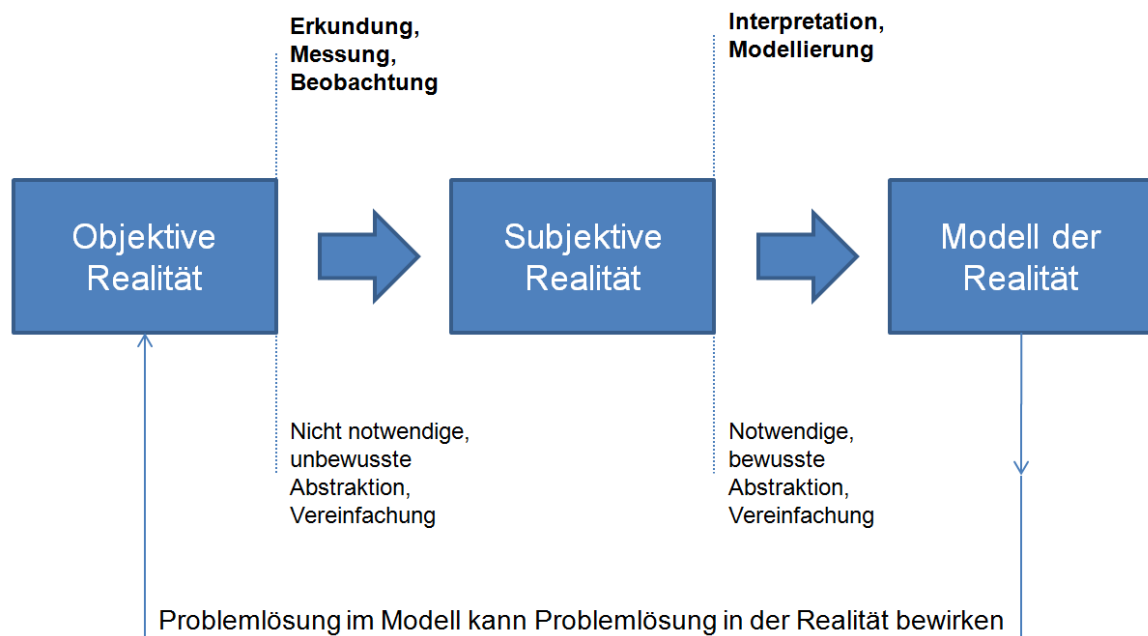


Abbildung 14: Modellierungsablauf (Quelle GAU [GAU-10, Seite 67] – eigene Bearbeitung)

4.2 Interpolationsmöglichkeiten von raumbezogenen Messdaten

Interpolation in der Kartographie und Geovisualisierung ist ein sehr wichtiges Thema. Es ist nicht möglich, in einem Untersuchungsgebiet flächendeckend Messdaten zu erheben, da dies einerseits technisch nicht realisierbar ist und andererseits, eine steigende Anzahl an Messungen auch mit steigenden Kosten verbunden ist. Weil jedoch punktuelle Messwerte im Bereich der Wissenschaften unattraktiv sind und mit kontinuierlichen Werten in den meisten Aufgabengebieten besser gearbeitet werden kann, ist die Interpolation einzelner Punktwerte zu einer unbegrenzten Anzahl an Schätzwerten unumgänglich. Mithilfe von Interpolationswerkzeugen werden diese Berechnungen umgesetzt. Im folgenden Kapitel wird auf Interpolationsmöglichkeiten innerhalb der Kartographie und Geovisualisierung eingegangen, speziell auch im Bereich der geologischen Modellierung. Es werden in weiterer Folge verschiedene Klassifizierungen der Interpolationsmethoden aufgezeigt und geklärt. Am Ende des Kapitels werden mit der Geostatistik und in weiterer Folge der Variographie und dem Kriging die wohl wichtigsten Formen der Interpolationsmöglichkeiten der Geowissenschaften behandelt. Als Erstes sollten jedoch die wichtigsten Terminologien geklärt werden, um einen Einblick in die Thematik zu bekommen.

- **Interpolation:** Interpolation ist die Ermittlung eines unbekannten Funktionswertes zu einem Argument, das zwischen zwei Argumenten mit bekannten Funktionswerten (Stützwerten) liegt. Mit der Hilfe von Interpolationsverfahren wird versucht, einen Attributwert an einer Stelle vorherzusagen, an der dieser Wert nicht gemessen wurde. Statt der Messung liegen in der Nähe des zu prädizierten Punktes an sogenannten Stützpunkten Werte vor. Damit lassen sich aus spärlich verteilten Beobachtungen kontinuierliche Oberflächen berechnen.

Laut GEOINFORMATIK LEXIKON DER UNI ROSTOCK [LEX-11b] in KISSAUER [KIS-04, Seite 3]

- **Extrapolation:** Im Gegensatz zur Interpolation wird hier der Verlauf einer Funktion außerhalb des durch Stützwerte (Messergebnisse) abgedeckten Bereichs weiter berechnet (nach BILL & ZEHNER [BIL-01, Seite 87] in KISSAUER [KIS-04, Seite 3]). Es ist also sehr problematisch, außerhalb der Stützwerte zu extrapolieren, da es zu sehr großen Fehlern in diesem Bereich kommen kann.

- **Approximation:** Unter Approximation versteht man, laut BILL & ZEHNER [BIL-01, Seite 12] in KISSINGER [KIS-04, Seite 3], die Annäherung eines vorhandenen Datenbestandes durch eine mathematische Funktion mit möglichst geringer Abweichung.

Nach BILL [BIL-99b, Seite 55] in KISSAUER [KIS-04, Seite 4] dient die Approximation der Beseitigung zufälliger Messfehler.

Die Interpolation von Messdaten ist also ein Werkzeug, um aus einer begrenzten Anzahl von verorteten Messungen eines bestimmten Untersuchungsgebietes ein Modell der Realität abzuleiten. Es hilft dabei aus einer restriktiven Menge an gemessenen Daten auf eine unbegrenzte Menge an geschätzten Daten zu schließen. Es gibt hinsichtlich der Klassifizierung der Interpolationsverfahren mehrere Möglichkeiten der Einordnung [HEB-04].

So ist es beispielsweise möglich, Interpolationsverfahren in kontinuierliche und abrupte Methoden zu unterscheiden. Diese Klassifizierung bezieht sich im Wesentlichen auf das Ergebnis der Interpolation, beispielsweise ob Bruchkanten oder Bruchlinien (zum Beispiel abrupte Werteänderungen an Klippen oder Verwerfungen) in die Berechnungen mit einbezogen wurden. Eine weitere Möglichkeit zwischen Interpolationsverfahren zu trennen, ist die Einteilung in exakte und nicht exakte Methoden. Bei exakten Methoden bedeutet dies, dass der geschätzte Wertebereich die vereinzelt-gemessenen, bekannten Punkte genau wiedergibt und somit die exakten Werte für vorhandene, nicht interpolierte Originaldaten reproduziert. Während auf der anderen Seite, beim nicht exakten Schema, die Schätzwerte für bekannte Messpunkte von den real – erhobenen

Werten abweichen können und die Methode für die Originaldatenpunkte approximierte Werte liefert. Die approximierte Methode wird klarerweise dann eingesetzt, wenn bereits bei der Erhebung der Messwerte bestimmte Unklarheiten zu erwarten sind. Ein dritter Weg der Unterscheidung von Interpolationsschemata, ist die Unterscheidung in globale und lokale Schätztechniken. Die globale Methode verwertet im Schätzverfahren alle im Untersuchungsgebiet auftretenden Daten. Die lokale Interpolation wird dagegen nur bei räumlich definierten Subsets des zu untersuchenden Raums angewandt. Es wird also nur eine Teilmenge aller Datenpunkte zur Schätzung des Interpolationspunktes verwendet.

- [HEB-04]

Die wahrscheinlich wichtigste Klassifizierungsmethode ist die Einteilung in deterministische und stochastische Interpolationsschemata. Der Begriff Determinismus und Stochastik bezieht sich dabei, laut GAU [GAU-10, Seite 52], auf die zu modellierenden Prozesse. Wie schon im Kapitel 2.1 beschrieben, wird ein Prozess dann als deterministisch bezeichnet, wenn **„... sicher und hinreichend genau bestimmbare Einfluss – oder Eingangsgrößen über einen eindeutigen und nachvollziehbaren Wirkungsmechanismus zu festen Wirkungsgrößen führen“** – (SCHÖNWIESE [SCH-85] in Anlehnung an BENDAT & PIERSOL [-BEN-66] in GAU [GAU-10]). Das heißt, dass bei deterministischen Prozessen und dessen Interpolationsverfahren das gesamte Spektrum der Wirkungsgrößen bekannt ist. Im Gegensatz dazu werden stochastische Prozesse als sogenannte Zufallsprozesse bezeichnet, wobei GAU [GAU-10, Seite 53] den „erweiterten Stochastikbegriff“ einführt. Dieser Begriff soll, laut ISAAKS & SRIVASTAVA [ISA-89] (in GAU [GAU-10, Seite 53], auch darauf aufmerksam machen, dass oft Prozesse - auch deterministische - derart komplexe Strukturen auszeichnen, dass diese Komplexität für den Beobachter als Zufälligkeit erscheinen muss. Das heißt, die Trennung zwischen stochastischen und deterministischen Prozessen ist, laut GAU [GAU-10, Seite 53], auch von der Wissenschaft und ihrer Evolution abhängig.

In weiterer Folge werden nun einige deterministische Interpolationsmethoden sowie die wichtigste stochastische (auch geostatistische genannt)

Interpolationsmethode beschrieben. Deterministische Ansätze sind laut WEBSTER & OLIVER [WEB-07, Seite 37-42] beispielsweise:

- **Thiessen Polygone**
- **Triangulation**
- **Natural Neighbour Interpolation**
- **Inverse Distance Weighting (IDW)**
- **Trendoberflächen**
- **Spline Interpolation**

Die einzig nennenswerte und am häufigsten genutzte stochastische (geostatistische) Interpolationsmethode geht auf die empirischen Vorarbeiten des südafrikanischen Bergbauingenieurs David KRIGE aus dem Jahre 1951 zurück, die dann später von MATHERON [MAT-65] als Anstoß für die Arbeiten an seiner „Theorie der regionalisierten Variablen und ihrer Schätzung“ anzusehen ist.

- **Kriging**

Kriging kann als Oberbegriff für einige geostatistische Schätzverfahren gesehen werden.

4.2.1 Deterministische Interpolationsmethoden

Thiessen Polygone

In den meisten Literaturquellen werden Thiessen Polygone auch als Voronoi Polygone oder Diagramme, aber auch als die Dirichlet Zerlegung bezeichnet. Diese Methode stellt, laut WEBSTER & OLIVER [WEB-07, Seite 38], eine der frühesten und simpelsten Formen der Interpolationsmöglichkeiten dar. Das zu interpolierende Untersuchungsgebiet wird dabei von Kanten, die auf die jeweilig bezogenen Originaldatenpunktpaare normalstehen und die Distanz zwischen den Punktpaaren genau halbieren, in Polygone oder Kacheln unterteilt. Es entsteht eine in Polygone separierte Region, bei der jeder Punkt in einem Polygon dem Stützpunkt innerhalb dieses Polygons näher liegt als irgendeinem Zentralpunkt

eines anderen Polygons. Die folgende Abbildung erklärt nochmals graphisch die Funktionsweise der Thiessen Polygon Methodik.



Abbildung 15: Konstruktion von Thiessen Polygone (Quelle: HAGGET et al. [HAG-77] in http://www.gitta.info/Accessibilit/de/html/UncProxAnaly_learningObject4.html)

Die Nachteile dieses Interpolationsverfahren sind, laut WEBSTER [WEB-07, Seite 38], augenscheinlich. Jede Voraussage eines Polygons basiert einzig und allein auf einer Messung. Es gibt auch keine Schätzung über den Fehler der Interpolation und Informationen über benachbarte Punkte wird ignoriert. Wenn diese Interpolation für Karten oder ähnliche Darstellung genutzt wird, wirkt die Visualisierung grob, da die interpolierte Oberfläche stufenförmig dargestellt wird.

Triangulation

Eine andere Form der früh entwickelten Interpolationskompromisse stellt die Gruppe dar, die die Methodik der Triangulation als Ausgangspunkt hat. Datenpunkte werden bei diesem Verfahren mit Hilfe von Kanten mit den benachbarten Datenpunkten verbunden und somit Dreiecke gebildet, die keinen Datenpunkt umschließen. Nun werden die gemessenen Datenpunkte schwebend über einer Basisebene in einer Höhe proportional zu ihren Attributwerten dargestellt. Der gesamte Datensatz bildet dann ein Polyedernetzwerk aus mehr oder weniger geneigten dreieckigen Platten. Danach ist es möglich, den Wert der

Höhe eines nicht gemessenen Punktes im aufgebauten Polyedernetzwerk mittels linearer Interpolation zu bestimmen. Bei der linearen Interpolation wird ein nicht gemessener Punkt auf einer durch die geneigten Dreiecke gebildeten, linearen Funktion angenommen. Die Triangulationstechnik ist simpel und lokal. Die Nachteile sind, obwohl die Methodik bessere Ergebnisse als das Thiessen-Verfahren bringt, dass die Schätzung nur von drei Datenpunkten abhängig ist. Datenpunkte, die sich vom zu interpolierenden Punkt weiter weg befinden, haben keinen Einfluss auf die Interpolation, außerdem gibt es wiederum keine Fehlermessung. Im Unterschied zur Thiessen-Methode ist die Oberfläche zwar kontinuierlich, hat aber auch abrupte Veränderungen in der Form (WEBSTER & OLIVER [WEB-07, Seite 38-39]).

Natural Neighbour Interpolation

SIBSON [SIB-81] kombinierte die Funktionen der beiden oben besprochenen Methoden und nannte das daraus resultierende Verfahren die Natural Neighbour Interpolation. Der erste Schritt ist eine Triangulation der Daten mit der Delaunay Methode, die in weiterer Folge (Kapitel 2.6.1) erklärt wird, jedoch vom Grundprinzip gleich funktioniert, wie bei der oben besprochenen Triangulation. Die Eckpunkte dieser durch die Delaunay – Triangulation erstellten Dreiecke sind die Stützpunkte für die oben besprochenen Dirichlet-Kacheln. Um nun den Wert eines Punktes an einem nicht gemessenen Punkt zu erhalten, wird der Punkt in die Delaunay-Struktur eingefügt und die dort lokalisierten Punktnachbarn werden für die Interpolation verwendet. Diese benachbarten Punkte werden von SIBSON [SIB-81] als „Natural Neighbours“ bezeichnet. Für den zu berechnenden Punkt wird ebenfalls eine Kachel gebildet, die sich mit den ursprünglichen Dirichlet-Kacheln der Originaldatenpunkte je nach Gewichtung des jeweiligen Zentralpunktes überschneidet. Die Gewichtung der Überschneidung ist abhängig vom Wert des Punktes und alle gewichteten Überschneidungen ergeben in Summe den Wert 1. Die folgende Formel beschreibt die mathematische Vorgangsweise.

- [WEB-07, Seite 39]

Für alle $i = 1, 2, \dots, N$

$$\lambda_i = \frac{A_i}{\sum_{k=1}^N A_k}$$

λ_i ... Gewichtung für den benachbarten Punkt x_i

A_i ... Teilfläche des eingenommenen Dirichlet Polygons durch den zu schätzenden Punkt

A_k ... Gesamtfläche des erhaltenen Polygons vom zu schätzenden Punkt

Die Formel sagt aus, dass wenn ein Punkt x_i einen Natural Neighbour darstellt (beispielsweise $x_i \in T$ (T = Menge an Stützpunkten der überschrittenen Dirichlet – Kacheln)), dann hat A_i einen Wert und der Punkt bekommt eine positive Gewichtung. Wenn x_i kein Natural Neighbour ist, dann wird dem zu berechnenden Punkt keine Fläche innerhalb der Dirichlet–Kachel zugesprochen und die Gewichtung entspricht Null.

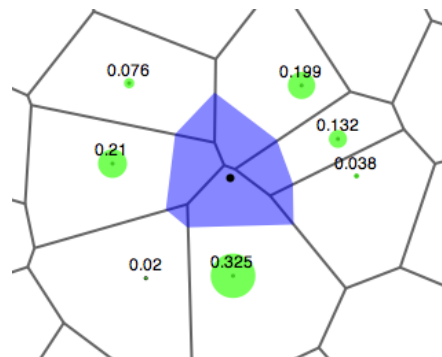


Abbildung 16: Natural Neighbour Interpolation (Quelle:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/51/Natural-neighbors-coefficients-example.png>)

Dieser Interpolator erzeugt, laut WEBSTER & OLIVER [WEB-07, Seite 39], kontinuierliche und geglättete Ergebnisse, außer an den Datenpunkten, deren abgeleiteter Wert diskontinuierlich ist. SIBSON [SIB-81] wollte abrupte Änderungen der Datenpunkte in der interpolierten Oberfläche vermeiden. Er erarbeitete deshalb die Methode, bei der die Gradienten der statistischen Oberfläche mithilfe deren Natural Neighbours berechnet werden konnten. Diese

Gradienten werden danach mit den gewichteten Messungen kombiniert, um die interpolierte Höhe des neuen Punktes innerhalb der Fläche zu erhalten. Das Ergebnis ist eine geglättete, differenzierbare Ebene. Diese Methode reproduziert die Originaldatenwerte an den vereinzelt Messpunkten und wird daher als exakte Methode bezeichnet. WEBSTER & OLIVER [WEB-07, Seite 39] sind jedoch der Meinung, dass diese Methode inakzeptable Ergebnisse in Bereichen liefert, in dem die Daten rauschen - das heißt, dass eine gewisse natürliche Variation in den Daten zu beobachten ist. An lokalen Minima und Maxima innerhalb solcher Daten werden sogenannte „Prussian Helmets“ (-Preußische Helme) generiert.

Inverse Functions of Distance

Eine durchdachtere und auch wesentlich populärere Methode als die Triangulation, stellt das auf Inverse Distanzwichtung basierende Verfahren dar. Die Vorgehensweise bei der Interpolation von Punkten ist wieder die Gewichtung der vereinzelt gemessenen, umliegenden Datenpunkte, sodass die Summe der Gewichtungen für einen zu schätzenden Punkt die Zahl 1 ergibt. Punkte, die daher näher zum Zielpunkt liegen, entsprechen höheren Gewichten als die Punkte, die vom Zielpunkte weiter entfernt liegen. Die Interpolationsmethodik ist exakt, daher werden Originaldatenpunkte mit dem gleichen Wert im Berechnungsalgorithmus reproduziert. Ein attraktives Charakteristikum ist auch, dass die relativen Gewichte der herangezogenen Punkte mit steigender Distanz stark abnehmen und so die Interpolation als lokal bezeichnen kann. Nachteil der Methodik ist, dass die Gewichtungsfunktionsparameter frei wählbar sind und keine Fehlermessung möglich ist. (WEBSTER & OLIVER [WEB-07, Seite 40])

Die folgende Formel stellt, laut RIEDL [RIE-10a], die Berechnungsmethodik dar:

$$a(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)^p * a(x_i)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)^p}$$
$$d_i = \overline{x_0 x_i}$$

$a(x_0)$... zu berechnenden Wert der Variablen a am Ort x_0

$a(x_i)$... Wert der Variablen a am Ort x_i

d_i ... Distanz von x_0 zum Ort x_i

p ... Potenzwert – beeinflusst die Gewichtung des Abstandes (je höher p ist, desto stärker wird dem Prinzip Rechnung getragen, dass das, was weiter weg liegt, unähnlicher ist, als jenes, das nahe liegt)

Laut RIEDL [RIE-10a] ist es entscheidend, welcher Potenzwert bei der Berechnung verwendet wird. Falls der Potenzwert $p = 1$ gewählt wird, entspricht der Einfluss der Variablenwerte bei der Berechnung des neuen Wertes der Gewichtung durch die inversen Distanzen. Falls für $p = 0$ angenommen wird, wird das arithmetische Mittel der Werte berechnet. Wenn für den Potenzwert eine Zahl größer 1 angenommen wird, nimmt der Einfluss der Variablenwerte bei der Berechnung nicht nur über das Gewicht der inversen Distanzen alleine ab, sondern sogar schneller. Je höher der Wert von p ist, desto geringer ist der Einfluss von weiter weg gelegenen Variablenwerten. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Wahl des Bereiches der Interpolation innerhalb dessen die Messwerte zur Berechnung verwendet werden. Um eine größere Glättung zu erreichen, werden alle Werte eines Datensatzes zur Auswertung herangezogen. Soll jedoch der Einfluss von zu weit weg liegenden Messwerten ausgeschlossen werden, sollte man nur Messwerte eines definierten Teilbereiches verwenden.

Trend Surfaces

Dieses Verfahren beruht laut AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 191] auf der Methode der kleinsten Quadrate und passt dabei eine als Polynomfunktion definierte Fläche, die sogenannte Trendfläche, den originären Datenmesspunkten an. Dabei werden die Probenwerte als die Summe der beiden Komponenten „Trend“ und dem „zufälligen Fehler“ angesehen. Die „Trend Surface“ – Analyse ist eine rein deterministische Methode und ist dabei nicht wirklich in der Lage, die komplizierte Struktur von beispielsweise geologischen Phänomenen durch die

Anpassung von einfachen Polynomen zu erfassen. In den Bereichen, wo wenig oder keine Proben vorhanden sind, entstehen lokale Minima und Maxima, die nicht wünschenswert sind. Bei einigen denkbaren Fragestellungen sind jedoch Zufallskomponenten eines Phänomens eher zweitrangig, da man nur einen gewissen „Trend“ erfassen möchte und daher ist in einigen Fällen auch die Anwendung der „Trend Surface“ – Analyse gerechtfertigt.

RIEDL [TREND OBERFLÄCHEN – letzter Zugriff: 27. Juli 2011] beschreibt die Trendoberflächen-Analyse als keinen exakten Schätzer, es werden also die original gemessenen Werte der Datenpunkte richtig abgebildet. Die Messwerte bei dieser Analyse sind im Raum positionierte Punkte. Durch diese schwebende Punktwolke wird zum einfacheren Verständnis ein Bogen Papier gelegt. Bei der Polynomfunktion 0. Ordnung wird das Blatt Papier waagrecht in den Raum gelegt, wobei die Summe des Abstandes aller Punkte ein Minimum ist. Das Papier wird bei der Polynomfunktion 1. Ordnung schräg durch die Punktwolke gelegt. Dort, wo höhere Punktwerte zu finden sind, ist die geneigte Fläche hoch. Dort, wo eher niedrige Werte zu finden sind, ist die Fläche niedrig. Bei der Polynomfunktion 2. Ordnung wird das Papier gebogen, damit die Fläche eine noch bessere Anpassung an die Punktwolke erreicht. Je mehr die Fläche, also der Bogen Papier, angepasst wird, desto komplizierter wird die daraus resultierende Funktion.

Folgende Formel zeigt die Polynomfunktionen 1. und 2. Ordnung laut WEBSTER & OLIVER [WEB-07, Seite 40]:

Polynomfunktion 1. Ordnung:

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

Polynomfunktion 2. Ordnung:

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2$$

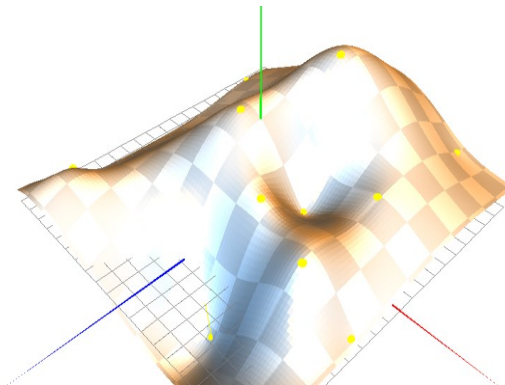
z ... der vorhergesagte Wert an einem Punkt (x_1, x_2) , b ... Konstante

Splines

Die laut BARTELME [BAR-05, Seite 155-159] bekannteste Methodik der Kurveninterpolation stellt der Spline – Ansatz dar. ***Es ist ein stückweises, also in k Teilintervalle gesondertes definiertes Polynom $p(x)$ höchstens m -ten Grades, für welches man an den Nahtstellen Stetigkeiten (Glättungsbedingungen) vorschreibt.*** Eine Unterscheidung erfolgt je nach m , also dem Grad des Polynoms, zwischen linearen Splines ($m=1$), quadratischen Splines ($m=2$) und kubischen Splines ($m=3$).

Die Polynome beschreiben laut WEBSTER & OLIVER [WEB-07, Seite 42] dabei Teilstücke einer Kurve oder einer Oberfläche und werden geglättet zusammengefügt. Die Orte, an denen diese Teilstücke miteinander verschmelzen, werden Knoten genannt und können eigenmächtig positioniert werden. Die Splines können dadurch gezwungen werden, auf welche Weise sie das Gebiet beschreiben. Typischerweise werden Polynome 3. Ordnung für die Interpolation verwendet. Sie werden, wie zuvor bereits erläutert, kubische Splines genannt.

In der folgenden Abbildung wird eine Spline – Interpolation von insgesamt 15 Punkten gezeigt.



**Abbildung 17: Spline - Interpolation (Quelle:
<http://werner.yellowcouch.org/Papers/antenna/index.html>)**

4.2.2 Stochastische Interpolationsmethoden – Geostatistik

Das nun folgende Kapitel behandelt die Geostatistik. Da diese Wissenschaft derart komplex und tiefgreifend ist und schon eine Vielzahl eigener Bücher gefüllt hat, sollen die folgenden Seiten nur einen kurzen Abriss über das Thema Geostatistik und insbesondere der Variographie und der Kriging – Methodik geben. Dieses Kapitel soll daher keine Anforderung auf Vollständigkeit haben, jedoch die Basis zur Modellierung im dreidimensionalen geologischen Raum geben.

SCHAFMEISTER [SCH-99, Seite 1-3] versteht unter dem Begriff „Geostatistik“ eine geowissenschaftliche Spezialdisziplin, die durch MATHÉRON [MAT-65] als „Théorie des Variables Régionalisées et leurs Estimation („Theorie der regionalisierten Variablen und ihrer Schätzung“) erstmals erwähnt wurde. Es handelt sich dabei um ein Spezialfach der Interpolationsmethoden, das sich mit der räumlichen Variabilität von ortsabhängigen Variablen und deren mathematischen Beschreibung auseinandersetzt. Anschließend wird ein räumliches Modell der ortsabhängigen Variablen erstellt.

Laut HOULDING [HOU-00, Seite 3] hat man es in der Geostatistik im geologischen Untergrund mit unbekannten Kenngrößen wie Konzentrationen von Kontaminationen, verschiedenen Mineralstoffgehalten oder auch ingenieurtechnischen Beschaffenheiten zu tun, bei denen die darauf bezogenen Werte eine bestimmte Raumabhängigkeit besitzen, jedoch in einem mathematischen Sinn räumlich unbestimmt sind. Wie überall in der Statistik sind die räumlichen Variationen von bestimmten Variablen beeinflusst durch verschiedene komplexe – gegenseitig interagierende – Prozesse. Diese Prozesse können beispielsweise Grundwasserströmungsmodelle, Erosion, Verwitterung, Tektonik, Geothermik und metamorphische Prozesse sein. Es ist nicht möglich, jede einzelne Kenngröße an jeder erdenklichen Position in einem bestimmten Untersuchungsgebiet zu messen. Daher ist man auf analytische Werkzeuge angewiesen, die die räumlichen Diskrepanzen im Wissenstand über ein bestimmtes Gebiet füllen. Es ist auch Tatsache, dass im Bereich der Geostatistik

des geologischen Untergrundes die Modellierung des solchen nicht nur im zweidimensionalen Anwendungsbereich liegt, sondern im sehr viel komplexeren dreidimensionalen Raum gerechnet werden muss.

Theorie der regionalisierten Variablen

Laut MEIER und KELLER [MEI-90] bilden bestimmt ablaufende Prozesse und Ereignisse zeitlich gerichtete und/oder räumlich geordnete Abfolgen und Strukturen mit der Tendenz zur Erhaltungsneigung oder Persistenz (in GAU [GAU-10, Seite 20-21]). Dieses Wissen über die Erhaltungsneigung kann für die Modellierung von Nutzen sein, geht jedoch einher mit der Restriktion, dass klassische Statistikmethoden nicht angewendet werden dürfen, da im Vorfeld der Prognose erst die Eigenschaften der strukturspezifischen Erhaltungsneigung berechnet werden müssen. Diese Berechnung kann mithilfe der Variographie innerhalb der geostatistischen Methoden erfolgen, deren Funktionsweise auf den nächsten Seiten auch beschrieben wird. Das Hauptproblem des Arbeitens mit Daten, die durch natürliche Prozesse erzeugt wurden, ist also die graduelle Abhängigkeit der einzelnen Messdaten, die je nach der Distanz der Messpunkte zueinander ähnlicher oder unähnlicher sind.

Diese graduellen Abhängigkeiten können mithilfe der „Theorie der regionalisierten Variablen“ von MATHERON [MAT-65], die sich auf die Arbeiten von KRIGE [KRI-51 und KRI-66] bezieht, der auch in weiterer Folge Namensgeber für das Kriging ist, quantifiziert werden. Die Theorie der regionalisierten Variablen folgt der intuitiven Feststellung, dass bei zwei Messwerten dichter zusammenliegende Standorte tendenziell höhere Ähnlichkeiten bei den Messergebnissen zu erwarten sind als bei Messpaaren mit größerer Distanz zueinander. Diese Einschätzung wird in mathematische Formeln umgesetzt und eben als Theorie der regionalisierten Variablen bezeichnet. Bereits bei TOBLER [TOB-70] fand diese Erkenntnis Einzug in das erste Gesetz der Geographie: „**Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things**“ (in GAU [GAU-10, Seite 20-21]).

Ablauf einer geostatistischen Schätzung

Der Ablauf einer geostatistischen Schätzung läuft immer nach demselben Schema ab. Beginnend mit der Planung der Erkundungskampagne endet es mit der Visualisierung der Schätzergebnisse. Ein erheblicher Anteil dieses Ablaufs wird der Geostatistik zugesprochen. Die in Abbildung 14 gezeigten Teilschritte beschäftigen sich mit der Datenerhebung, der Datenaufbereitung sowie mit der geostatistischen Schätzung und der anschließenden Visualisierung der Ergebnisse. Die Planung und Durchführung, sowie die Datenerhebung an den zuvor festgelegten Lokationen wird von der Aufteilung der gesammelten Informationen in verschiedene Datenkollektive gefolgt. Im Falle einer anschließenden geologischen Modellierung beinhaltet dies die Festlegung von Schichtgrenzen innerhalb der Bohrungen. Nach dieser Einteilung erfolgt die separate Modellierung jedes Datenkollektivs. Wie bereits angedeutet, erfolgt nun im Ablauf der geostatistischen Schätzung der als Kernstück der Geostatistik anzusehende Bereich. Die Erzeugung eines experimentellen Variogramms, die Anpassung des theoretischen Variogramms und die nachfolgende Schätzung. Die beiden ersten Teilschritte lassen sich mit dem Oberbegriff der Variographie zusammenfassen, die der rechnerischen Ermittlung der in der Natur vorhandenen Autokorrelationsstruktur, also der gegenseitigen Abhängigkeit einzelner Messwerte (Zufallsfunktion), dient. [GAU-10, Seite 27]

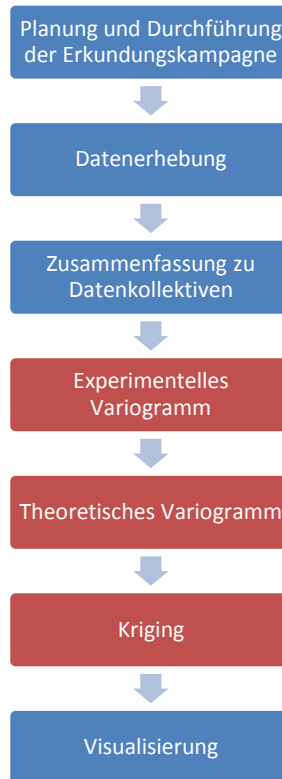


Abbildung 18: Ablauf einer geostatistischen Schätzung (Quelle: GAU [GAU-10, Seite 27] - eigene Darstellung)

Die in der Variographie ermittelte Autokorrelation dient als Grundlage für die anschließende geostatistische Schätzung. Diese Schätzung wird als Kriging bezeichnet, deren Namensgebung bereits in den vorangegangenen Seiten besprochen wurde. Kriging wird als Überbegriff für eine Vielzahl an verschiedenen Methoden verwendet. Hinsichtlich der Nutzung der Autokorrelationsstruktur kann zwischen dem einfachen Kriging (Simple Kriging), dem universellen Kriging (Universal Kriging) und dem gewöhnlichen Kriging (Ordinary Kriging) unterschieden werden, wobei die letzte Kriging-Methode die häufigste Anwendung findet und in weiterer Folge für die Erklärung der Kriging-Arbeitsweise genügen sollte. Nachdem für alle Punkte im SchätZRaster die Schätzung erfolgt ist, liefert eine Visualisierung eine graphische Repräsentation der Ergebnisse. [GAU-10, Seite 28]

Variographie – Variogramm

Abhängigkeiten von Probewerten einer Variablen im Raum können mithilfe eines Variogramms beschrieben werden. Es ist das wichtigste Instrument in der Geostatistik, um eine regionalisierte oder ortsabhängige Variable zu beschreiben. Ortsabhängige Variablen können - grob gesagt - als Realisierung einer bestimmten Zufallsfunktion angesehen werden. Der Wert einer ortsabhängigen Variablen an einem Punkt kann also als eine Realisierung dieser bestimmten Zufallsvariable interpretiert werden, die an diesem Punkt definiert ist. Dementsprechend kann also auch die ortsabhängige Variable, die aus einem Satz von Werten besteht als eine Realisierung des Satzes von Zufallsvariablen interpretiert werden. Dieser Satz an Zufallsvariablen kann als eine Zufallsfunktion angesehen werden. [AKI-88, Seite 27]

Wird laut AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 27] ein Satz von n Punkten in einem abgegrenzten Raum analysiert, erhält man einen Vektor von n Zufallsvariablen mit n Komponenten und eine dazugehörige Verteilungsfunktion. Analysiert man nun einen anderen Satz an n Punkten im gleichen Raum, ist das Ergebnis ein zweiter Vektor und eine weitere Zufallsfunktion. Wird weiter berechnet, ist es möglich zu sagen, dass der Satz aller Verteilungsfunktionen für alle n und für jede Wahl der n Punkte das „spezielle Gesetz der Zufallsfunktion“ beschreibt. In der Anwendung geostatistischer Methoden werden aber nur die beiden ersten Momente, die in Anlehnung an die Mechanik so bezeichnet werden (in AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 8], als Zufallsfunktion benutzt.

- Die Erwartungswertfunktion E oder das erste Moment der Zufallsfunktion $Z(x)$ ist abhängig vom Messort x .

$$E[Z(x)] = m(x)$$

m ... Mittelwert

Die drei verschiedenen zweiten Momente sind folgendermaßen zu definieren:

- Die Varianzfunktion (zweites Moment um die Erwartung) ist ebenfalls vom Messort x abhängig.

$$Var[Z(x)] = E[(Z(x) - m(x))^2]$$

- Die Kovarianzfunktion zwischen zwei Zufallsvariablen $Z(x_1)$ und $Z(x_2)$ einer Zufallsfunktion, die eine Varianz haben, ist eine Funktion der beiden Punktsätze x_1 und x_2 und wird als Kovariogramm bezeichnet.

$$Cov[x_1, x_2] = E[(z(x_1) - m(x_1)) * (Z(x_2) - m(x_2))]$$

- Ein Variogramm wird als Varianz des Inkrements, also des Zuwachs, von zwei Zufallsvariablen einer Zufallsfunktion definiert.

$$2\gamma(x_1, x_2) = Var[Z(x_1) - Z(x_2)]$$

(aus AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 27-28])

Aus der Definition für das Variogramm geht hervor, dass es gleichzeitig von den Punktsätzen x_1 und x_2 abhängig ist. Dies hat die Bedeutung, dass jedes Paar an Daten mit den gleichen Abstandsvektor h , der in weiterer Folge auf den nächsten Seiten beschrieben wird und den Abstand zwischen 2 Messorten bezeichnet, als eine Realisierung des Paares von Zufallsvariablen $Z(x_1)$, $Z(x_2)$ angesehen werden darf. Zusammenfassend ist also zu sagen, dass nicht die exakten Positionen der Messwerte der Beprobungen von x_1 und x_2 wichtig sind, sondern lediglich deren Abstandsvektor h , der in weiterer Folge weiter unten näher beschrieben wird. Da es sich also beim Variogramm um eine in der Praxis zu realisierende Zufallsfunktion handelt, muss man anfänglich zu drei brauchbaren Hypothesen greifen, bei der eine erfüllt werden muss, um die Realisierung weitreichender statistischer Schlussfolgerungen gewährleisten zu können. [AKI-88, Seite 28]

Im Folgenden sollen nun, die für die Geostatistik relevanten Hypothesen der Stationarität erklärt werden.

Stationarität

Strenge Stationarität: Unabhängig von der fachspezifischen Wertung des Begriffs ist die Stationarität als Invarianz, also als Unveränderlichkeit, einer Eigenschaft im zu betrachteten Raum-Zeit-Ausschnitt zu begreifen. Bei

der geologischen Modellierung hat man es lediglich mit einem statischen Phänomen zu tun und daher ist die Stationarität als Konstanz dieser Eigenschaften im Raum aufzufassen. Die Existenz von Stationarität ist unabdingbar für die geostatistische Schätzung. In Bezug auf regionalisierte Variablen bedeutet dies also eine Ortsunabhängigkeit des Verteilungsgesetzes oder anders gesagt, dass an allen Punkten des Raumes das gleiche, aber unbekannte Verteilungsgesetz während des genetischen Prozesses vorgelegen hat, aus dem dann an jedem Punkt ein Wert realisiert wurde. [GAU-10, Seite 22]

Stationarität 2.Ordnung: In den meisten Fällen sind jedoch lediglich die ersten beiden Momente, d.h. Mittelwert und Varianz, anstelle eines vollständigen Verteilungsgesetzes zur Beschreibung gebräuchlich. Es ist jedoch keine Vereinfachung in herkömmlichen Sinne, sondern eine aus der Erkenntnis erwachsene Einsicht (Laut MARINONI [MAR-00], POST [POS-01]), dass eine Beschreibung einer Verteilung meist anhand ihrer ersten beiden Momente für praktisch alle Fälle ausreicht. [GAU-10, Seite 22]

Laut AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 28-29] weist eine Zufallsfunktion eine Stationarität 2. Ordnung (schwache Stationarität) auf, wenn der Erwartungswert E unabhängig vom Ort x ist:

$$E[Z(x)] = m$$

m ... Mittelwert

Ebenso soll laut AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 29] für jedes Paar von Zufallsvariablen $(Z(x), Z(x+h))$ die

Kovarianz K in Abhängigkeit von Abstandsvektor h zwischen den Proben existieren:

$$K(h) = E[Z(x+h) * Z(x)] - m^2$$

Intrinsische Hypothese: Eine noch weiter abgeschwächte Form der Stationarität stellt die intrinsische Hypothese dar. Dieser Hypothese genügt es, wenn bei der Zufallsfunktion der Erwartungswert der Differenzen zwischen $Z(x+h)$ und $Z(x)$ gleich null ist und dass diese beiden Punkte für alle h eine endliche Varianz aufweisen [GAU-10, Seite 23]:
Dann gilt

$$E\{Z(x+h) - Z(x)\} = m(h) = 0$$

Für die Varianz der Werte $Z(x+h)$ und $Z(x)$

$$Var(Z(x+h) - Z(x)) = E\{Z(x+h) - Z(x)\}^2 = 2\gamma(h)$$

und schließlich

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} * Var\{Z(x+h) - Z(x)\}$$

Damit ist $\gamma(h)$ nur noch eine Funktion des Abstandes der beiden Punkte.

Wird unter den Bedingungen der intrinsischen Hypothese gearbeitet, ist es laut AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 29] lediglich notwendig, das Semivariogramm (gleichbedeutend dem Variogramm mit nur einer kleinen Abänderung der Formel) zu kennen. Sind die Bedingungen der Hypothesen nicht erfüllt, so muss man zu anderen, fortgeschrittenen Methoden der Geostatistik greifen, die jedoch in weiterer Folge nicht besprochen werden.

Das Variogramm ist laut RIEDL [RIE-10c] eine in der Regel monoton wachsende Funktion, wobei mit steigendem Abstand der beiden Punkte die Varianz der Differenz zunimmt.

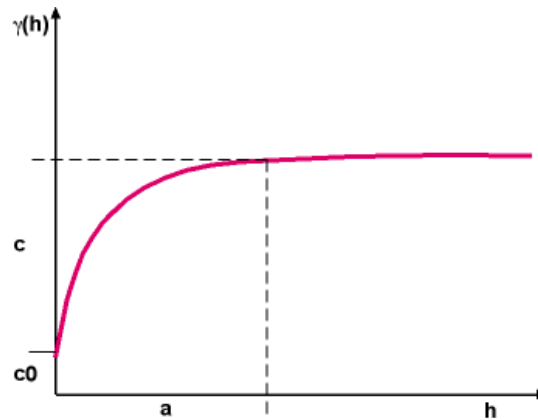


Abbildung 19: Teile eines Variogramms (Quelle:

http://homepage.univie.ac.at/doris.riedl/modelle/modelle2010/tut_geostat/images/variogram_teile.gif)

c...Varianz der Differenz der Punktpaare

c0...Nugget – Varianz = die zufällige Streuung ohne konkrete Abhängigkeit

c+c0...C = Sill = Schwellenwert = zu erreichende maximal erklärbare (voneinander abhängige) Varianz

a...range = Reichweite = Entfernung bei der maximale Varianz erreicht wird

h...Entfernung zwischen einem Punktpaar (lag)

$\gamma(h)$...Varianz bei der Entfernung h

Experimentelles Variogramm

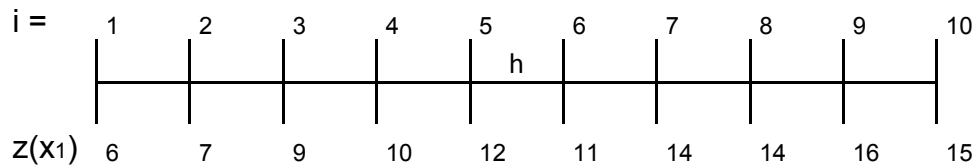
Das experimentelle Variogramm ist das gebräuchlichste und grundlegende Mittel der Geostatistik, um die ortsabhängige Struktur von Merkmalen zu charakterisieren. Das experimentelle Variogramm lässt sich auf sehr einfache Weise aus den Daten der Messungen gewinnen. [AKI-88, Seite 30]

Um dieses experimentelle Variogramm zu erzeugen, müssen die Varianzen von Punktpaaren, die innerhalb einer bestimmten Entfernung vorliegen, bestimmt werden. [GAU-10, Seite 28]

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} (z(x) - z(x+h))^2}{n(h)}$$

Es werden nach Festlegung einer Schrittweite h zwischen den Messlokalationen alle Wertedifferenzen von Punktpaaren, die durch h getrennt sind, quadriert und danach durch die Hälfte der Anzahl der Wertepaare mit dementsprechenden Distanzen dividiert. In der gleichen Vorgangsweise verfährt man auch mit den Wertepaaren, deren Abstand einem ganzzahligen Vielfachen von h entsprechen. Stimmen die Abstände zwischen den beprobten Orten nicht mit einem gleichmäßigen Raster überein, so muss durch Festlegung von Toleranzkriterien die Bildung von Wertepaaren ermöglicht werden. Dies ist in den meisten Fällen notwendig, da es häufig nicht möglich ist, in konstanten Abständen Bohrproben oder Ähnliches zu machen. Nun ist es notwendig, die berechneten, entfernungsbezogenen Varianzen gegen die jeweilige Schrittweite abzutragen. Die daraus resultierende Darstellung liefert das experimentelle Variogramm, das im Bereich kleinerer Distanzen h typischerweise sehr geringe Unähnlichkeiten liefert. Im Gegensatz dazu wird ein größerer Anstieg der Unähnlichkeiten bei größeren Schrittweiten bis hin zu einem sich einpendelnden konstanten Wert bei sehr großen Schrittweiten beobachtet. [GAU-10, Seite 28]

In der folgenden Abbildung wird die Berechnung der Werte des experimentellen Variogramms vereinfacht dargestellt. Es wurde eine Messreihe entlang einer Linie mit gleichen Abständen zwischen den Bohrungen gewählt. Auf der oberen Skala sind die Bezeichnungen der Messstellen festzustellen, auf der unteren Skala die dort gemessenen Probenwerte. (Die Angaben zur folgenden Abbildung stammen aus AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 30-31] und wurden selbst bearbeitet.)



$$h = 1d : \gamma(h) = \frac{1}{2} * [(6-7)^2 + (7-9)^2 + (9-10)^2 + (10-12)^2 + (12-11)^2 + (11-14)^2 + (14-14)^2 + (14-16)^2 + (16-15)^2] / 9 = 1,4$$

$$h = 2d : \gamma(h) = \frac{1}{2} * [(6-9)^2 + (7-10)^2 + (9-12)^2 + (10-11)^2 + (12-14)^2 + (11-14)^2 + (14-16)^2 + (14-15)^2] / 8 = 2,9$$

$$h = 3d : \gamma(h) = \frac{1}{2} * [(6-10)^2 + (7-12)^2 + (9-11)^2 + (10-14)^2 + (12-14)^2 + (11-16)^2 + (14-15)^2] / 7 = 6,5$$

$$h = 4d : \gamma(h) = \frac{1}{2} * [(6-12)^2 + (7-11)^2 + (9-14)^2 + (10-14)^2 + (12-16)^2 + (11-15)^2] / 6 = 10,4$$

$$h = 5d : \gamma(h) = \frac{1}{2} * [(6-11)^2 + (7-14)^2 + (9-14)^2 + (10-16)^2 + (12-15)^2] / 5 = 14,4$$

u.s.f.

$$h = 0 : \gamma(0) = 0.$$

Da die Differenzen zwischen gleichen Proben Werten Null sind, ist auch $\gamma(0) = 0$.

Nun werden die Variogrammwerte auf eine Skala aufgetragen.

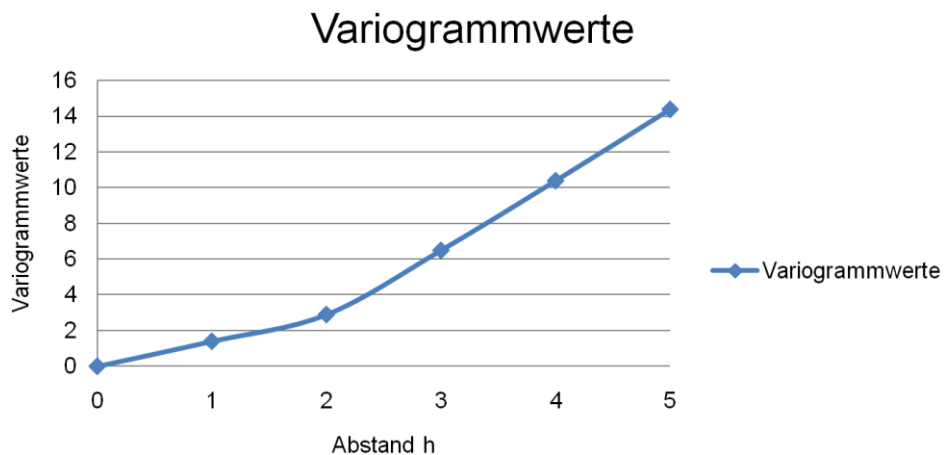


Abbildung 20: Theoretisches Variogramm (eigene Quelle)

Das Variogramm ist natürlich aufgrund der geringen Probenanzahl nicht sonderlich repräsentativ, da es sich auch nur auf eine Messreihe bezieht, jedoch soll auch nur die Vorgehensweise bei der Erstellung eines Variogramms erläutert werden.

Es ist ebenfalls möglich, anhand von Berechnungen anisotrope Variogramme zu erzeugen. Diese Möglichkeit ist besonders wichtig im Hinblick auf die Berücksichtigung gerichteter, geologischer Prozesse. Hierzu werden die Reichweiten der Variogramme für verschiedene Suchrichtungen der Abstandsvektoren ermittelt und durch eine Ellipse angepasst. [GAU-10, Seite 29]

AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 55-56] unterscheidet hinlänglich der Anisotropie zwischen:

- **Geometrische Anisotropie:** Wenn Variogramme verschiedener Richtungen den gleichen Grenzwert haben, jedoch verschiedene Abstände (=Reichweiten, Schrittweiten) aufweisen.
- **Zonale Anisotropie:** Wenn Variogramme verschiedener Richtungen unterschiedliche Grenzwerte und auch unterschiedliche Abstände aufweisen.
- **Isotropie:** Wenn Variogramme in den verschiedenen Richtungen gleich sind.

Theoretisches Variogramm

Um die räumliche Struktur zu ermitteln und für die Schätzung an einem Punkt, ist es notwendig, auch Kenntnis über jene Variogrammwerte zu haben, die in Entfernungen liegen, die nicht den Entfernungen der bereits vorhandenen und gemessenen Messpunkte entsprechen. Der Übergang von der Erfassung sprunghafter Distanzen zu einer Betrachtung kontinuierlicher Abhängigkeiten ist es notwendig, eine theoretische Variogrammfunktion an das berechnete experimentelle Variogramm anzunähern. [GAU-10, Seite 30]

In der Praxis haben sich laut AKIN & SIEMES [AKI-43, Seite 43-46] zur Anpassung an das experimentelle Variogramm einige Modelle bewährt. Es wird dabei zwischen Modellen unterschieden, die ohne Schwellenwert arbeiten und Modellen, die mit Schwellenwert arbeiten.

Bei GAU [GAU-10, Seite 30] werden diese als intransitive und transitive Modelle bezeichnet. Intransitive Modelle besitzen keinen Schwellenwert und haben mit

zunehmender Schrittweite monoton ansteigende Varianzen zu verzeichnen. Es wird dabei zwischen folgenden intransitiven Modellen unterschieden:

- **Potenzmodell:** Stellt das wichtigste intransitive Modell dar.

$$\gamma(h) = w * |h|^{\alpha}$$

w ...Konstante, die den Anstieg (Neigung) der Kurve bestimmt ($w > 0$)

α ...Potenzwert ($0 < \alpha < 2$)

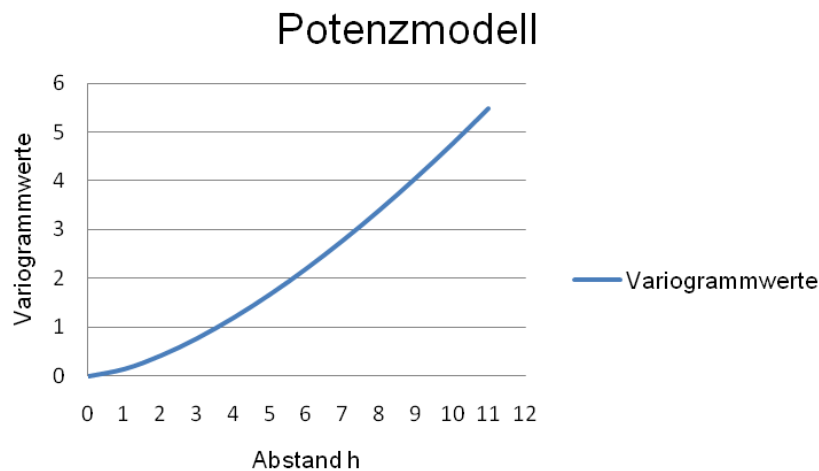


Abbildung 21: Experimentelles Variogramm - Potenzmodell (eigene Quelle)

Bei diesem Modell wurde für die Konstante w der Wert 0,15 angenommen. Der Potenzwert beträgt 1,5.

- **Lineares Modell:** Nimmt man für den Potenzwert α den Wert 1 an, berechnet sich logischerweise das lineare Modell.

$$\gamma(h) = w * |h|$$

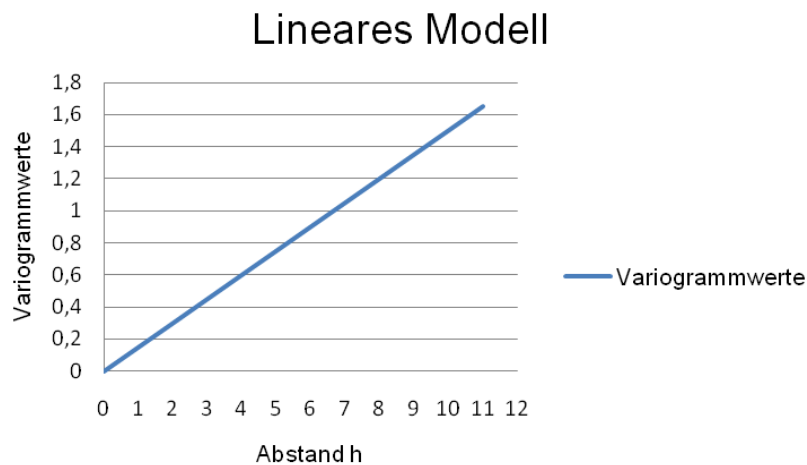


Abbildung 22: Experimentelles Variogramm - Lineares Modell (eigene Quelle)

Bei diesem Modell beträgt der Wert der Konstanten W wiederum 0,15. Der Potenzwert beträgt 1.

- **Logarithmisches Modell:** Das logarithmische Modell ist die dritte Möglichkeit der intransitiven Modelle.

$$\gamma(h) = 3\alpha * \log|h|$$

α ...absolute Dispersionskonstante (3α definiert die Neigung)

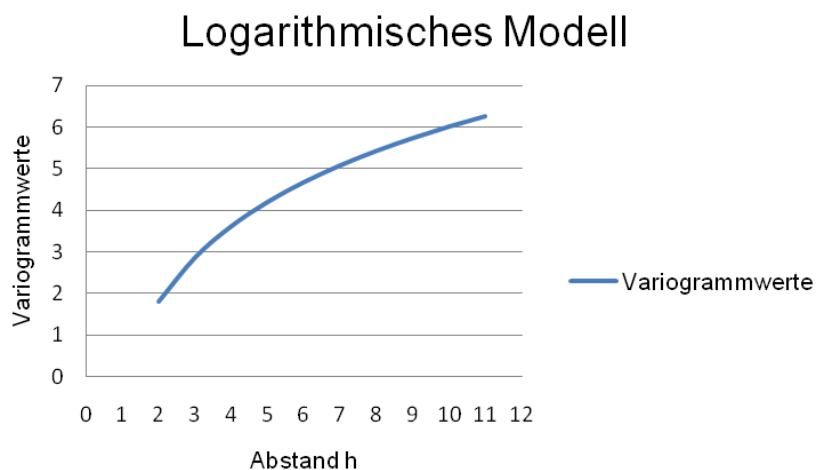


Abbildung 23: Experimentelles Variogramm - Logarithmisches Modell (eigene Quelle)

Auch hier wird für W der Wert 0,15 angenommen.

Die Gruppe der transitiven Modelle umfasst laut GAU [GAU-10, Seite 31] eine wesentlich höhere Anzahl an theoretischen Ansätzen, die sich auch deutlich durch den Aufbau der Funktionen voneinander unterscheiden. Die verschiedenen theoretischen Variogrammodelle unterscheiden sich hinsichtlich ihres Verhalten am Ursprung, um die Reichweite a , durch den Schwellenwert C sowie bei sehr großen Abständen h . Zu den gebräuchlichsten Ansätzen zählen:

- **Sphärische Modell:** Das Modell steigt laut AKIN & SIEMES [AKI-88, Seite 44-46] nahe dem Ursprung linear an und geht dann allmählich in den horizontalen Schwellenwert über. Für die Anpassung des experimentellen Variogramms ist es wichtig zu wissen, dass die Verlängerung des linearen Anstiegs sich mit dem Schwellenwert in $2/3$ der Reichweite (range a) schneidet. Das sphärische Modell ist bei den transitiven Modellen am häufigsten anzutreffen und am flexibelsten zu verwenden.

$$\gamma(h) = C * \left(\frac{3}{2} * \frac{|h|}{a} - \frac{|h|^3}{2 * a^3} \right) \quad \text{für } h \leq 0$$

$$\gamma(h) = C \quad \text{für } h \geq 0$$

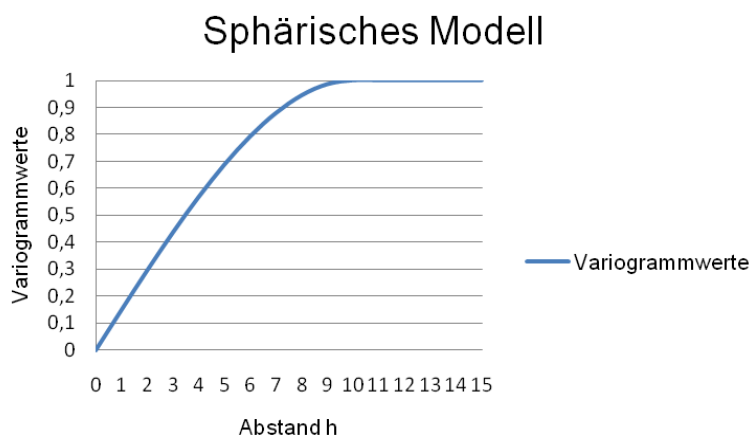


Abbildung 24: Experimentelles Variogramm - Sphärisches Modell (eigene Quelle)

In diesem Fall wird als Schwellenwert C der Wert 1 angenommen. Die Reichweite a (Range) beträgt bei diesem theoretischen Variogrammodell 10.

- **Exponentielles Modell:** Dieses Modell hat einen wesentlich flacheren Verlauf als das sphärische Modell und erreicht den Schwellenwert nur asymptotisch. Das bedeutet, dass sich die Funktion an den Schwellenwert anschmiegt, jedoch nie berührt oder schneidet. [AKI-88, Seite 46]

$$\gamma(h) = C(1 - \exp[-|h|/a])$$

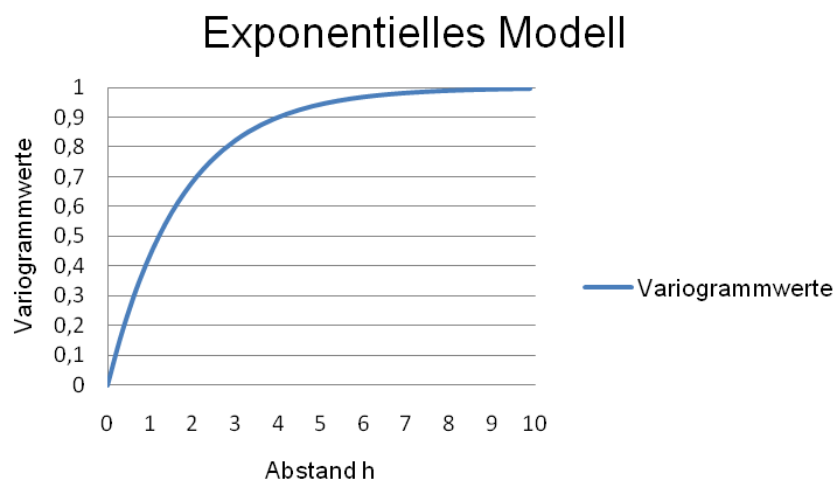


Abbildung 25: Experimentelles Variogramm - Exponentielles Modell (eigene Quelle)

Der Schwellenwert beträgt in diesem Beispiel 1 und die Reichweite entspricht 1,73.

- **Gauß'sche Modell:** Das theoretische Variogramm nach dem Gauß'schen Modell verläuft nahe dem Ursprung parabolisch und nähert sich dem Schwellenwert schneller als im Falle des exponentiellen Modells.

$$\gamma(h) = C(1 - \exp[-h^2 / a^2])$$

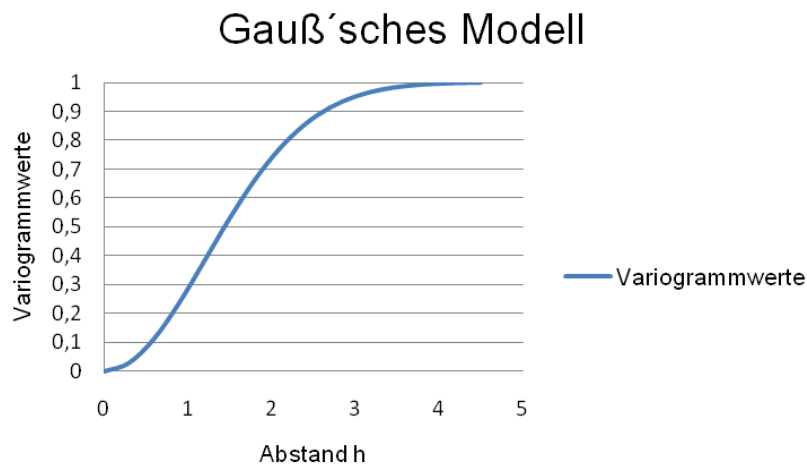


Abbildung 26: Experimentelles Variogramm - Gauß'sches Modell (eigene Quelle)

Laut SCHAFMEISTER [SCH-99, Seite 16] muss häufig im Ursprung eines Variogramms der Nugget-Effekt mit in die Funktion einbezogen werden. Es ist dann notwendig, wenn das experimentelle Variogramm im Ursprung nicht den Wert 0 annimmt. In solchen Fällen kann von einer „Punkt“ – Variabilität gesprochen werden, die einerseits durch Mess– oder Analysefehler hervorgerufen wurde oder ein Beleg für eine bereits hohe Variabilität auf engstem Raum sein kann. Dies muss dann bei der Anpassung des theoretischen Variogramms an das experimentelle Variogramm berücksichtigt werden.

Kriging

Ist es lediglich notwendig, durch den Einsatz von geostatistischen Verfahren eine Strukturanalyse durchzuführen, bei der man die räumliche Kontinuität (Variogrammmodell) und ihre Reichweite sowie die großräumige (Schwellenwert) und kleinräumige Variabilität (Nugget-Wert) ermittelt, sollte die Anwendung der Variographie genügen. (laut PRISSANG, SPYRIDONOS & FRENTROP [PRI-99] in GAU [GAU-10, Seite 33])

Interessanter ist es jedoch, die aus dem experimentellen und theoretischen Variogrammen gewonnen Informationen zu nutzen und weiterzuverwenden. Dies ist im Zuge eines geostatistischen Schätzprozesses, dem Kriging, möglich. Die Vorhersage von Schätzwerten kann entlang von Profilen, auf Flächen oder im

Raum erfolgen. Es kann sich dabei im „Subsurface“ – Bereich um geologisch-geometrische Größen handeln, wie beispielsweise die Teufenlage von Schichtgrenzen oder um die Schichtmächtigkeit von geologischen Körpern. Das Kriging als Sammelbegriff umfasst verschiedene Methoden zur Bestimmung gewichteter Mittelwerte, wobei sich die Gewichte aus den gegenseitigen Entfernungen der Punkte ergeben. Hinsichtlich vieler Eigenschaften unterscheidet sich also das Kriging von anderen Interpolationsverfahren. [GAU-10 Seite 33-34]

SCHAFMEISTER [SCH-99, Seite 33] fasst die Vorteile aller Krigingverfahren gegenüber anderen Interpolationsverfahren folgendermaßen zusammen:

- Kriging liefert den „besten“ Schätzwert (BLUE = Best Linear Unbiased Estimator, bester linearer erwartungstreuer Schätzer)
- Kriging bezieht die Kenntnis der räumlichen Struktur der Variablen, das Variogramm, in den Schätzprozess mit ein.
- Die individuelle räumliche Anordnung des Messstellennetzes im Bezug auf das Interpolationsgitter wird berücksichtigt.
- Die Zuverlässigkeit eines Schätzergebnisses wird für jeden geschätzten Punkt in Form des Krigingfehlers angegeben.

Ordinary Kriging:

In der überwiegenden Anzahl der Fälle erfolgt die Interpolation im Zuge des gewöhnlichen Krigings (OK = Ordinary Kriging). Die folgenden Seiten sollen die theoretische Vorgangsweise des Ordinary Krigingschätzverfahrens laut GAU [GAU-10, Seiten 33-37] zeigen. Bei diesem Kriging-Verfahren wird jeder einzelner punktueller Schätzwert als lineare Kombination der Werte der regionalisierten, ortsabhängigen Variablen an n Punkten aufgefasst, an denen die Werte $z(x_i)$ bereits bekannt sind. Diese Werte werden durch Einführungen von n verschiedenen λ_i gewichtet. Daher gilt für den Schätzwert

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

Unter der Annahme der Stationaritätsbedingungen.

$$E\{z(x)\} = m$$

Nach der Erwartungswert E an jedem Punkt x dem Mittelwert m der regionalisierten Variablen $z(x)$ entspricht, kann dies auch auf den Schätzwert ausgedehnt werden. Daher gilt:

$$E\{z(x)\} = \sum_{i=1}^n \lambda_i E[z(x_i)] = m$$

Für den Schätzfehler ε , also für die Differenz zwischen dem wahren Wert an einer beliebigen Verortung und dem dort zu schätzenden Wert, gilt:

$$\varepsilon(x_o) = z(x_o) - z^*(x_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) - z(x_o)$$

Der Schätzfehler wird selbst als ortsabhängige Variable, deren Wert nicht genau bekannt ist, angesehen. Für das Kriging wird jedoch gefordert, dass der Erwartungswert dieses Schätzfehlers zur Gewährleistung der Unverzerrtheit dem Wert 0 entspricht.

$$E\{\varepsilon(x_o)\} = 0$$

Mit dieser Forderung sollen systematische Über- und Unterschätzungen ausgeschlossen werden. Daher ergibt sich für die Gewichte λ_i der Punkte, dass deren Summe den Wert 1 ist.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Da diese Annahmen noch immer unendlich viele Lösungen λ_i zulassen, wird diejenige Lösung als bester Schätzer angesehen, deren Varianzen (Streubreite der Schätzfehler) minimal sind.

$$Var\{\varepsilon(x_o)\} = Var\left\{\sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) - z(x_o)\right\}$$

Die Minimierung wird durch Bildung der partiellen Ableitungen nach den einzelnen λ_i und deren Gleichsetzung zu Null erreicht. Dies führt zu einem Kriginggleichungssystem (KGS) mit n Unbekannten. Um dennoch eine Lösung zu ermöglichen, erfolgt die Einführung des LAGRANGE-Parameters μ , der ebenfalls zu berechnen ist. Die einzelnen Schritte dieses Lösungsvorgangs sind in SCHAFMEISTER [SCH-99, Seite 34-36] oder laut GAU [GAU-10, Seite 35] bei JOURNAL & HUIJBREGTS [JOU-78] oder ISAAKS & SRIVASTAVA [ISA-89] ersichtlich. In der Matrixschreibweise wird dieses Gleichungssystem folgendermaßen dargestellt:

$$A\lambda = b$$

Dabei enthält die Matrix A die einzelnen Werte $\gamma(x_i, x_j)$, welche den berechneten Varianzen der Punktpaaren aus dem theoretischen Variogramm entsprechen.

$$A = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \cdots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n, x_1) & \cdots & \gamma(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Der Spaltenvektor b enthält die abgeschätzten Varianzen von Schätzwerten und bekannten Werten, der Spaltenvektor λ die gesuchten Werte λ_i sowie μ

$$b = \begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_0) \\ \dots \\ \gamma(x_n, x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \text{ und } \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix}$$

Nun erhält man die Gewichte λ_1 durch Umformen der oben gezeigten Gleichung, indem die Inversen von A gebildet werden und sich danach folgende Gleichung löst:

$$\lambda = A^{-1}b$$

Die lokale Schätzvarianz σ_k^2 kann ebenfalls bestimmt werden.

$$\sigma_k^2(x_o) = -\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \lambda_j \lambda_i \gamma(x_i - x_j) + 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_o)$$

Der beschriebene Schätzprozess kann laut GAU [GAU-10, Seite 36] für verschiedene Punkte durchgeführt werden. Interessant ist dieser Schätzvorgang für Flächen- oder eben Rauminterpolationoperationen. Bei solchen raumfüllenden Interpolationen ist die Festlegung eines regelmäßigen Schätzrasters unumgänglich. An den Knotenpunkten dieses Schätzrasters wird mittels Kriging ein Schätzwert ermittelt. Ausrichtung des Schätzraster sowie dessen Rasterweite sind variabel jedoch an die Rechnerleistung gebunden, welche einen limitierenden Faktor darstellen. Aus sehr kleiner Rasterweite resultiert eine hohe Rechen- und Speicherkapazität, die zur Verfügung gestellt werden muss.

4.2.3 Vor - und Nachteile der Geostatistik bei der Erstellung dreidimensionaler geologischer Modelle

Die Geostatistik hat gegenüber anderen konventionellen, räumlichen Schätztechniken einige Vorteile. Es gibt aber auch diverse Nachteile, wenn die Geostatistik in einem isolierten Untersuchungsgebiet angewendet wird. Diese Nachteile können jedoch mit der Integration der Geostatistik mit dementsprechenden Werkzeugen für die geologische Interpretation des Untergrundes sowie der Datentransformation eliminiert werden.

Vorteile der Geostatistik zu anderen Techniken sind laut HOULDING [HOU-00; Seite 13-14]:

- ***Spatial Variability*** (Räumliche Variabilität): Die Variogramm-Analyse ist die einzige gültige Technik, die es erlaubt die räumliche Variabilität von regionalisierten Variablen zu messen. Das Modellieren mit Hilfe eines Variogrammes ermöglicht es, die gemessenen räumlichen Variabilitäten im geostatistischen Bewertungsprozess zu integrieren.
- ***Smoothing*** (Glättung): Geostatistische Schätzung glättet vorausgesagte Werte basierend auf die Verteilung der gesamten Probenmessungen und reduziert damit Datenrauschen. Je mehr Datenrauschen in einem Datensatz zu verzeichnen ist, desto weniger reproduzieren individuelle Werte ihre unmittelbare Umgebung und desto größer sind daher die damit einhergehenden Messfehler.
- ***Declustering***: Einer Probe zugeordnete Gewichtungen werden bis zu einem Grad reduziert, dass die Informationen an nahe, korrelierende Proben mit kleiner Variabilität weitergegeben werden können. Das hilft, die Auswirkungen von variabler Probendichte zu mildern.
- ***Anisotropy*** (Anisotropie): Wenn Proben in eine bestimmte Richtung stärker miteinander korrelieren, dann sind die Kriging – Gewichte für Proben in dieser Richtung ebenfalls größer. Es ist also möglich, gerichtete, geologische Prozesse mithilfe der Geostatistik darzustellen.

- **Precision** (Präzision): Wenn ein Variogramm gegeben ist, dass repräsentativ für die zu schätzende Region ist, erhält man durch Kriging-Methoden die präzisesten Schätzwerte, die möglich sind. In Praxis sollte also jedes Variogramm von den zur Verfügung stehenden Proben erzeugt werden.
- **Uncertainty** (Fehlermessung): Das geostatistische Schätzverfahren erzeugt nicht nur einen Schätzwert für einen nicht gemessenen Ort, sondern lässt auch Rückschlüsse auf den Schätzfehler zu. Diese Fehlermessung ist nicht nur ein günstiger Bonus, sondern ein wesentlicher Teilaspekt des Schätzungsprozesses. Die Messung des Fehlers ist gleichzeitig auch eine Messung der Güte und Zuverlässigkeit des geschätzten Wertes.

Nachteile der Geostatistik laut HOULDING [HOU-00, Seite 14-15] sind:

- **Geological Influence** (geologischer Einfluss): Die räumliche Variation von regionalisierten Variablen wird häufig durch Diskontinuitäten im geologischen Einfluss verkompliziert. In Isolation angewendete geostatistische Schätzung kann zu geglätteten Schätzwerten bei Diskontinuitäten führen. Dieser Nachteil kann jedoch durch die Integration geologischer Kontrollen und Informationen innerhalb des geostatistischen Schätzprozesses verhindert werden.
- **Non-Normal Distributions** (Nicht-Normale Verteilungen): Variablen weisen oft eine nicht-normale Verteilung der gemessenen Werte auf und erfüllen daher nicht die Grundannahmen der geostatistischen und statistischen Normalität. Dies kann jedoch durch Umformen von Daten oder durch Entfernen von bestimmten Datenteilen unterbunden werden.

4.3 Repräsentationsformen von 3D Körpern

Die Beschreibung der Geometrie von 3D-Objekten und ihren Repräsentationsformen ist neben den Interpolationsmethoden unumgänglich für das Verständnis der Modellierung und Visualisierung von raumbezogenen Daten im 3D-Raum. Die Darstellungsformen von Körpern sind im Prozess der Modellerstellung sehr wichtig und beschreiben Oberfläche oder Volumen von modellierten Körpern.

BUNGARTZ [BUN-02, Seite 59-73] unterteilt die Darstellungsformen eines Körpers in zwei Gruppen. Diese gliedern sich in direkte Darstellungsschemata, welche die Volumina von Körpern selbst beschreiben, und in indirekte Darstellungsschemata, bei denen die Beschreibung des Körpers mithilfe von Kanten oder Oberflächen erfolgen.

Auch ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 26] teilt die Repräsentationsformen von Objekten in zwei ähnliche Kategorien. Diese werden als **volumenbasierende (volume-based representation)** und **oberflächenbasierende (surface-based representation)** Objektdarstellungsmethoden bezeichnet.

Die oberflächenbasierenden Repräsentationsformen sind laut ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 26]:

- **GRID - Modell**
- **SHAPE - Modell**
- **FACET - Modell**
- **BOUNDARY - REPRESENTATION - Modell (B-Rep)**

Die volumenbeschreibenden Repräsentationsformen werden in folgende Methoden unterteilt:

- **3D - ARRAY - Modell**
- **OCTREE - Modell**

- **CONSTRUCTIVE SOLID GEOMETRY (CSG)**
- **3D TIN (oder TEN) - Modell**

Auf den folgenden Seiten werden nun die beiden Repräsentationsmodelle von 3D-Körpern mit ihren verschiedenen Methoden näher beschrieben.

4.3.1 Oberflächenbasierende Repräsentationsformen

GRID - Modell

Laut ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 26-27] werden GRIDs meist für Oberflächendarstellung im Bereichen des GIS und der digitalen Kartographie benutzt und beschreiben meist digitale Geländemodelle (Deutsch: DGM, Englisch: Digital Terrain Models, DTM). Dieses GRID-Strukturmodell hat den Vorteil, dass es relativ simple zu generieren ist und dass topologische Informationen bezüglich ihrer Positionen klar definiert sind. Die eigentliche Struktur kann mit einer Matrix – Struktur im Bereich der Computerprogrammierung verglichen werden. Jedes Element der Matrix repräsentiert den XY-Standort innerhalb des GRIDs. Wenngleich mit Hilfe dieser Methode sehr gute Geländeoberflächen generiert und abgebildet werden können, hat es in Bezug auf Mehrfachhöhenwerte, wie zum Beispiel bei senkrechten Wänden oder Geländeüberhängen, Schwächen. Dies ist eines der Hauptprobleme dieser Methode. Auch andere Geländeobjekte oder Geländebruchlinien wie lineare, mehreckige oder noch komplexere Körper brauchen zusätzlich geometrische Berechnungen, um sie darstellen zu können, daher gibt es wesentlich bessere Methoden, komplexe Objekte darzustellen.

In der folgenden Abbildung kann man eine GRID-Oberfläche sehen, die mit Hilfe der Software Rockworks 15 berechnet und interpoliert wurde. Es werden Punkte einer interpolierten, 10-fach überhöhten Tegelschicht mit einem GRID-Raster von 1m x 1m angezeigt.

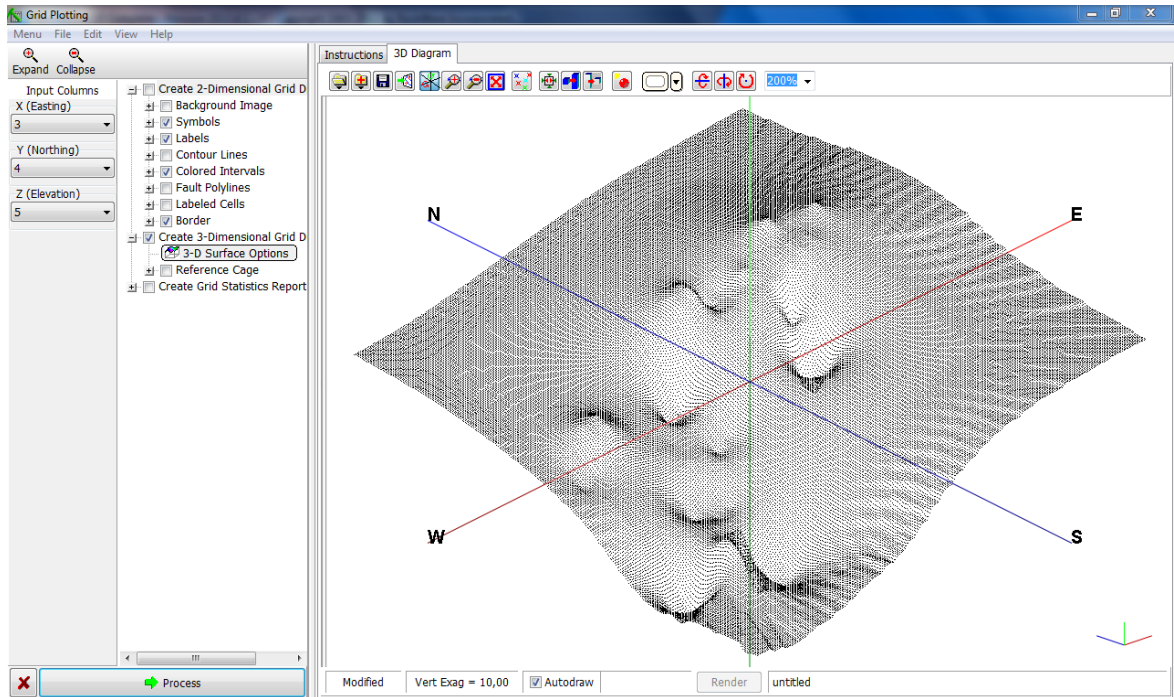


Abbildung 27: GRID – Oberfläche in Rockworks 15 (eigene Bearbeitung)

SHAPE - Modell

Ein SHAPE–Modell beschreibt nach ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 27-28] die Oberfläche eines Objektes durch die Unterstützung von abgeleiteten Kenngrößen der Geländepunkte (beispielsweise Neigung). Anstatt einem Z-Wert (Höhenwert) bei der GRID Methode hat jeder Punkt im Shape–Modell zum Beispiel einen Neigungswert (Abb. X). Mit diesen Neigungen kann ein Normalvektor jedes GRID-Punktes erstellt werden und so die Gestalt der Oberfläche definiert werden. Die Nachteile dieser Methode sind jedoch die gleichen wie bei der vorher besprochenen GRID–Methode.

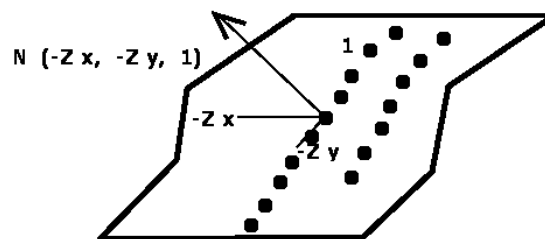


Abbildung 28: Beispiel einer Oberfläche mit der SHAPE - Methode (Quelle: ABDUL-RAHMAN, A., PILOUK, M.: Spatial Data Modeling for 3D GIS. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 2008, Seite 28. , eigene Bearbeitung)

FACET - Modell

Eine weitere Möglichkeit, Objekte nach ihrer Oberfläche geometrisch zu beschreiben, ist die FACET-Methode. Wie der Name schon sagt, wird das Objekt mittels Facetten beschrieben, die eine unterschiedliche Größe und Form haben können. Nach ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 28] ist eine der populärsten FACET-Methoden die TIN-Methode (Triangular Irregular Network). Dabei wird eine Oberfläche aus einem Netzwerk von verschiedenartigen Dreiecken aufgebaut. Jede Dreiecksfacette der Oberfläche wird aus jeweils drei Punkten zusammengefügt, wobei jeder Punkt wiederum eine X, Y und Z Koordinate aufweist.

In der folgenden Abbildung (Abb. 22) erkennt man die Vorgehensweise der TIN – Darstellungsmethode.

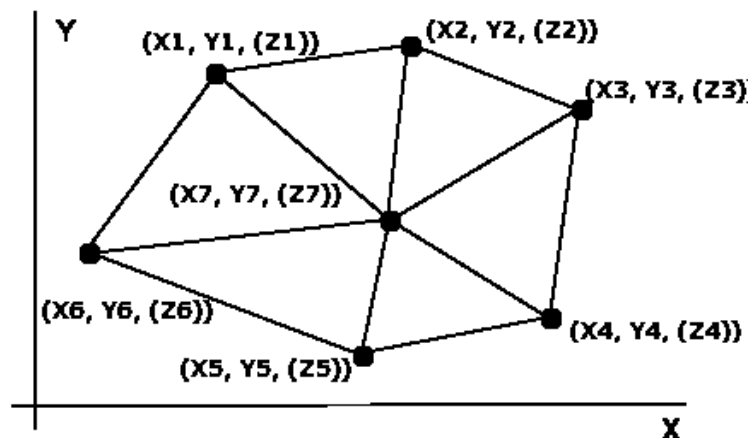


Abbildung 29: 2D – Tin Oberfläche (Quelle: ABDUL-RAHMAN, A., PILOUK, M.: Spatial Data Modeling for 3D GIS. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 2008, Seite 28. , eigene Bearbeitung)

Die TIN – Methode wird nach MIDTBØ [MIT-96] oft für die Darstellung von DTMs und anderen geländebeschreibenden Softwareanwendungen aufgrund ihrer strukturellen Stabilität und ihrer Anpassungsfähigkeit von Geländemerkmale eingesetzt. Ein weiterer Grund für die Nutzung der TIN – Methodik ist die einfache Dateninterpolation, laut ABDUL-RAHMAN [ABD-92], sowie die Möglichkeit der Objektvisualisierung, laut KRAAK [KRA-92]. Dreiecke und TINs können laut

ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 29] im Raster– wie auch im Vektorbereich konstruiert werden, wobei die meisten Triangulationstechniken auf der Delaunay – Triangulierung basieren.

Die Delaunay – Triangulation ist laut dem GEOINFORMATIK LEXIKON DER UNI ROSTOCK [LEX-11a] eine Methode zur Erstellung von Dreiecksnetzen aus einer Vielzahl an Punkten. Die Bedingung bei dieser Triangulierung ist, dass innerhalb eines Umkreises um drei Punkte, die ein Dreieck bilden, kein weiterer Punkt liegt (Umkreisbedingung). Die Methode produziert wohlgeformte (annähernd gleichseitige) Dreiecke. Die dadurch entstandenen Dreiecke überlappen sich nicht und vermaschen eine beliebig große Punktmenge flächendeckend (letzte Änderung 21.12.2003).

Die nächsten beiden Abbildungen (Abb. X und Y) zeigen die nicht erfüllte (Abb. X) und die erfüllte Umkreisbedingung (Abb. Y):

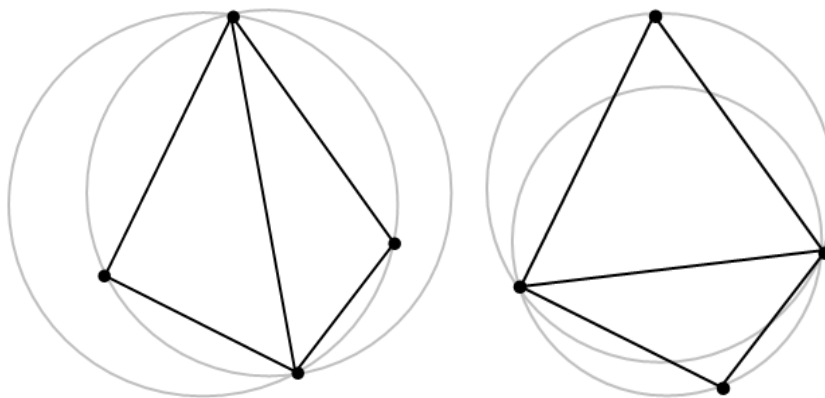


Abbildung 30: nicht erfüllte Umkreisbedingung (links), erfüllte Umkreisbedingung (rechts)

Quelle: Abb. 23A: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c1/Delaunay_before_flip.png

Quelle: Abb. 23B: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a7/Delaunay_after_flip.png

Laut ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 29] variieren die Form und Größe der erstellten Dreiecke bei der TIN-Methode, abhängig von der originalen räumlichen Verteilung der Daten des Datensatzes. Eine der Vorteile der Darstellung mittels

TIN-Methode ist, dass alle beschreibenden Punkte zur Darstellung der Oberfläche des Körpers verwendet werden.

Boundary Representation (B-Rep)

Das Boundary Representation – Konzept beschreibt laut SCHNEIDER [SCH-06, Seite 13] die Begrenzungen eines Körpers. Die umhüllenden Primitiva sind dabei Knotenpunkte, Kanten und Flächen. Jedes dieser Elemente werden Eigenschaften zugewiesen. Beispielsweise kann dabei eine Kante einen linearen Verlauf, aber auch einen parametrischen Verlauf zugewiesen werden. Die folgende Abbildung (Abb.24) zeigt den Aufbau eines durch B-Rep beschriebenen Körper:

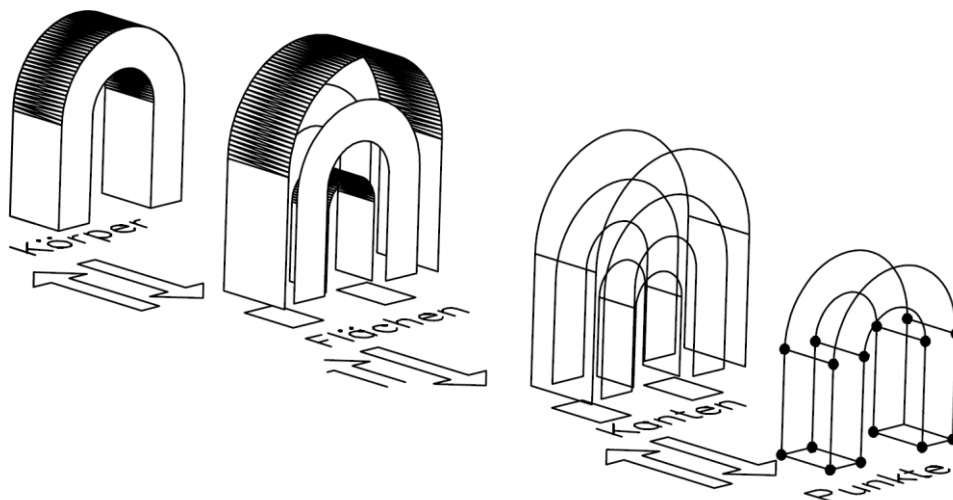


Abbildung 31: Grundprinzip der Boundary Representation (Quelle: http://www.uni-weimar.de/cms/fileadmin/bauing/files/professuren/ism/Abschlussarbeiten/DA_Schneider_2006.pdf, Seite 13)

Die B-Rep – Methode ist aufgrund der eher komplexen Berechnungen von Bézierkurven und B-Splines eher im CAD-(Computer Aided Design)Bereich anzusiedeln. Im GIS-Bereich ist die Nutzung der B-Rep – Methode zur Darstellung von Körpern laut ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 31] eher limitiert, da das Modell so modifiziert werden muss, dass die drei fundamentalen räumlichen Datenelemente (Geometrie, Attribute, Objektidentifikationsdaten) mit den

verwandten topologischen Informationen zusammen gespeichert werden können, wobei dies rechen- und speicherintensiv ist.

Die folgende Graphik (Abb. 32) zeigt eine Zusammenfassung der oberflächenbasierenden Objektdarstellungsmethoden.

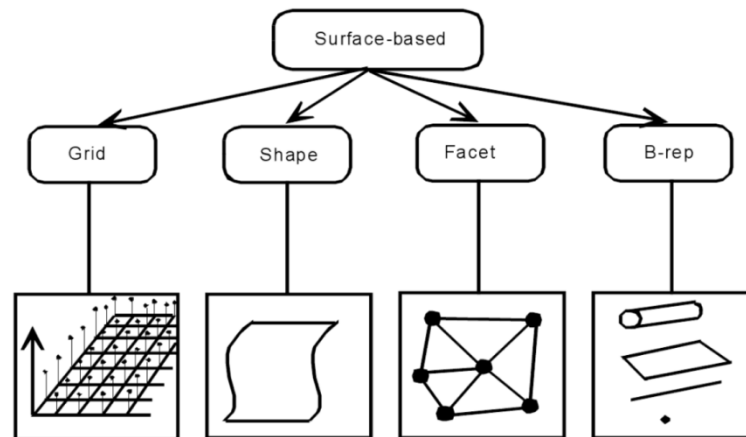
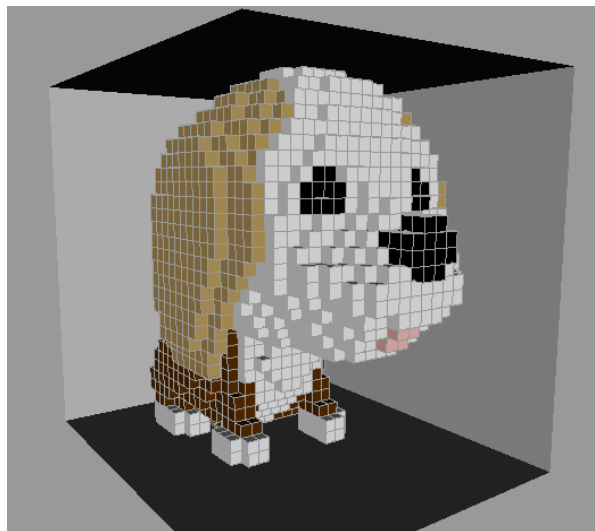


Abbildung 32: Oberflächenbasierende Objektdarstellungsmethoden (Quelle: ABD-08, Seite 32)

4.3.2 Volumenbasierende Repräsentationsformen

3D – Array Modell

Die 3D-Array-Methode ist laut ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 32] die einfachste Datenstruktur im 3D-Bereich. Die Struktur relativ simple zu verstehen und auch sehr einfach in der Anwendung. Jedoch ist die Methode der Darstellung eher ineffizient. Wenn beispielsweise mehrere der gleich großen Volumenelemente (Voxel) von den gleichen Werten besetzt sind, entsteht eine riesige unnötige Nachfrage an Speicherkapazität. Diese Vorgehensweise ist für die Darstellung von großen Objekten mit höherer Auflösung eher rechenintensiv, da die genauere Auflösung zu einer höheren steigenden Speicherbelastung führt. Die Größe der zu berechnenden Voxels ist in den meisten Programmen selbst definierbar.



**Abbildung 33: Voxeldarstellung – 3D Array (Quelle:
<http://www.everygraph.com/product/voxel3d/pic/dog.png>)**

Bei der Abbildung 33 kann man einzelne Volumenelemente, die die gleiche Ausdehnung besitzen, gut erkennen. Auch Elemente mit den gleichen Werten, in diesem Fall Farbwerte, werden eigenständig angezeigt. Durch die einzelne Darstellung und Berechnung jedes einzelnen Array-Wertes ist der Rechen- und Speicheraufwand hoch. Eine Verbesserung der 3D-Array – Methode stellt die im

folgenden Abschnitt besprochene Octree-Methode dar. Bei dieser Methode variieren die Größen der Voxellemente.

Octree – Modell

Die hierarchische, rekursive Octree – Methodik ist laut BUNGARTZ [BUN-02, Seite 61-63] genauso mächtig wie das 3D-Array Darstellungsschema, vermeidet aber dessen enormen Speicherplatzbedarf. Das zweidimensionale Analogon wird als Quadtree-Schema (Abbildung X) bezeichnet. Als erster Schritt wird ein ausreichend großer Würfel gewählt, der den darzustellenden Körper vollständig umschließt. Dieser definierte Würfel wird dann solange rekursiv in Teilwürfel mit der halben Kantenlänge unterteilt, bis sich der beliebig kleine Würfel gänzlich innerhalb oder außerhalb des darzustellenden Körpers befindet. Dies ist natürlich auch mit einer vordefinierten Genauigkeit für die feinst-darzustellende Kantenlängen eines Würfels im Vorhinein zu definieren. Die Schwierigkeit, die dabei zu lösen ist, ist die effizient zu realisierende Operation und der Test, ob sich ein Würfel innerhalb (in) oder außerhalb (off) des zu beschreibenden Objektes befindet oder dessen Rand in irgendeiner Form schneidet (on). Die Baumstruktur hat je nach Dimension (zweidimensional oder dreidimensional) eine vier- oder achtfache Verästelung.

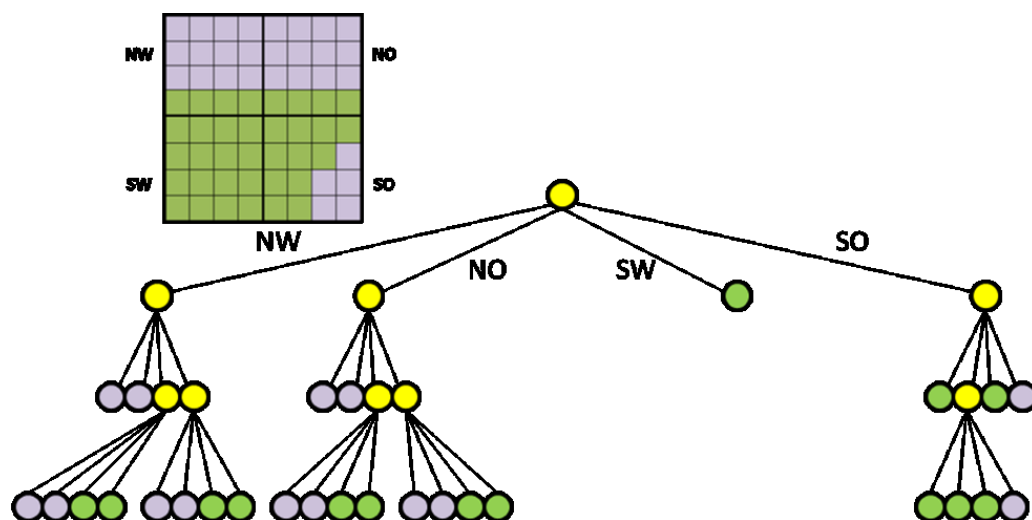


Abbildung 34: Quadtree Struktur (eigene Abbildung)

Die Abbildung 34 zeigt das Schema einer Quadtree – Darstellung, das sich von einer Octree–Darstellung nur in der Anzahl der nach unten verlaufenden Tochterverästelungen unterscheidet. Wie vorhin erwähnt, wird in der Quadtree - Darstellung eine Vierfach-, bei der Octree eine Achtfachverästelung benutzt. Gelbe Punkte entsprechen Regionen, bei denen weiter unterteilt werden muss. Grüne Punkte entsprechen Objekten mit einer gewissen Attributierung und dadurch keine weitere Verästelung nach sich ziehen. Graue Punkte entsprechen in dieser Darstellung Objekten, die keine Attributierung besitzen und dadurch ebenfalls nicht mehr unterteilt werden müssen. Die Farben der Darstellung sind eigens gewählt und dienen der Anschaulichkeit des Beispiels. Nach dem gleichen Prinzip funktioniert auch die Darstellung eines Körpers mittels des Octreeverfahrens. Die folgende Graphik zeigt eine Abbildung (Abbildung 35) von ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 34]. Bei dieser Art des Octree – Schemas eines Körpers wird nicht die Farbe als Unterteilungsgrundlage genutzt, sondern es werden Zahlenwerte, beispielsweise Belastungswerte im Grundwasser eines geologischen Körpers, als Unterteilungsmerkmal verwendet.

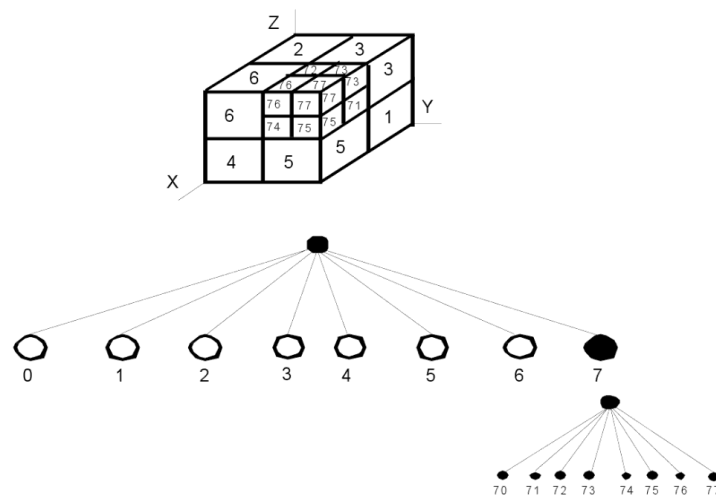


Abbildung 35: Octree Repräsentation eines Körpers (Quelle: Abdul Rahman, ABD-08, Seite 34)

Laut RONGXING [RON-94] ist die Octree-Methode bei raumbezogenen Analysen, Booleschen Operationen sowie im Datenbankmanagementbereich aufgrund seiner hierarchischen Datenstruktur sehr effizient.

CSG-Modell

Constructive Solid Geometry (CSG) befasst sich laut ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 34] mit der Darstellung von Körpern mittels einer Kombination von vordefinierten simplen Grundkörpern. Diese Grundkörper können beispielsweise Kugeln, Zylinder, Würfel, Kegel oder andere rechteckige Körper sein und werden mithilfe von Booleschen Operationen miteinander kombiniert. Diese Art der Repräsentationsform wird meist in den Bereichen der Architektur und des Maschinenbaus verwendet, weil die Arbeiten mit Grundkörpern in der Regel sehr unkompliziert sind. Diese Grundkörper, auch Primitive genannt, sind regelmäßig geformte volumetrische Körper, die geometrisch transformiert werden und, wie oben beschrieben, mithilfe von Booleschen Operationen miteinander kombiniert werden. Die geometrischen Transformationen beinhalten Translation, Rotation und Skalierung. Die Booleschen Operationen beinhalten Union (Vereinigung), Intersection (Überschneidung) und Difference (Differenz). Der Speicherbedarf dieser CSG – Methode steigt mit der Anzahl der verwendeten Primitive. Da diese Darstellungsmethode eher für regelmäßig-geformte Objekte infrage kommt und der Rechenaufwand für unregelmäßig geformte Körper zu groß ist, ist das CSG-Verfahren im Modellierungsprozess von kartographischen Sachverhalten eher ungeeignet.

Die Abbildung 36 zeigt die schematische Vorgehensweise beim CSG Verfahren.

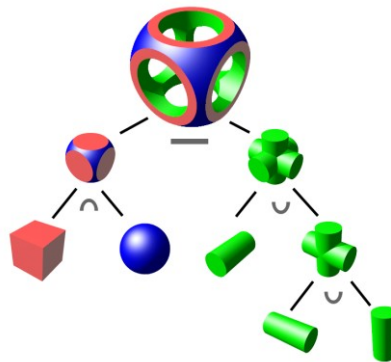


Abbildung 36: Vorgehensweise beim CSG - Verfahren (Quelle:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8b/Csg_tree.png)

3D TIN – Modell

ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 35-36] beschreibt die 3D TIN – Methode als eine Erweiterung des TIN-Darstellungsmusters und wird auch als Tetrahedral Network (TEN) bezeichnet. Bei dieser Vorgehensweise wird ein Objekt mit sich berührenden, aber nicht überlappenden Tetraedern beschrieben. Wie im Bereich der TIN-Darstellung hat auch die 3D TEN Darstellung Vorteile in der Manipulation, Darstellung und Analyse von 3D Körpern. Ein TEN – Modell wird durch vier Punkte, sechs Kanten und vier Flächen visualisiert. TEN-Repräsentationsformen haben gegenüber anderen Darstellungsmethoden geometrischer Körper einige Vorteile. Diese Vorteile sind: Eine sehr simple Datenstruktur, die auf Punkte, Kanten, Flächen und Volumen reduziert werden kann. Es wird schnelles topologisches Berechnen unterstützt und außerdem ist es sehr gut für schnelle Visualisierungen geeignet. Die folgende Graphik (Abb. 37) zeigt das Beispiel der Gestalt von 3 Tetraedern, die im Zuge der 3D TIN – Darstellungsmethode berechnet werden können.

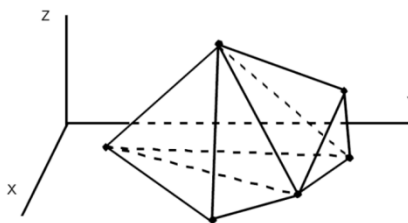


Abbildung 37: 3D TIN Körper (Quelle: ABD-08, Seite 36)

Einer der Nachteile der Darstellungsmethoden ist jedoch auch die unregelmäßige Unterteilung des abzubildenden Körpers und damit oft unzureichende Darstellung in manchen Bereichen eines Objektes.

Um nun alle volumenbasierenden Darstellungsmethoden noch einmal kurz zusammenzufassen, ist die Abbildung aus ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 37] gut geeignet. Man kann hier sehr gut die verschiedenen Ansätze der Darstellung der Geometrie von 3D Körpern erkennen und gleichzeitig auf ihre Vor- und Nachteile hinweisen.

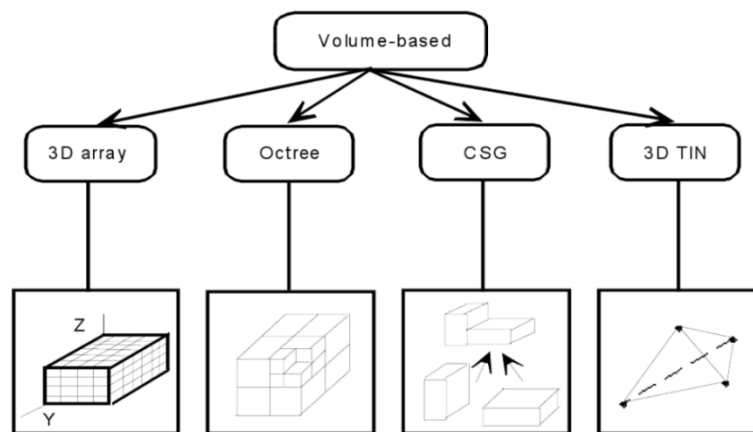


Abbildung 38: Volumenbasierende Objektdarstellungsmethoden (Quelle: ABD-08, Seite 37)

Zusammenfassend kann laut ABDUL-RAHMAN [ABD-08, Seite 37-38] gesagt werden, dass oberflächenbeschreibende Darstellungsmethoden die geometrischen Charakteristiken von Objekte durch Oberflächeneinheiten beschrieben werden. GRID-, SHAPE- und FACET – Modelle können für die Repräsentation von unregelmäßig geformten Oberflächen verwendet werden, wobei B-REP – Modelle im Wesentlichen nur für regelmäßig geformte Objekte in Betracht gezogen werden können. Bei den volumenbasierenden Darstellungsmethoden können 3D ARRAY-, OCTREE- und 3D TIN – Modelle für die Visualisierung von unregelmäßigen Körpern genutzt werden, das CSG – Modell eher nur im Bereich der regelmäßig geformten Objekte.

4.4 Topologie

Nachdem bisher im Kapitel 3 die Thematiken des Modellbegriffes, der Interpolationsmethoden sowie Repräsentationsformen von dreidimensionalen Körpern besprochen wurden, soll am Ende dieses Kapitels der Begriff der Topologie näher erörtert werden. Die Topologie charakterisiert die räumlichen Beziehungen von Geoobjekten zueinander. Um die Topologie von Geoobjekten zu betrachten, wird die Geometrie dieser abstrahiert, also vereinfacht. Um die Eigenschaften der Topologie und deren Sichtweise erklären zu können, eignet sich das Beispiel eines Luftballons sehr gut, auf dem beispielsweise die Grundrisslinien eines Straßenplans aufgezeichnet sind. Wird nun Luft abgelassen oder hineingepumpt, ändert sich zwar stets die Geometrie des Straßenplans, jedoch nicht die relative Lage der Linien zueinander. Die Transformationen wie Drehungen, Streckungen oder Stauchungen sind topologisch invariant (in DE LANGE [DEL-02, Seite 163]).

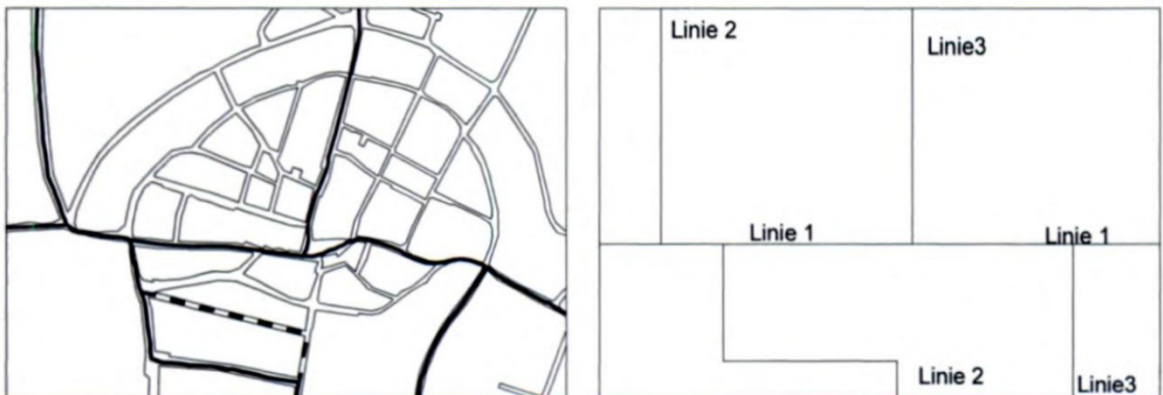


Abbildung 39: Gegenüberstellung von Geometrie und Topologie am Beispiel eines Busliniennetzes (Quelle: DE LANGE [DEL-02, Seite 163])

Die vorangegangene Abbildung (Abb. 39) zeigt auf der linken Seite den geometrisch exakten Stadtplan inklusive der etwas dicker gekennzeichneten Buslinien und auf der rechten Seite die Abbildung der topologisch richtigen Buslinien, bei der die Geometrie abstrahiert wurde.

Die Topologie in Bezug auf geologische Körper spielt eine wesentliche Rolle bei der Modellierung von geologischen Sachverhalten. ELFERS et. al. [ELF-05, Seite 5] stellt in seinem Leitfaden zur 3D-Geologie einige Anforderungen an geologische Modelle. Beispielsweise sollte zwischen Geokörpern eines Modells eine Topologie aufgebaut sein, d.h. benachbarte Körper müssen sich „kennen“. Geokörper sollen auch veränderbar und untereinander kombinierbar sein und es soll die Möglichkeit geben, Teilmodelle zu einem ganzen Modell verknüpfen zu können. Alle diese Anforderungen, die laut ELFERS et. al. [ELF-04, Seite 5] an ein geologisches Modells gestellt werden, haben einen topologischen Bezug. In der Geologie ist immer die Obergrenze einer Schicht die Untergrenze der darauf folgenden jüngeren Schicht. Diese geologischen Schichtkörper sind zwar eigenständige Objekte, jedoch haben diese teilweise exakt die gleichen Grenzen zu anderen benachbarten Schichtkörpern.

An der folgenden Abbildung aus JANSSENS-CORON [JAN-10, Seite 80] sieht man die stratigraphischen Kontakte und zeitlichen Abläufe der Ablagerungen der geologischen Schichten mittels eines Profilschnittes und eines Graphen mit dem chronologischen Aufbau der Lagerungen. Step 1 zeigt die älteste Ablagerung, Step 5 die jüngste. Mit Hilfe dieses Schemas ist es möglich, die topologischen Beziehungen von geologischen Schichtungen zueinander sehr gut nachzuvollziehen. Beispielsweise muss Block 3 vor den Blöcken 2, 9 und 14 abgelagert worden sein, weil sich diese Schicht unter diesen Blöcken befindet. Block 3 muss aber auch nach den Blöcken 0,4,5,6,7 und 11 gebildet worden sein, da sie sich über diesen befindet.

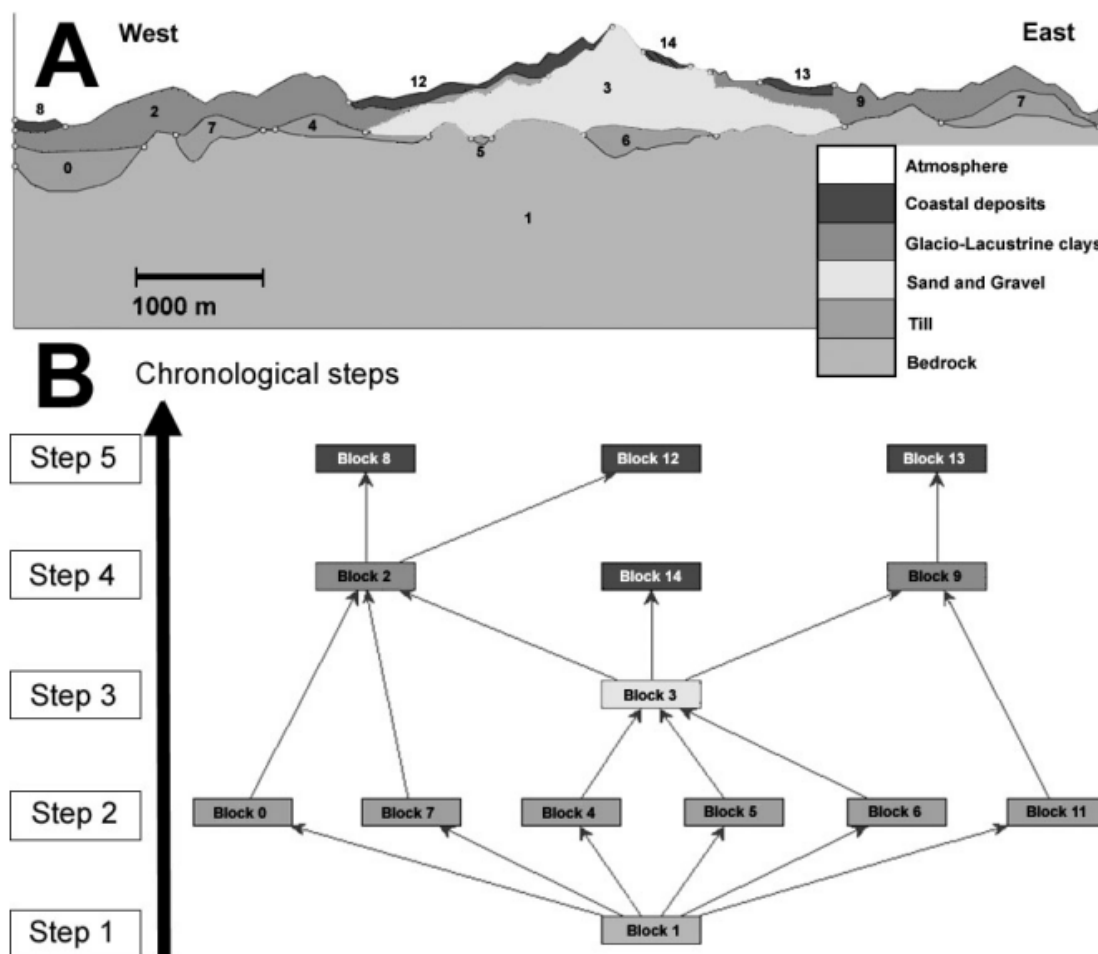


Abbildung 40: Stratigraphische Kontakte (Quelle: JAN-10, Seite 80)

Der teilweise linsenartige Aufbau der Schichtung im Schema des Step 2 (Till) lässt die eigenwilligen Strukturen und Topologie geologischer Schichtungen gut erkennen. Diese Darstellung zeigt die Nachbarschaftsbeziehungen von geologischen Schichten im 2D – Raum. Die topologischen Verhältnisse im 3D-Raum sind wesentlich komplexer und schwieriger zu definieren. Der folgende Abschnitt soll ein theoretisches Modell der Möglichkeiten von Nachbarschaftsbeziehungen zeigen, um die Thematik besser verstehen zu können.

4.4.1 9-Intersection Modell:

Nach KURATA [KUR-10, Seite 123] sind topologische Beziehungen, welche angeben wie zwei Objekte zueinander im Raum stehen, eine der meist untersuchten und fundamentalsten räumlichen Informationen. In der Realität können zwei physische, feste Körpern lediglich eine getrennte, räumliche Beziehung zueinander haben. Daher wird von KURATA [KUR-10, Seite 123] ein alternativer theoretischer Begriff für topologische Beziehungen eingeführt, der Begriff der Kontaktbeziehungen (engl. **contact relations**). Die in weiterer Folge diskutierten Modelle soll klären, wie zwei Objekte zueinander in Kontakt stehen. Die anfänglich gezeigten **9-Intersection - und 9⁺-Intersection – Modelle** sollen die Grundeigenschaften des im Folgenden besprochenen **9⁺-Contact – Modell** diskutieren, dass vom Grundprinzip dem Topologie – Modell von geologischen Schichtungen am Nächsten kommt. Dieses Modell differenziert auf den Kontaktbeziehungen zweier Objekte und basiert dabei auf dem Dasein oder Fehlen von Kontakten zwischen verschiedenen Oberflächenelementen von zwei Objekten innerhalb des dreidimensionalen euklidischen Raums ($\mathbb{R}^3$).

EGENHOFER [EDE-89, Seite 457-472] differenziert zwischen acht verschiedenen Typen der topologischen Beziehungen zwischen zwei Regionen in einem zweidimensionalen Euklidischen Raum. Diese Typen werden in Getrenntheit (*disjoint*), Berührung (*meet*), Überschneidung (*overlap*), Überdeckung (*covers*) (Objekt A überdeckt Objekt B), umgekehrte Überdeckung (*coveredBy*) (Objekt B überdeckt Objekt A), Umschließung (*contains*), Innerhalb (*inside*) und Übereinstimmung (*equal*) unterschieden. ZLATANOVA [ZLA-00, Seite 913-924] übernimmt diese acht Relationen auch für zwei Körper im 3D Euklidischen Raum ($\mathbb{R}^3$). In der Wirklichkeit würden diese acht Relationsmöglichkeiten, angewandt an physischen Objekten, natürlich nicht funktionieren, da Objekte, wie schon vorher besprochen, für gewöhnlich fest sind und sich nicht überschneiden oder miteinander verbinden lassen.

In der Abbildung 41 werden die acht Möglichkeiten der topologischen Beziehungen zwischen zwei Körpern mithilfe der konventionellen 9-Intersection Matrix dargestellt. Sie werden, wie schon vorher besprochen, in Getrenntheit

(disjoint, Abb. A), Berührung (meet, Abb. B), Überschneidung (overlap, Abb. C), Übereinstimmung (equal, Abb. D), Überdeckung (covers, Abb. E₁) (Objekt A überdeckt Objekt B), umgekehrte Überdeckung (coveredBy, Abb. E₂) (Objekt B überdeckt Objekt A), Umschließung (contains, Abb. F₁), und Innerhalb (inside, Abb. F₂) unterschieden. Die Vorgehensweise bei der Bildung der Matrix wird auf den nachfolgenden Seiten intensiv besprochen.

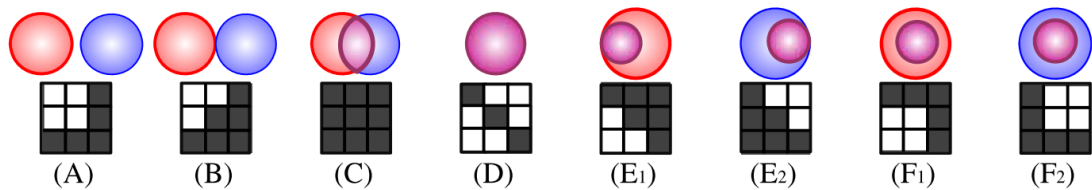
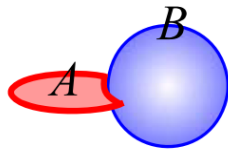


Abbildung 41: 8 Topologische Körper – Körper Relationen nach dem 9-Intersection Modell zwischen Körper A und Körper B (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 131)

9-Intersection - Modell

Das zu erklärende 9-Intersection Modell basiert auf den Modellen von EGENHOFER [EGE-91] und KURATA [KUR-07, Seite 62-76]. Es wird dabei zwischen dem Inneren (*Interior*), dem Rand (*Boundary*) und dem Komplement (*Exterior*) eines Objektes unterschieden. Das Innere eines Objektes X wird als X° , der Rand als ∂X und das Komplement als X^- bezeichnet. Weitere Charakteristika sind, dass die Begrenzung einer Linie deren beide Endpunkte sind und ein Punkt kein Inneres besitzt. Im 9-Intersection Modell werden nun die topologischen Überschneidungen zwischen den drei Grundtopologien (*Interior*, *Boundary*, *Exterior*) von zwei Objekten gegenübergestellt und verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs werden in eine 3 x 3 Matrix eingetragen. Ist der Vergleich richtig, wird das Kästchen der Matrix gefüllt, ist der Vergleich falsch bleibt das Kästchen leer.

$$M(A, B) = \begin{pmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \partial B & A^\circ \cap B^- \\ \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^- \\ A^- \cap B^\circ & A^- \cap \partial B & A^- \cap B^- \end{pmatrix}$$



$$M(A, B) = \begin{pmatrix} \emptyset & \emptyset & \neg \emptyset \\ \emptyset & \neg \emptyset & \neg \emptyset \\ \neg \emptyset & \neg \emptyset & \neg \emptyset \end{pmatrix} \rightarrow \begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \blacksquare \\ \hline \square & \blacksquare & \blacksquare \\ \hline \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare \\ \hline \end{array}$$

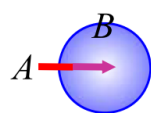
Abbildung 42: Topologische Relationen nach dem 9-Intersection Modell zwischen Fläche A und Körper B (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 125)

Die Abbildung zeigt die 9-Intersection Beziehungsmatrix zwischen einer Fläche A und einem Körper B. Dabei kann man erkennen, dass das Innere der beiden Objekte keinerlei Überschneidung haben, ebenso wie das Innere der Fläche A und der Rand des Objektes B. Jedoch überschneidet sich das Innere der Fläche A mit dem Komplement des Objektes B, daher wird das rechte obere Kästchen der Matrix gefüllt. Die weiteren Vergleiche werden nach dem gleichen Schema durchgeführt. Der Rand der Fläche A überschneidet sich nicht mit dem Inneren des Körpers B, deshalb wird dieser Bereich der Matrix nicht gefüllt. In den nächsten fünf Bereichen der Matrix kommt es zu Überschneidungen. Die jeweiligen Ränder der beiden Objekte wie auch der Rand der Fläche A und das Komplementär des Objektes B weisen Überschneidungen auf. Auch das Komplementär der Fläche A weist Überschneidungen mit den drei Grundtopologien (*Interior*, *Boundary*, *Exterior*) des Körpers B. Das heißt, dass in der unteren Zeile der Matrix die drei Kästchen ebenfalls gefüllt werden. Der Vergleich der Topologien der beiden Objekte zueinander ergibt dann die in der vorigen Abbildung illustrierte Matrix und soll das Grundprinzip des 9-Intersection Modells zeigen.

9⁺-Intersection - Modell

Jedoch gibt es auch topologische Eigenheiten, aufgrund dessen dieses Modell spezifiziert werden muss. KURATA [KUR-10, Seite 125] erklärt, dass man beispielsweise den Rand einer Linie in zwei unterschiedliche Endpunkte aufteilen kann. Um solche Unterteilungen zu unterstützen, wurde das 9-Intersection Modell hinlänglich einiger Eigenschaften manipuliert und als 9⁺-Intersection Modell bezeichnet. Wie beim folgenden Beispiel zu sehen ist, wurde der Rand einer Linie, ∂A (Boundary), in $\partial_1 A$ und $\partial_2 A$ unterteilt. $\partial_1 A$ stellt den Endpunkt der Linie A dar, der sich außerhalb der Kugel B befindet, wohingegen $\partial_2 A$ den Endpunkt darstellt, der sich im Inneren der Kugel B platziert hat.

$$M^+(A, B) = \begin{pmatrix} [A^\circ \cap B^\circ] & [A^\circ \cap \partial_j B] & [A^\circ \cap B^{-j}] \\ [\partial_i A \cap B^\circ] & [\partial_i A \cap \partial_j B] & [\partial_i A \cap B^{-j}] \\ [A^{-i} \cap B^\circ] & [A^{-i} \cap \partial_j B] & [A^{-i} \cap B^{-j}] \end{pmatrix}$$



$$M^+(A, B) = \begin{pmatrix} A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap \partial B & A^\circ \cap B^- \\ [\partial_1 A \cap B^\circ] & [\partial_1 A \cap \partial B] & [\partial_1 A \cap B^-] \\ [\partial_2 A \cap B^\circ] & [\partial_2 A \cap \partial B] & [\partial_2 A \cap B^-] \\ A^- \cap B^\circ & A^- \cap \partial B & A^- \cap B^- \end{pmatrix} \rightarrow \begin{array}{|c|c|c|} \hline \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare \\ \hline \blacksquare & \text{---} & \blacksquare \\ \hline \blacksquare & \blacksquare & \blacksquare \\ \hline \end{array}$$

$$= \begin{pmatrix} \neg \emptyset & \neg \emptyset & \neg \emptyset \\ [\emptyset] & [\emptyset] & [\neg \emptyset] \\ [\neg \emptyset] & [\emptyset] & [\emptyset] \\ \neg \emptyset & \neg \emptyset & \neg \emptyset \end{pmatrix}$$

Abbildung 43: Topologische Relationen nach dem 9⁺-Intersection Modell zwischen Linie A und Körper B (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 126)

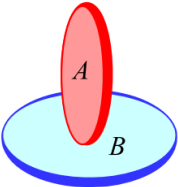
Nun wird in weiterer Folge lediglich die Vergleichsmatrix um diese Unterteilung erweitert und nach dem gleichen Schema wie im 9-Intersection Modell gelöst. Jedoch gibt es bei der Illustrierung der Matrix den Unterschied, dass man die mittlere Matrixreihe, bei der der Rand der Linie A den Grundtopologien der Kugel B gegenübergestellt wird, horizontal zweigeteilt und damit die Möglichkeit schafft, die Unterteilung des Randes einer Linie in der Matrix darzustellen.

9⁺-Contact - Modell

Laut KURATA [KUR-10, Seite 126-128] basieren Kontaktbeziehungen zwischen zwei Objekten auf der Präsenz oder dem Fehlen von Kontakten zwischen deren Oberflächenelementen. Diese Oberflächenelemente sind diejenigen Teile eines Objektes, die direkt mit dem Komplementär des Objektes in Verbindung stehen. Für Flächen im 3D Euklidischen Raum ($\mathbb{R}^3$) wird zwischen drei Oberflächen unterschieden: Der Vorderseite, der Rückseite und dem Grenzen der Fläche. Die Vorder – und Rückseite zählen zum Inneren (Interior) eines Objektes, wohingegen die Grenze zum Rand (Boundary) Objektes gezählt wird. Für 3D-Körper erfolgt die Unterscheidung zwischen einer Vielzahl an Oberflächenelementen, beispielsweise bei einem Würfel zwischen sechs Seiten. Um dies zu vereinfachen, wird daher bei 3D-Körpern im 9⁺-Contact – Modell lediglich von einem Oberflächenelement gesprochen, welches sich mit dem Rand (Boundary) des Körpers deckt.

In der nun folgenden Abbildung (Abb. 44) sind die topologischen Kontaktbeziehungen zweier Flächen zueinander ersichtlich. Dabei ist in der Kontakt-Matrix zu erkennen, dass zwischen dem Inneren (A° , B°) der beiden Flächen jeweils eine Unterteilung in Vorder– und Rückseite ($A^{\circ 1}$, $A^{\circ 2}$, $B^{\circ 1}$, $B^{\circ 2}$) vorgenommen wurde. Die Vorderseite wird mit der Ziffer 1, die Rückseite mit der Ziffer 2 benannt. Wiederum verläuft die Gegenüberstellung der Kontaktbeziehungen zwischen den beiden Objekten nach dem gleichen Schema wie bei der 9-Intersection – Modellmethode. In der Kontaktmatrix sieht man, dass es keine Kontakte des Inneren beider Flächen (jeweils Vorder– und Rückseite) gibt. Interessant ist hingegen die Darstellung, dass der Rand der Fläche A (∂A) mit der Vorderseite der Fläche B ($B^{\circ 1}$) in Kontakt steht. Die weitere Vorgehensweise bei der Ausfüllung der Matrix ist wieder vergleichbar mit der 9-Intersection – Methodik.

$$C^+(A, B) = \begin{pmatrix} [c(A^{\circ i}, B^{\circ j})] & [c(A^{\circ i}, \partial_j B)] & [c(A^{\circ i}, B^-)] \\ [c(\partial_i A, B^{\circ j})] & [c(\partial_i A, \partial_j B)] & [c(\partial_i A, B^-)] \\ [c(A^-, B^{\circ j})] & [c(A^-, \partial_j B)] & true \end{pmatrix}$$



$$C^+(A, B) = \begin{pmatrix} [false & false] & [false] & [true] \\ [false & false] & [false] & [true] \\ [true & false] & false & true \\ [true & true] & true & true \end{pmatrix}$$
→

	$B^{\circ 1}$	$B^{\circ 2}$	∂B	B^-
$A^{\circ 1}$				
$A^{\circ 2}$				
∂A				
A^-				

Abbildung 44: Darstellung der Kontaktbeziehungen zweier Flächen mithilfe der 9+-Contact Matrix (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 127)

Die nächste Abbildung (Abb. 45) zeigt ein Beispiel bei dem der Rand (Boundary) einer Fläche A nicht in Kontakt mit dem Komplementär eines Körpers B steht. Lediglich die Unterseite der Fläche A ($A^{\circ 2}$) steht mit dem Rand des Körpers B (∂B) in Kontakt.

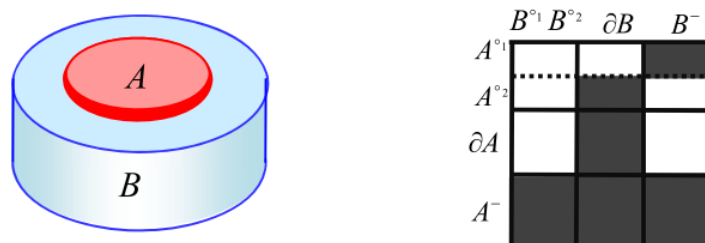


Abbildung 45: Darstellung der Kontaktbeziehungen einer Fläche mit einem Körper mithilfe der 9+-Contact Matrix (Quelle: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, Seite 128)

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das 9+-Contact – Modell sehr nützlich ist, um zu erklären wie zwei Objekte miteinander in Kontakt stehen. Es ist geeignet, um sich die Thematik der topologischen Beziehungen zwischen Objekten näher zu bringen und die theoretische Grundlage für Topologie an sich zu verstehen. Ein Problem dieses Modells ist laut KURATA [KUR-10, Seite 138] jedoch der

Umstand, dass bei der Anzahl der Oberflächenelemente eines Körpers lediglich immer nur von einem Element die Rede ist. Es ist zwar möglich die Oberfläche eines Körpers in mehrere Elemente zu unterteilen, jedoch resultiert daraus eine enorme Erhöhung der Anzahl an möglichen Kontaktbeziehungen.

5 Visualisierung von geologischen Strukturen

Der letzte Schritt bei der Erstellung eines dreidimensionalen geologischen Modells ist die Visualisierung. Dieser Schritt ist laut GAU [GAU-10, Seite 102-104] als einer der bedeutendsten innerhalb einer baugelologischen Modellbildung anzusehen. Dieser hohe Stellenwert begründet sich dahingehend, dass erst mit der Visualisierung des Modells eine einfache Darstellung und eine Kommunikation der Erkundungsdaten als auch der durch den Anwender in das Modell eingebrachten Vorstellungen ermöglicht wird. Es ist jedoch nicht mehr möglich, innerhalb des visualisierten Modells eine Trennung zwischen denjenigen Modellanteilen, die auf Erkundungsdaten zurückzuführen sind, und solchen, die auf die Einflüsse des Benutzers basieren. Somit wird also das visualisierte Modell zum wichtigsten oder gar alleinigen Diskussionsgegenstand für die an der Planung beteiligten Personen. Die Eingangsdaten hingegen verlieren ihre ursprüngliche Bedeutung. Ein Modell dient aber nicht nur der Darstellung und Veranschaulichung der Strukturen im Falle einer hohen Komplexität des Modellierungsgegenstandes, sondern auch der Ermöglichung neuer Einsichten, die erst durch die zwangsläufig notwendige Abstraktion und Generalisierung innerhalb der Modellierung zustande kommen kann. Deshalb ist es auch Aufgabe des Modells, das Interesse des Nutzers am Untersuchungsgegenstand zu fördern.

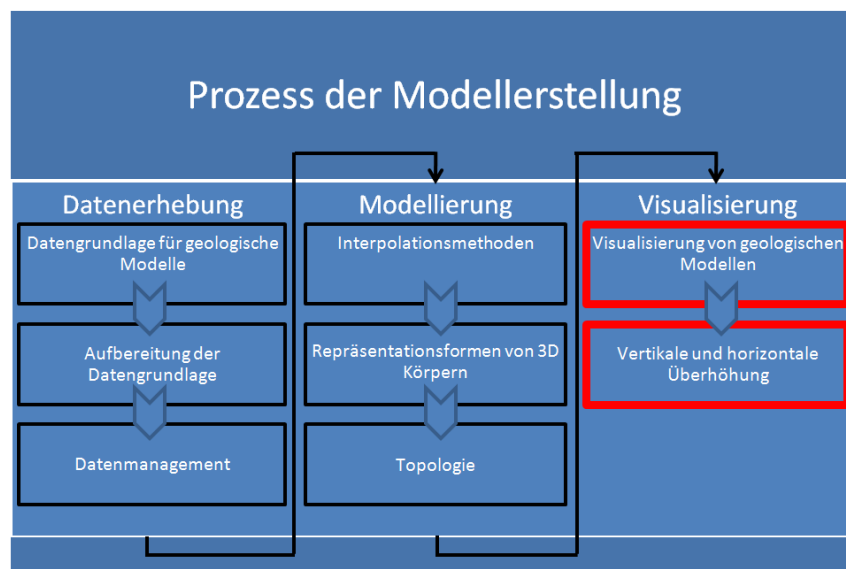


Abbildung 46: Modellerstellungsprozess - Visualisierung (eigene Quelle)

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das visualisierte Modell meist als Mittel zur Entscheidungsfindung herangezogen wird und somit als Decision Support System (DSS) fungiert. Die Gefahr bei einigen Modellerstellungsprozessen ist laut GAU [GAU-10, Seite 104] jedoch, dass besonderes Hauptaugenmerk auf die Visualisierung des Modells und nicht auf die Erstellung und Berechnung des Modells gelegt wird. Es könnte dabei die Gefahr bestehen, dass das Modell nur nach dem äußeren Erscheinungsbild beurteilt wird und nicht mehr nach den Methoden, mit denen es zustande gekommen ist.

Auf den nun nachfolgenden Seiten wird auf die Visualisierung, speziell auf den Bereich der Verbreitung dieser, eingegangen. In weiterer Folge soll noch die Wichtigkeit der Manipulation von Modellen besprochen werden. Hierbei ist die Überhöhung und dessen Auswirkungen auf geologische Strukturen, besonders zu beachten.

5.1 Visualisierungsmethoden für dreidimensionale geologische Modelle

Es gibt sehr viele Möglichkeiten dreidimensionale Modelle zu veröffentlichen. Beispielsweise ist es denkbar, erstellte, dreidimensionale Modelle via Web-Browser über das Internet zu veröffentlichen und dem Nutzer dabei weit mehr Funktionen zur Verfügung zu stellen, als es Internetseiten normalerweise tun. Diese Programme werden laut VON REUMONT [VON-10, Seite 44-76] als Rich Internet Application (RIA) bezeichnet. Eine andere Form der Darstellung ist die Einbindung dreidimensionaler Modelle in ein Portable Document Format (PDF). Dabei ist es jedoch notwendig, spezielle 3D – Format Universal 3D (U3D) zu nutzen, dass es erlaubt, sogenannte 3DPDFs zu erzeugen und einen dreidimensionalen Inhalt mit Hilfe des Programmes Acrobat Reader der Firma Adobe zu verbreiten. Eine weitere Methode zur Weitergabe von dreidimensionalen Modellen ist die Visualisierung mittels sogenannter Geo-Browser, die mittlerweile von einem Großteil der Internetuser genutzt werden.

Auch eigens entwickelte Programme zur Erstellung geologischer Modelle bieten die Möglichkeit der Weitergabe der Visualisierungen mit Hilfe zusätzlicher,

kostenloser, softwarespezifischer Viewer–Applikationen, die die im Hauptprogramm erstellten Dateien einwandfrei darstellen können. Die nächsten Seiten sollen einen kurzen Überblick auf diese verschiedenen Möglichkeiten der Visualisierung und Weitergabe von geologischen Modellen geben. Diese Auswahl an Methoden ist als subjektiv zu beurteilen und darf nicht als vollständig angesehen werden.

5.1.1 Rich Internet Applications

Rich Internet Applications (RIAs) werden laut DEITEL [DEI-08, Seite 32-34] als Webanwendungen bezeichnet, die die Reaktionsfähigkeiten bieten, die es erlauben „reiche“ Features und Funktionen bereitzustellen, sodass sie mit Desktop-Anwendungen vergleichbar werden. Frühere Internetanwendungen unterstützten lediglich eine einfache HTML (Hypertext Markup Language) – graphische Benutzeroberfläche und, obwohl sie einfache Funktionen bereitstellten, boten sie nicht das Gefühl und Aussehen einer gewöhnlichen Desktopanwendung. RIAs sind das Ergebnis der rasant fortschreitenden Technologie, die eine erweiterte und verbesserte Bedienbarkeit erlauben.

Einige Beispiele für RIA-Technologien sind laut DEITEL [DIE-08, Seite 32-34]:

Flex

Adobe Flex ist ein RIA-Framework, das die Bereitstellung von skalierbaren, plattformunabhängigen, multimediareichen Anwendungen erlaubt, die über das Internet übermittelt werden können. Flex nutzt die Flash Player 9 Laufzeitumgebung, welche auf über 97 Prozent der Computer installiert ist. Dies erlaubt eine nahezu universale Kompatibilität von Flex-RIAs. Durch das asynchrone Programmierungsmodell der objektorientierten Skriptsprache ist eine partielle Seitenaktualisierung möglich, das heißt, dass Seiten nach einer Anfrage nicht komplett neu geladen werden müssen.

JavaFX

Sun Microsystems JavaFX ist das Gegenstück zu Flex und Microsofts Silverlight (wir hier nicht näher besprochen). Es wurde ebenfalls zur Erstellung von Rich Internet Applications entwickelt und besteht aus dem JavaFX Skript und dem JAVAFX Mobile, dass für mobile Endgeräte genutzt wird. Das JavaFX Skript hat ebenfalls den Vorteil, dass Java auf den meisten Computern installiert ist.

Dojo

Dojo ist ein Open Source JavaScript Toolkit. Es ist als eine Bibliothek zu bezeichnen und wird nicht als sogenanntes Framework bezeichnet. Die Entwicklung von Dojo begann im Jahr 2004. Dojo hilft bei der Vereinheitlichung von JavaScript durch die Bereitstellung einer Vielzahl von Paketen für browserübergreifende Kompatibilität, vielfältige GUI Bedienelemente und ereignisbasierende Bedienbarkeit.

5.1.2 Geo-Browser

Geo – Browser erfreuen sich in den letzten Jahren großen Zuspruchs. Speziell virtuelle Globen, wie Google Earth oder NASA World Wind, erlauben es, raumbezogene Sachverhalte auf sehr effektvolle Art und Weise zu visualisieren.

Laut BAILEY und CHEN [BAI-11, Seite 1] ist ein Grund für den Erfolg von Google Earth, dass nicht nur ein Modell der Erde mittels Satelliten – und Geländedaten bereitgestellt wird, sondern es dem Nutzer ermöglicht wird, mittels Keyhole Markup Language (KML) durch eigene raumbezogene Daten zu navigieren, sie zu visualisieren und zu verorten. 2008 wurde KML ein Open Geospatial Consortium (OGC) – Standard.

Im Bereich der Subsurface – Visualisierung gab es allerdings das Problem, dass Dinge die unter der Erdoberfläche liegen, nur bedingt oder gar nicht mittels Geo – Browsern und virtuellen Globen visualisiert werden konnten. DE PAOR und WHITMEYER [DEP-11] nahmen sich diesem Problem an, und ermöglichten Subsurface – Visualisierungen mit Hilfe des Google Earth Application Programm Interface (API) mit multiplen Javascript – Steuerungen. Sie schreiben dieser Methodik großes Potential in einem weiten Bereich der geologischen und geophysikalischen Kartierung hinsichtlich geowissenschaftlichen Entwicklung und Bildung zu.

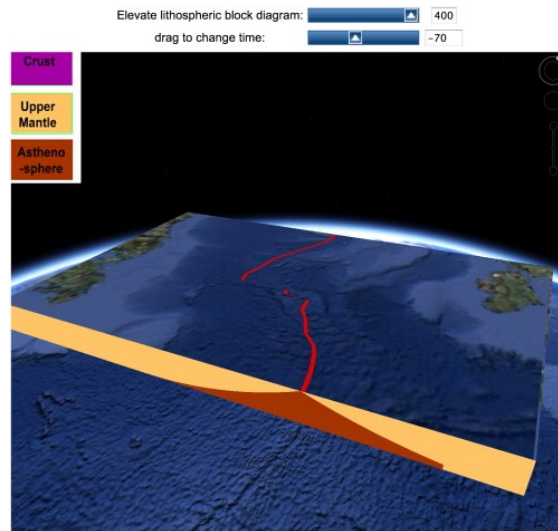


Abbildung 47: Subsurface - Datenvisualisierung mittels Google Earth [Quelle: DEP-10, Seite 109]

5.1.3 Universal 3D

Universal 3D (U3D) ist laut VON REUMONT [VON-10, Seite 61] ein offenes und erweiterbares 3D-Format, das es ermöglicht 3D-Daten in einem PDF – Dokument einzubinden und im Acrobat Reader anzuzeigen. Das U3D Format wurde für Visualisierungsanwendungen von CAD – Daten entwickelt, damit sie in einem nichttechnischen Bereich präsentiert werden können. Obwohl anfänglich der Fokus auf CAD Daten gelegt wurde, kann das U3D Format als ein universelles Format bezeichnet werden. Es ist ein offener und erweiterbarer Standard und ist für jeden zugänglich im Internet. Die Spezifikationen für das U3D Format sind relativ neu und wurden 2003 vom 3D Industry Forum eingerichtet und stehen seit 2004 unter der Obhut des Eema International (European association for standardizing information and communication systems). Die aktuellste Version stammt aus dem Jahr 2007. Der Vorteil von U3D liegt in der Tatsache, dass 3D Informationen in gewöhnliche PDF – Dateien eingebettet werden können und mittels der Freeware Adobe Reader angezeigt werden kann. U3D wurde jedoch nicht für breit angelegte Multimedia – Anwendungsfälle konzipiert, sondern konzentriert sich lediglich auf die Produktvisualisierung. 3D Informationen sollen einer breiten Öffentlichkeit auf Laptop, PCs oder mobilen Endgeräten sowie auf

Servern zugänglich gemacht werden. Daten sollen via Webbrowser mit gratis Plug – Ins angezeigt werden und überall und jederzeit abrufbar sein. Ziel ist es, dass U3D Format als einzigen, weltweiten Standard durchzusetzen.

5.1.4 Softwarespezifische Viewer

Einige der Softwareprodukte, die sich mit der 3D – Geologie beschäftigen, bieten ihren Kunden an, die erstellten Modelle mittels eines kostenlosen Viewers frei zugänglich zu machen. Es wird dabei das aus den Berechnungen erstellte Modell als eigenständiges Format in der Software abgespeichert und kann danach im Viewer begutachtet werden. Beispielsweise ist es möglich beim Softwarepaket Rockworks 15 der Firma Rockware erstellte Modelle mit Hilfe des zusätzlichen, kostenlosen Viewer – Werkzeugs Rockplot 15 zu begutachten oder zu drucken. Bei diesem Werkzeug handelt es sich um ein eigenständiges Fenster, das entweder aus dem laufenden Betrieb in Rockworks 15 via Verlinkung geöffnet werden kann oder selbständig ohne das Hauptprogramm gestartet wird. Das GUI ist relativ einfach zu bedienen (Abbildung 48). Man kann in diesem Viewer den Betrachtungswinkel in allen drei Achsen drehen und in das Modell hinein– als auch hinauszoomen. Es ist ebenfalls möglich, eigene Darstellungsgrenzen bei Belastungskörpermodellen einzustellen und Modellkomponenten ein– beziehungsweise auszublenden.

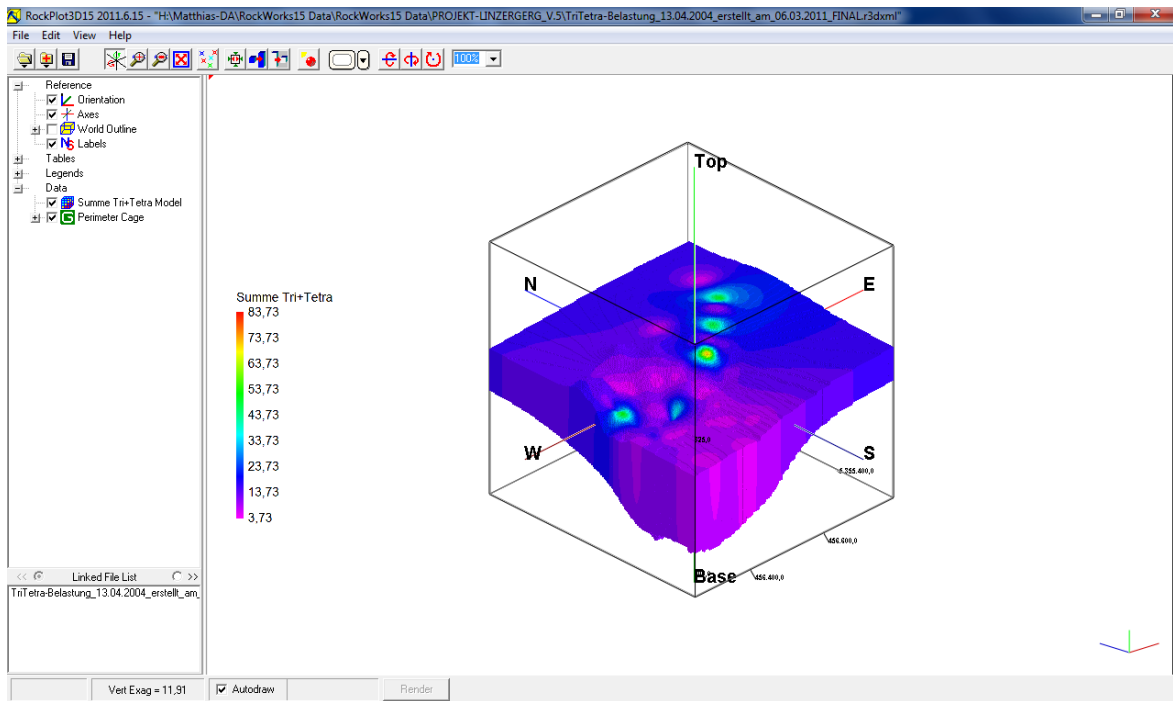


Abbildung 48: Rockplot (Quelle: eigene Darstellung)

Lichteinstellungen, vertikale Überhöhung sowie Farbgebung der Modelle können selbständig gewählt werden. Außerdem ist es möglich, Punkte zu digitalisieren und einen eigenen Betrachtungswinkel zu wählen. Eine weitere Zusatzfunktion im Viewer erlaubt es dem Nutzer, eigene Animationen als Videodatei zu rendern. Das Programm erlaubt es dem Nutzer auch, selbständig verschiedene Modelle zu kombinieren und diese als eigenständige Modellverknüpfung abzuspeichern und weiter zu bearbeiten.

5.2 Vertikale und horizontale Überhöhung

In der 3D Kartographie ist die Maßstabsüberhöhung ein wesentliches Thema um digitale Geländeausschnitte hinsichtlich ihrer Präsentation zu manipulieren. HÄBERLING [HAE-03, Seite 60] beschreibt dabei die Modellproportion (Skalierung) als eine der Gestaltungsvariablen zur Modellierung von Geländeobjekten. Dabei hat seiner Ansicht nach die Möglichkeit der Veränderung der originären Modellproportionen gerade bei Geländeobjekten eine sehr große Bedeutung. Dabei tragen vorallem die willentlichen Manipulationen durch Überhöhung oder Abflachung von Geländeabschnitten in der z - Koordinatenachse sehr viel zur Verdeutlichung der Charakteristika von Formen bei. Eine nicht-proportionale Skalierung der x- bzw. y- Achse ist zwar aus seiner Sicht möglich, ergibt jedoch eher weniger Sinn. Es sollte eher darauf geachtet werden, die realen Ausdehnungsverhältnisse möglichst authentisch wiederzugeben. Weiters erwähnt HÄBERLING [HAE-03, Seite 60-61], dass auch schon Panoramamaler wie BERANN [BER-86], IMHOF [IMH-63] oder HÖLZEL [HOE-63] versucht haben, mit analogen Mitteln durch Überhöhung oder Abflachung von einzelnen Geländepartien und Abdrehung in günstigere Sichtbereiche, gewisse Abschnitte bei ihren Arbeiten zu betonen. Die einzelne Skalierung der x- oder y- Achse hält HÄBERLING für möglich, zerstört jedoch das Seitenverhältnis. Die Skalierung der z-Koordinate kann seiner Meinung nach Höhenunterschiede betonen bzw. abschwächen und kann sinnvoll zur Darstellung von bestimmten Geländecharakteristiken sein.

Durch die Bedeutung der Überhöhung in der 3D Kartographie kann man auf deren Bedeutung in der 3D Geologie schließen. Da es auch in diesem Forschungsbereich darum geht, bestimmte Gelände- bzw. Stratigraphie- Charakteristiken besser darstellen zu können. Hinsichtlich dieses Themas hat sich auch GROSHONG [GRO-06] einige Gedanken gemacht:

Vertikale und horizontale Überhöhung werden nach GROSHONG [GRO-06, Seite 137-141] in der strukturellen Geologie dazu verwendet, um das Visualisieren und Interpretieren zu erleichtern. Vertikale Überhöhung bedeutet eine Veränderung des vertikalen Maßstabs (üblicherweise in dessen Ausdehnung). Ein übliches

Mittel der Darstellung von geologischen Profilen ist die Ausdehnung der vertikalen Überhöhung bei gleichbleibendem horizontalem Maßstab. Diese Art der Visualisierung macht feine Geländeformen und Strukturen wesentlich besser erkennbar und hilft dem Geologen bei der Interpretation. Horizontale Überhöhung hat die Bedeutung einer Veränderung des horizontalen Maßstabs bei gleichbleibendem, konstantem vertikalen Maßstab. Diese Manipulation hilft laut STONE [STO-91, In: GRO-06, Seite 138] bei der Darstellung von seismischen Linien. Reduzierung des horizontalen Maßstabs wiederum (Zusammenstauchen) erzeugt den Effekt, dass weite, nicht sehr mächtige geologische Strukturen besser erkennbar werden. Störungen und Brüche in den Horizonten der geologischen Körper werden mittels Verringerung des horizontalen Maßstabs ebenfalls besser ersichtlich.

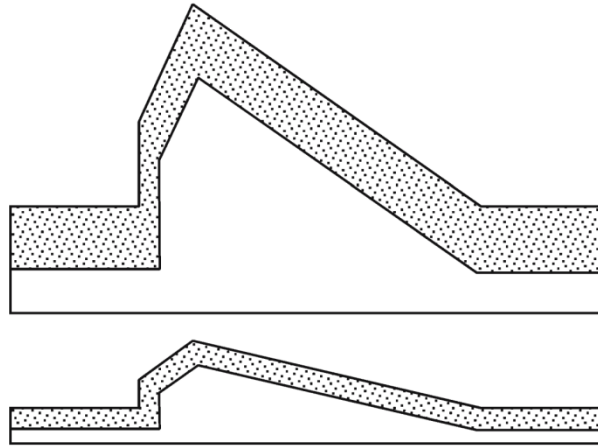
Die vertikale Überhöhung (V_e) entspricht der Länge einer Einheit des vertikalen Maßstabs, dividiert durch die Länge einer Einheit innerhalb der Abbildung. Die horizontale Überhöhung (H_e) ist gleichbedeutend der Länge einer Einheit am horizontalen Maßstab dividiert durch die Länge einer Einheit in der Abbildung.

$$V_e = v_v / v$$
$$H_e = h_h / h$$

Horizontale Überhöhung hat keinerlei Effekt auf die Mächtigkeit einer horizontal – exponierten Schicht, wohingegen vertikale Überhöhung die Mächtigkeit einer horizontal – exponierten Schicht um den Faktor der Überhöhung in dessen Mächtigkeit verändert. Andererseits hat eine horizontale Überhöhung vollen Einfluss auf die Mächtigkeit einer vertikal – exponierten Schicht, wohingegen eine vertikale Überhöhung keinerlei Effekt auf die Mächtigkeit einer vertikal – exponierten Schicht hat. Für geologische Einheiten, die zwischen einem Winkel von größer 0° und kleiner 90° exponiert sind, gilt, dass die horizontale wie auch vertikale Überhöhung eine scheinbare Veränderung der Mächtigkeit der Schichten verursacht. Aus diesem Grund können Überhöhungen oft zu Problemen bei der Interpretation von Querschnittprofilen führen. Manchmal kann es aufgrund von Überhöhungen auch dazu führen, dass Strukturen nicht begreifbar oder gar

missinterpretiert werden können. Insbesondere bei verschiedenen Faktoren in der vertikalen und horizontalen Überhöhung kann es sehr schnell zu solchen Fehlinterpretationen kommen, wie die folgende Abbildung zeigt.

[GRO-06, Seite 138 -140]



**Abbildung 49: oberes Profil: Effekt einer 3:1 vertikalen Überhöhung auf die Mächtigkeit.
Unteres Profil: keine Überhöhung (Quelle: GRO-06, Seite 140)**

Die Überhöhung, in vertikale wie auch horizontale Hinsicht, sollte bei der Interpretation immer bedacht werden. Es ist jedoch durchaus üblich, bei dreidimensionalen geologischen Modellen deren Darstellung mit einer vertikalen Überhöhung zu manipulieren, um die Strukturen besser verstehen zu können.

6 „State of the Art“- Software in der 3D Geologie

Nachdem Visualisierungsmethoden und Visualisierungsmanipulationen auf den vorhergegangenen Seiten besprochen wurde, soll nun auf den folgenden Seiten auf den derzeitigen „State of the Art“ der Softwareapplikationen im wissenschaftlichen Forschungsbereich der 3D Geologie eingegangen und einige ausgewählte Softwarepakete näher beschrieben und erklärt werden.

Es gibt nach dem heutigen Stand des Wissens eine Vielzahl an Softwarepakete, die sich mit dem Bereich der dreidimensionalen geologischen Modellierung beschäftigen. Abgesehen von kommerziellen Programmen gibt es auch einige universitäre Forschungsansätze, die sich mit dem Thema der geologischen Modellierung auseinandersetzen und eigene Softwareapplikationen zur Lösung diverser Probleme erstellt haben. Auch muss man zwischen eigenständigen Softwarelösungen und Plug In – Lösungen unterscheiden. Bei sogenannten Plug In – Programmen werden bestimmte Programme mit Zusatzfunktionen erweitert, damit spezielle Probleme mit Hilfe dieser Plug Ins im eigentlichen Hauptprogramm gelöst werden können. Da es, wie bereits besprochen, sicherlich nicht möglich ist in dieser Arbeit sämtliche aktuelle Softwareanwendungen im Bereich der 3D Geologie anzuführen, werden auf den nächsten Seiten nur einige ausgewählte Programme näher beschrieben.

Die meisten Programme sind laut ELFERS et. al [ELF-04] modular aufgebaut, wobei sich die für Konstruktion und Berechnungen von geologischen 3D Modellen notwendigen Funktionalitäten normalerweise auf mehrere Module verteilen. Ihre Stärke liegt meist in der Erstellung von Lagerstättenmodellen auf Grundlage geophysikalischer Daten.

6.1 Eigenständige Softwarelösungen

Es gibt, wie bereits eingangs erwähnt, sehr viele eigenständige Softwarelösungen für Projekte im Subsurfacedaten – Bereich. Einen sehr guten ersten Einblick in den Schwerpunkt der 3D Geologie bekommt man auf der Seite der Martin-Luther-

Universität in Halle-Wittenburg (<http://www.3d-geology.de/>). Diese Seite beinhaltet auch eine beachtliche Liste mit 3D Geologie Software und kurze Erklärungen zu diesen sowie eine Verlinkung auf die Herstellerseiten der Softwareapplikationen. In dieser Liste sind sowohl kommerzielle Lösungen wie auch Projektprogramme von wissenschaftlichen Arbeitsgruppen vertreten. Die folgende Listung soll keinerlei Rangordnung für die Applikationen darstellen.

6.1.1 GSI3D

GSI3D (Geological Surveying and Investigation in 3 Dimensions) ist laut KESSLER [KES-09] ein wissenschaftliches Konsortium, das vom British Geological Survey (BGS) ins Leben gerufen wurde. Das Werkzeug und die Methodologie wurden über die letzten 15 Jahre entwickelt. Ausschlaggebend für die Entwicklung der Software war jedoch eine Empfehlung einer Studie der NLFb (Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung) von BINOT & RÖHLING [BIN-94].

GSI3D wurde mittels Java entwickelt und arbeitet mit einer graphischen Bedienoberfläche (Graphical User Interface: GUI) aufgeteilt auf vier verschiedene Fenster. Es gibt ein Kartenfenster, ein Fenster für das Anzeigen von Profilen, ein Fenster zur Anzeige von Querschnitten, die mittels Profildaten miteinander verbunden sind, sowie ein weiteres für die Darstellung des 3D Modelles des Untersuchungsgebietes. Diese vier Fenster sind dynamisch, das heißt, Änderungen in der Karte oder in der Anzeige der Querschnitte führen zu einer augenblicklichen Aktualisierung der Betrachtung in den anderen Fenstern.

- [KES-09]

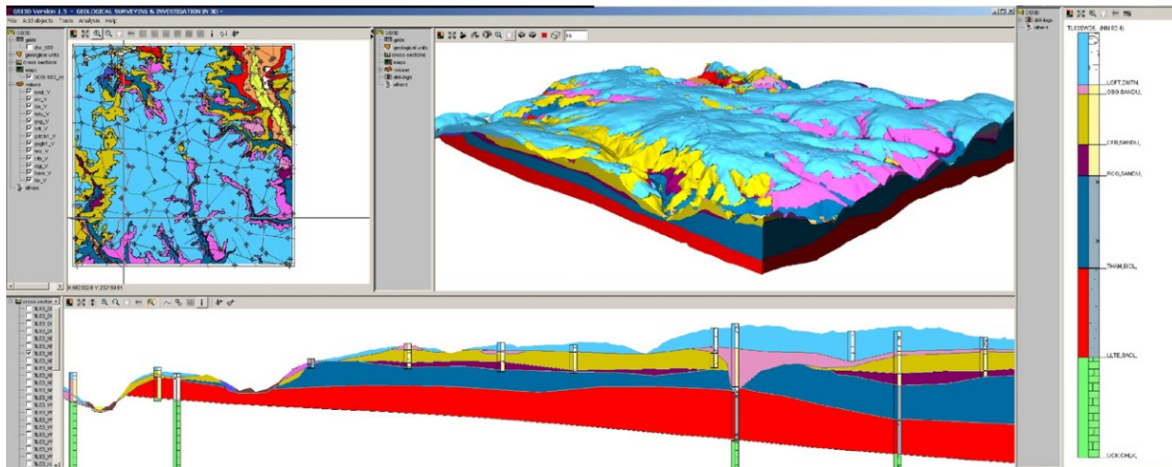


Abbildung 50: Graphische Bedienoberfläche von GSI3D [KES-09, Seite 4]

Der Prozess der geologischen Einheiten und deren aufeinanderfolgende Anordnung kann laut KESSLER [KES-09] zurzeit nicht adäquat von Computerprogrammen simuliert und berechnet werden. Das heißt, dass vor der Modellierung des geologischen Körpers in GSI3D Vorarbeiten notwendig sind. Geologische Grenzen müssen daher von erfahrenen Geologen im Vorhinein eruiert werden, insbesondere dort wo die Datenqualität nicht sehr gut ist. Zuerst wird im Zuge der Modellierung den Geologen ein Werkzeug zur Erstellung von Querschnitten vom GSI3D Programm zur Verfügung gestellt, danach werden mittels dieser Daten geologische Einheiten abgegrenzt. Nach dieser Vorarbeit wird ein 3D Modell der geologischen Körper mittels Triangulation erzeugt. Dieses Modell beruht auf den Abfolgen der zur Modellierung genutzten Querschnitte und kann daher ein sogenanntes FENCE – Diagramm bilden, das Geologen traditionellerweise favorisieren um komplexe Strukturen anzuzeigen.

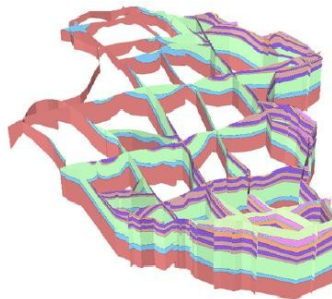


Abbildung 51: FENCE - Diagramm in GSI3D [Quelle:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/1/15/Faulted_gsi3d_model.JPG**]**

Es ist laut NEBER [NEB-06] möglich, das Projekt mit Informationen über geologische Einheiten und Grundwasserdaten mittels GRID und TIN Formaten, wie beispielsweise ASCII, Surfer oder GOCAD Dateien zu erweitern. Es ist auch möglich, digitale Informationen innerhalb des Programmes zu geokodieren und in den Berechnungsprozess einzugliedern.

GSI3D wird laut WYCSIK [WYC-09] zurzeit für das Modellieren von oberflächennahen Sedimentstrukturen verwendet. Für Untersuchungsgebiete mit höherer Untersuchungstiefe wird die Software mit anderen Applikationen, wie beispielsweise GoCAD, kombiniert.

6.1.2 3D GeoModeller

3D Geomodeller ist eine laut MING [MIN-10] 3D geologische Modellierungssoftware, die von BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) entwickelt und durch Intrepid Geophysics kommerzialisiert wurde. Modelle werden in dieser Software direkt aus den geologischen Beobachtungsdaten und der vordefinierten geologischen Schichtung berechnet. Beziehungen zwischen geologischen Körpern und deren Schichtung erlauben eine automatische Berechnung von Überschneidungsbereichen und Volumenkonstruktionen der einzelnen Körper. Durch diesen automatisierten Prozess ist eine schnelle Rekonstruktion möglich, wenn gegebenenfalls geologische Interpretationen modifiziert werden müssen. Auch ist es möglich, die Berechnungen der Körper zu aktualisieren, falls geologische Interpretationen modifiziert werden sollen.

Eine Mitgliedschaft im 3D GeoModeller Konsortium beläuft sich auf 39.000 Australische Dollar (ca. 29.300 Euro). [3DG-11, letzter Zugriff: 25.10.2011]

6.1.3 GoCAD

GoCAD ist ein Akronym und steht laut BONOMI [BON-09, Seite 136] für „Geologic Object Computer-Aided Design“. Es ist eine integrierte 3D Objektmodellierungs – und Visualisierungsapplikation. Der Interpolationsalgorithmus der Software beruht

auf dem Triangulierungskonzept und soll dabei helfen, die passendste Lösung zu berechnen.

Das GoCAD Konsortium wurde 1989 gegründet, um das GoCAD – Projekt finanziell zu unterstützen und die Forschungsaktivitäten zu kontrollieren. Diese Gründung half, um nicht nur akademische Problemstellungen zu lösen, sondern sich auch mit Problemen in der Industrie auseinanderzusetzen. Die jährliche Gebühr für Universitäten und Non-Profit – Unternehmen beträgt für eine Lizenz 1500 Euro. Für Firmen unter 30 Mitarbeiter beträgt der jährliche Mitgliedsbeitrag für das Konsortium 5.000 Euro, für Unternehmen über 30 Mitarbeiter 21.000 Euro. Zusätzlich ist für Unternehmen noch eine einmalige Zahlung von 5.000 Euro im ersten Jahr zu leisten. [GOC-11]

Laut MING [MIN-10, Seite 2] verwendet GoCAD eine oberflächenbasierende Modellierung, die eine nicht unerhebliche Menge an Interaktion mit dem Nutzer verlangt. In GoCAD können auch Querschnittprofile als Datenquellen genutzt werden, jedoch können keine topologischen Informationen mit eingelesen werden, wenn die Informationen als Kurven in GoCAD importiert werden. GoCAD ist jedoch in der Lage ansprechende 3D – Modelle mit komplexer Geologie zu erstellen.

Auch laut ELFER et. al [ELF-04, Seite 12] ist GoCAD ursprünglich für die geologische Strukturmodellierung entwickelt worden.

6.1.4 Rockworks 15

Rockworks 15 ist ein ganzheitliches Softwarepaket für das Management geologischer Daten und deren Analysen sowie Visualisierungen. Rockworks ist unter anderen in der Lage strukturelle, geologische Modelle aus geologischen Daten zu erzeugen und dreidimensional zu visualisieren. Die Software ist in zwei unterschiedliche Arbeitsbereiche unterteilt. Der „Borehole Data Manager“ wird zu einfachen Eingabe von Bohrdaten genutzt. Es ist denkbar, mit Hilfe des „Borehole Datas Managers“ geophysikalische, geotechnische oder geochemische Messwerte einzugeben. Im Weiteren ist auch die Eingabe von stratigraphischen

und Grundwasserspiegel – Daten möglich. Aus diesen Daten können dann wiederum verschiedenste Modelle berechnet und visualisiert werden. Der „Rockworks Utilities“ Arbeitsbereich wird unter anderem für volumetrische, hydrologische und hydrochemische Berechnungen verwendet und kann auch für statistische Auswertungen sowie für Koordinatentransformationen genutzt werden. Dritter und nicht unerheblicher Bestandteil der Software sind die Visualisierungsfenster für Rockworks 15. Rockplot2D beziehungsweise Rockplot3D zeigen zwei – bzw. dreidimensionale Modelle an. Rockplot3D nutzt dabei OpenGL für die einfache Visualisierung von dreidimensionalen Modellen. Die Visualisierungssoftware bietet dabei unter anderem die Möglichkeit, die Modelle interaktiv zu rotieren, zu schwenken und hinein– bzw. hinaus zu zoomen. Mit einem Einzellizenzpreis von 3000 US Dollar ist es im Vergleich zu anderen Softwarepakete um ein Vielfaches günstiger.

[ROC-11a, letzter Zugriff: 25.10.2011]

6.2 Plug-Ins

Plug-In-Programme haben im Unterschied zu eigenständigen Softwareapplikationen den Vorteil, dass diese Programme in eventuell bereits bestehende Programme integriert werden können. Oftmals ist es auch der Fall, dass Plug – Ins wesentlich billiger in der Anschaffung sind als ganzheitliche Softwarepakete.

Eine sehr treffende Definition für ein Plug-In ist der folgende Satz:

Zusatzprogramm, welches über eine vordefinierte Schnittstelle in ein Basisprogramm eingebunden wird und dessen Funktionsumfang erweitert.

[GAB-11]

Laut McCARTHY [MCC-06, Seite 2] ist es für kleinere Firmen nicht sinnvoll Softwarepakete und Datenbanksysteme, die für den großmaßstäbigen Markt gedacht sind, zu nutzen. Es ist eher denkbar für kleinere Unternehmen die Funktionalität von kommerziellen GIS – Softwarepakete zu nutzen, und diese mit speziellen Werkzeugen zu erweitern, die für den Umgang mit dem „Subsurface“ – Datenbereich geschaffen wurden.

6.2.1 BorelS

Eine dieser Erweiterungsmöglichkeiten für die Funktionalität von GIS – Softwarepaketen ist laut McCARTHY [MCC-06, Seite 2] das Borehole Information System (BorelS). Dieses Werkzeug unterstützt die Software ArcScene, Teil des ArcGIS Softwarepakets, der Firma ESRI bei Management, Visualisierung, Abfragen und Analysen von Bohrdaten. Falls es bereits Erfahrungen mit dem Umgang mit GIS – Software gibt, ist die Handhabung von BorelS relativ einfach. BorelS stellt einige Funktionalitäten zur Bearbeitung von Bohrdaten zur Verfügung, die auch spezialisierte Softwarepakete enthalten. Rohdaten können mittels EXCEL – Daten in das Programm integriert werden. Die Nutzung des BorelS Plug – Ins kann man in drei Phasen unterteilen. Die erste Phase beschreibt den Import der Daten in das Programm. Die darauf folgende zweite

Phase beschäftigt sich mit der Erstellung einer räumlichen Darstellung der eingegebenen Informationen im dreidimensionalen Raum. Die dritte und offene Phase beschäftigt sich mit der Abfragen, der Visualisierung und Analyse der erstellten Modelle.

PRAKTISCHE UMSETZUNG TEIL II

7 Praktische Umsetzung der Arbeiten anhand des Beispiels „Gallneukirchen“ (OÖ)

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Beschreibung der praktischen Umsetzung des Diplomarbeitsthemas. Mit der anfänglich beschriebenen Ausgangssituation beginnend, befasst sich der praktische Teil weiter mit den Themen der Datengrundlage, Softwareentscheidung, Datenintegration, Modellierung bis hin zur Visualisierung und den aufgetauchten Problemen bei der Umsetzung des Projektes. Die im theoretischen Teil der Diplomarbeit erarbeiteten Grundlagen sollen für die praktische Umsetzung der Diplomarbeit herangezogen werden.

7.1 Ausgangspunkt – Belastungssituation

Als Ausgangspunkt des Diplomarbeitsprojektes ist eine Anfrage der Firma BLP GeoServices aus Linz an Herrn Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl zu bezeichnen. Die für die Erstellung der Diplomarbeit verantwortliche Belastungssituation kann kurz in den folgenden Abschnitt beschrieben werden:

In Gallneukirchen, Oberösterreich, wurde im Jahr 2001 Grundwasserverunreinigungen mit Tri- und Tetrachlorethen (in weiterer Folge als Summe TriTetra bezeichnet), aromatischen Kohlenwasserstoffen Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTXE), Mineralölkohlenwasserstoffen und Methyl-Tert-Butylether (MTBE) festgestellt.

Im Zuge der Projektbearbeitung der Firma BLP – Geoservices zeigte sich, dass die Untersuchungen nicht nur auf drei potentielle Belastungsstandorte beschränkt werden können, sondern ein Untersuchungsraum von ca. 300.000 m² gemeinsam zu betrachten ist. Es zeigte sich, dass das geologische und hydrogeologische Regime nicht ausreichend bekannt ist, um Verursacher, Schadstoffeintrag und Schadstoffausbreitung eindeutig zu beschreiben.

Um die räumliche Variabilität des Untergrundes besser zu erfassen, wurde daher geplant aus Bohrsondierungsinformationen ein dreidimensionales geologisches Basismodell zu erstellen.

Die in dem theoretischen Teil der Arbeit erstellte Grundlage für die Erstellung soll nun für die praktische Umsetzung der Diplomarbeit herangezogen werden und als Basis dienen.

7.2 Datengrundlage

Die Datengrundlage für die praktische Umsetzung dieses Projektes wurde von der Firma BLP GeoServices aus Linz zur Verfügung gestellt. Die Rohdaten stellten sich folgendermaßen zusammen:

- Stratigraphisch interpretierte Bohrsondierungen (Excel – Dateien)
- Koordinaten der Bohrsondierungen (Excel Dateien)
- Grundwasserspiegeldaten der Grundwassermessstellen (Excel Daten)
- Belastungsdaten des Grundwassers (Excel – Dateien)
- Rohes Geländemodell (Laserscanningaufnahme des Untersuchungsgebietes mit einer Auflösung von einem Meter, ASCII – Datei)

Weitere Daten, die nicht von der Firma BLP Geoservices zur Verfügung gestellt wurden, mussten mittels Eigeninitiative akquiriert werden. Dazu gehört eine Luftbildaufnahme, die mittels der Begrenzungskordinaten des Untersuchungsgebietes aus Google Maps exportiert werden konnte.

Die Bohrsondierungen selbst wurden in mehreren Bohrdurchgängen erhoben. Dabei gibt es verschiedene Arten der Bohrsondierungen. Im Untersuchungsprogramm finden sich verschiedene Bezeichnungen für die Datengrundlagen. Die folgende Tabelle beschreibt deren grundsätzliche Unterscheidung und erläutert die Anzahl der daraus resultierenden Datensätze.

Messstellenbezeichnung	Bedeutung	Anzahl der Datensätze
BH	Bohrsondierungsdurchgang 1	28
Z	Bohrsondierungsdurchgang 2	26
DP	Bohrsondierungsdurchgang 3	59
GW	Grundwassermessstellen	5
SB	Sperrbrunnen	2
Vorfeldsonde 1	Vorfeldsonden	2

Tabelle 2: Messstellenbezeichnungen (eigene Quelle)

7.2.1 Eigenschaften der Datengrundlagen

Stratigraphisch interpretierte Bohrsondierungen

Die Interpretationen der Bohrsondierungen wurden, wie bereits oben besprochen, als Excel – Dateien geliefert. Diese Daten wurden im Vorhinein von der Firma BLP Geoservices in fünf stratigraphische Schichten unterteilt und damit in eine generelle stratigraphische Abfolge gebracht. Hierbei handelt es sich, wie in Kapitel 3.1 besprochen, um eine Subjektive Generalisierung der erhobenen Daten. Das bedeutet, dass versucht wurde, die Daten dementsprechend aufzubereiten, sodass es möglich wird, ein vereinfachtes geologisches Modell der Realität zu erstellen. Bei dieser Generalisierung wurde in fünf geologische Schichten unterteilt:

- **Auffüllung/Mutterboden/Sand**
- **Schluff/Lehm**
- **Blockwerk/Kies**
- **Linzer-Sande**
- **Tegel**

Die unterste stratigraphische Schicht des Tegels wurde als sogenannter „Stauer“ definiert. Diese Schicht hat die Eigenschaft, die in weiterer Folge sehr wichtig für die Modellierung ist, dass es eine wasserundurchlässige Schicht ist und daher den Grundwasserkörper nach unten hin begrenzt und damit auch die Belastungssituation beeinflusst. Die Unterteilung zwischen diesen Schichten

wurde mittels relativer Tiefenangabe in Metern vom Ansatzpunkt der Bohrung auf der Erdoberfläche angegeben. Die Bohrsondierungen haben jeweils unterschiedliche Endteufen und variieren sehr stark. Die minimale Endteufe des Datensatzes liegt bei 2m (BH-BL2), die maximale Endteufe bei 33,5m (BH-J).

Beispiel der stratigraphisch interpretierten Bohrsondierung „BH-F“:

Bore	Depth1	Depth2	Stratigraphy
BH-F	0,00	0,70	Auffüllung/Mutterboden/Sand
BH-F	0,70	3,50	Schluff/Lehm
BH-F	3,50	5,70	Blockwerk/Kies
BH-F	5,70	19,80	Linzer-Sande
BH-F	19,80	20,00	Tegel

Tabelle 3: Abfolge der Stratigraphie einer Bohrsondierung (eigene Quelle)

Koordinaten der Bohrsondierungen

Die Koordinaten der Bohrsondierungen wurden in Excel – Dateien übermittelt. Die Projektion der Koordinaten entsprach der des Militärgeographischen Instituts mit dem Zentralmeridian 31° nach Ferro. Die Koordinaten wurden im Zentimeterbereich eingemessen und erfüllten somit die Ansprüche eines sehr großmaßstäbigen Untersuchungsgebietes.

Grundwasserspiegeldaten

Die Grundwasserspiegeldaten wurden ebenfalls in Form von Excel – Dateien geliefert. Der Grundwasserspiegelstand wurde jeweils mit einem Vermerk des Aufnahmedatums versehen. Mithilfe dieser periodisch gemessenen Daten konnte ein durchschnittlicher Grundwasserstand pro Messstelle definiert werden. Diese Berechnung des Mittelwertes war deshalb notwendig, da die Grundwasserstände in einigen Pegeln relativ stark schwankten, es jedoch nicht notwendig war für jeden Grundwasserstand ein eigenes Grundwassermodell zu berechnen.

Belastungsdaten des Grundwassers

Die Belastungsdaten des Grundwassers lagen ebenso als Excel – Dateien vor. Es wurden im Zuge der Untersuchung seit März 2004 Analytik - Daten gesammelt. Dabei wurden die Wasserproben, die im Zuge einer Beweissicherungskampagne

regelmäßig erhoben wurden, jeweils immer auf die gleichen Stoffe untersucht. Dabei gab es bei den nachzuweisenden Stoffen drei wichtige Parameter. Einer dieser Parameter war die Bestimmungsgrenze, die angibt ab welchem Wert in der Probe ein bestimmter Stoff nachgewiesen werden kann. Ein weiterer Parameter ist der Prüfwert, der aussagt, dass weitere Untersuchungen zur Abklärung von Sachverhalten notwendig sind. Der letzte Parameter ist der Maßnahmenschwellenwert, der wiederum angibt, ab welcher Belastung die Probe als stark belastet bezeichnet werden kann.

Das UMWELTBUNDESAMT [UMW-96, Seite 3] definiert die Begriffe Prüfwerte und Maßnahmenschwellenwerte folgendermaßen:

- **Prüfwerte:** Vorgegebene Werte, bei deren Überschreitung weitere Erhebungen und Untersuchungen zur Sachverhaltsklärung notwendig sind. Bei der Unterschreitung ist in der Regel keine Gefährdung gegeben.
- **Maßnahmenschwellenwert:** Vorgegebene Werte, bei deren Überschreitung in der Regel Sicherungs – bzw. Sanierungsmaßnahmen notwendig sind.

In weiterer Folge wurde jeweils der Maßnahmenschwellenwert für die Modellierung der Belastungskörper innerhalb des Grundwasserkörpers herangezogen. Jedoch konnten nicht alle gemessenen Belastungsdaten für die spätere Modellierung herangenommen werden, da nur die als Direct Push – Sondierungen (näher erläutert in Kapitel 2.1.3) ausgeführten Bohrungen gute Differenzierungen innerhalb der Messtiefen und somit für die Modellierung zuließen.

Geländemodell

Das Geländemodell wurde als ASCII – Datei zur Verfügung gestellt. Es war das Ergebnis einer Laserscann–Aufnahme des Untersuchungsgebietes. Die Auflösung des Geländemodells war, entsprechend des relativ kleinen Investigationsraumes, sehr hoch und entsprach einem Meter. Die dabei aufgenommen Höhenwerte wurden im Zentimeterbereich erhoben. Die folgende Abbildung zeigt das in dem Editor „Notepad+“ geöffnete Geländemodell.

Normal text file nb char: 9759110 nb line: 70128 Ln: 1 Col: 1 Sel: 0 Dos/Windows ANSI INS

Abbildung 52: Geländemodell des Untersuchungsgebietes (eigene Quelle)

7.3 Entscheidung für Rockworks 15

Die Entscheidung für Rockworks wurde aufgrund der Ausschreibung der Diplomarbeit schon im Vorhinein der Arbeit getroffen. Es war im Hinblick auf die kommerziellen Lösungen einer der günstigsten Varianten das Projekt umzusetzen. Viele der Lizenzen für andere Softwarepakete kosteten im Vergleich zum Paket der Firma Rockware ein Vielfaches. Der aktuelle Einzellizenzpreis für Rockworks 15 liegt bei 3000 US Dollar (Stand: 10. Oktober 2011).

Es besteht, wie auch schon in Kapitel 6.1.4 besprochen, aus zwei Arbeitsbereichen und einem Viewer zur Visualisierung der berechneten Modelle. Dieser kostenlose Viewer kann ohne Probleme von der Webseite (<http://www.rockware.com/>) des Herstellers heruntergeladen werden und auf einem Rechner installiert werden. Aus diesen Gründen fiel auch die Wahl der endgültigen Visualisierung der Modellierungsergebnisse die Entscheidung zugunsten des softwarespezifischen Viewers Rockplot3D aus. Es war die einfachste und unkomplizierteste Möglichkeit die Ergebnisse Auftraggebern relativ

man in diesem Datensatz einstellen, ob die Bohrsondierungen für Berechnungen freigegeben oder gesperrt werden sollten. Dies lässt sich jedoch im Programm selbst ebenfalls einstellen.

- **Aquifer:** Diese Datensätze brachten Aufschluss über die jeweilig gemessenen Grundwasserstände einzelner Bohrsondierungen. Außerdem enthielt er Informationen über das Datum der Messung und den Grundwassertypus.
- **Stratigraphy:** In diesem Registerblatt wurden die stratigraphischen Abfolgen der einzelnen Sondierungen eingetragen. Jeder Schicht wurde dabei mit ihrer topologischen Ober – beziehungsweise Untergrenze in die Datenbank eingetragen.
- **TmInterval:** In dieses Registerblatt wurden die Belastungsdaten der Messungen eingetragen. Es war zusätzlich mit Informationen zum Belastungstypus, der Tiefe der gemessenen Belastung sowie dem Datum der Messung angereichert. Diese Datei umfasste den größten Teil der Datenbank mit insgesamt 6171 Datensätzen, wobei nur ausgesuchte Datensätze, wie in den Eigenschaften der Datengrundlage besprochen, für die spätere Modellierung herangezogen wurden.
- **TmInterval Type:** Hier wurden die verschiedenen gemessenen Belastungsstoffe eingetragen. Es waren insgesamt 14 gemessene Einzel- oder Summenparameter, wobei lediglich für die Modellierung vier Belastungsparameter zum Einsatz kamen. Diese vier Belastungsparameter waren das Summenparameter BTEX sowie dessen Einzelparameter Benzol, MTBE und die Summe aus Trichlorethen – und Tetrachlorethenmessungen.
- **Strat Type:** Hier wurden die fünf stratigraphischen Schichten für die Modellierung definiert. Es war auch möglich den Schichten Farben für die spätere Visualisierung zuzuweisen. In Absprache mit der Firma BLP – wurden den stratigraphischen Schichten folgende Farbtöne zugewiesen:

- Auffüllung/Mutterboden/Sand



- Schluff/Lehm
- Blockwerk/Kies
- Linzer-Sande
- Tegel



-

- **Aquifer Type:** In diesem Registerblatt konnte verschiedene Grundwassertypen definiert werden. Im Projekt war lediglich ein Grundwassertypus zu definieren, da alle Grundwasserwerte im Vorhinein für jede Messstelle gemittelt wurden. Es war ebenfalls möglich, für das Grundwasser einen Farbton zu bestimmen:

- Aquifer



- **Dimensions:** In diesem Datenabschnitt wurde die Ausdehnung und Auflösung des Untersuchungsgebietes definiert. Jedoch mussten im Vorhinein, wie auch bei den Koordinaten der Bohrsondierungen, die verorteten Passpunkte des Untersuchungsgebiete in das UTM (Universal Transverse Mercator) – Koordinatensystem umprojiziert werden, da in Rockworks 15 lediglich die Darstellung von raumbezogenen Daten mittels der UTM – Projektion möglich ist. Diese Koordinatentransformation wurde mit Hilfe der Probeversion der Software TRANSDAT Coordinate Transformation ermöglicht. Die Größe des Untersuchungsgebietes entsprach 540 Meter in der Breite, 560 Meter in der Länge und 47 m in der Tiefe. Die Auflösung, die auch eine große Bedeutung für die Modellierung darstellt, wurde nach Rücksprache mit der Firma BLP Geoservices in der X – und Y – Achse mit einem Meter und in der Z – Achse mit 0,2 Metern gewählt. Dies sollte eine besseres Ergebnis hinsichtlich der Modellierung in der Z – Achse ermöglichen.

Das Geländemodell musste ebenfalls vor dem Import in das Programm mit Hilfe von Koordinatentransformation bearbeitet werden. Nach dieser Bearbeitung konnte es erfolgreich in Rockworks 15 dargestellt werden.

7.5 Stratigraphische Modellierung (Fence, Striplogs, Solid)

Nach der erfolgreichen Integration des gesamten Datenbestands in die Datenbank war es nun möglich, das geologische Basismodell mit der stratigraphischen Schichtung zu erstellen. Aus topologischen Gründen wurde bei der Erstellung des geologischen Modells darauf geachtet, dass das zu erstellende Modell auf das Geländemodell basiert. Das bedeutet, dass die Erdoberfläche des Modells nicht nur aus den Höhendaten der Bohrsondierungen berechnet wird, sondern auf der Grundlage des Geländemodells, was eine wesentlich genauere Darstellung zur Folge hat. Weitere Einstellungen können in Bezug auf die „Berechnungsrichtung“ des Modells gemacht werden, die standardmäßig von oben nach unten definiert ist. Außerdem ist es möglich, eine sogenannte „Baseplate“ zu erstellen, die die Modellierung nicht bei der untersten Schicht stoppt, sondern das Modell mit einer ebenen Fläche nach unten hin abschließt. Einige Optionen, die speziell die Visualisierung des Modells betrifft, können in den Diagrammoptionen getroffen werden, wie beispielsweise die Möglichkeit zwischen den modellierten Schichten einen „Buffer“ zu erzeugen. Auch ist es möglich, bei modellierten Schichten mit relativ geringer Mächtigkeit eine Untergrenze zu definieren, unter der die modellierte Schicht nicht mehr dargestellt wird. Weitere Optionen betreffen die Darstellung der Bohrsondierungsachsen und der Darstellung von Legenden und Koordinatenachsen.

Im Vorhinein der Modellierung muss die Datengrundlage auf eventuelle Fehler untersucht werden. Dies können beispielsweise Fehler in der Unterteilung der Schichtgrenzen oder Tippfehler sein. Es ist daher unumgänglich, im Vorhinein der Modellierung die Datengrundlage erneut nochmals einer Überprüfung zu unterziehen.

7.5.1 Modellierungsprozess des stratigraphischen Modells

Nach der Implementierung der Datengrundlage und der Überprüfung dieser kann mit dem Prozess der Modellierung gestartet werden. Der Modellierungsprozess beschreibt den Interpolationsalgorithmus und die zu treffenden Einstellungen vor der Interpolation. Bei der Wahl des Interpolationsalgorithmus fiel die Entscheidung auf eine stochastische Methode, da, wie bereits in Kapitel 3.4.2 erwähnt, bestimmt ablaufende Prozesse und Ereignisse zeitlich gerichtete und/oder räumlich geordnete Abfolgen und Strukturen mit der Tendenz zur Erhaltungsneigung oder Persistenz (in GAU [GAU-10, Seite 20-21]) zur Folge haben. Aus diesem Grunde konnte keine deterministische Interpolationsmethode zur Erstellung des stratigraphischen Modells gewählt werden.

Vor der eigentlichen Interpolation der Schichtgrenzen zwischen den stratigraphischen Schichtkörpern war es notwendig, ein Variogramm der Daten zu erstellen. Hierbei gibt es in Rockworks 15 die Möglichkeit zwischen einer automatisierten und einer manuellen Variogrammeinpassung. Die Software ermöglicht zusätzlich durch „Reporting Options“ die Ausgabe der experimentellen und daraus abgeleiteten theoretischen Variogramms jeder Schichtober- und -untergrenze. Das bedeutet, dass für jede Schichtobergrenze bzw. Schichtuntergrenze ein eigenes experimentelles und theoretisches Variogramm für die Kriging – Schätzung erstellt wird. Das experimentelle Variogramm wird bei Rockworks 15 dabei automatisch oder manuell in eines von acht unterschiedlichen theoretischen Variogrammen eingepasst. Die Variogrammtypen wurden ebenfalls bereits in Kapitel 3.4.2 besprochen und werden in Rockworks folgendermaßen unterschieden:

- **Experimentelles Variogramm mit Nugget – Effekt**
- **Experimentelles Variogramm ohne Nugget – Effekt**
- **Gauß'sches Variogramm mit Nugget – Effekt**
- **Gauß'sches Variogramm ohne Nugget – Effekt**
- **Lineares Variogramm mit Nugget – Effekt**
- **Lineares Variogramm ohne Nugget – Effekt**

- **Sphärisches Variogramm mit Nugget – Effekt**
- **Sphärisches Variogramm ohne Nugget – Effekt**

Zusammengefasst werden für fünf stratigraphische Unterteilungen des geologischen Modells zehn experimentelle bzw. theoretische Variogramme erstellt, wobei jeweils die Variogramme der Untergrenze des oberen Schichtkörpers als ident mit den Variogrammen der Obergrenze des jeweils darauf folgenden unteren Schichtkörpers bezeichnet werden können. In der nun folgenden Abbildung ist als beispielhafte Darstellung die zweidimensionale Variogrammmatrix der Kriging Interpolation der Obergrenze des Tegelschichtkörpers ersichtlich. Dies ist eine Auswertungsfunktion, die von der Software Rockworks 15 zur Verfügung gestellt wird, um den Prozess der Modellierung besser nachvollziehen zu können.

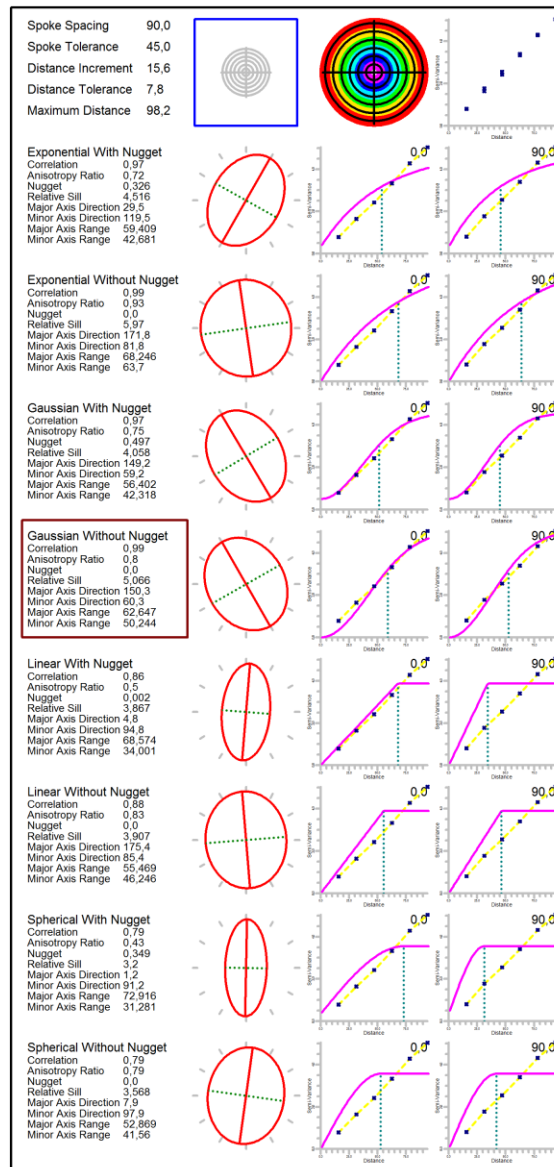


Abbildung 54: Kriging - Protokoll der Tegelloberkante (eigene Darstellung aus Rockworks 15)

In diesem Protokoll ist ersichtlich, dass für die Krigingberechnungen ein Gauß'sches Variogramm ohne Nugget – Effekt herangezogen wurde. Anhand dieses theoretischen Variogramms wird die gesamte Oberkante der Tegelschicht interpoliert. Für alle anderen Schichtgrenzen, egal ob Ober – oder Unterkante, werden ebenfalls Kriging – Protokolle erzeugt und jede Schichtgrenze mittels eines speziell eingepassten Variogramm berechnet.

7.5.2 Visualisierung des stratigraphischen Interpolationsergebnisses

Die Visualisierung des stratigraphischen Modells wurde mithilfe des kostenlosen Viewer Werkzeugs Rockplot 3D ermöglicht. Die im Kapitel 5.2 erwähnte vertikale Überhöhung wurde im Zuge der Darstellung mit dem Faktor 10 fixiert. In der folgenden Abbildung ist das geologische Basismodell des Untersuchungsgebiets mithilfe der stratigraphischen Schichtkörper ersichtlich.

Die Ergebnisse der Berechnungen der Grenzen zwischen den Schichtkörpern werden mithilfe der GRID – Methodik beschrieben und stellen alleine noch keinen Volumenkörper dar. Rockworks 15 bedient sich bei der Darstellung von stratigraphischen Volumenkörpern an einem Trick. Die Ausdehnungsgrenzen des Untersuchungsgebietes werden bei der Darstellung der stratigraphischen Volumenkörper zu Hilfe genommen. Wie bei der folgenden Abbildung zu sehen, werden bei jedem Schichtkörper jeweils vier neue vertikal exponierte GRIDs erzeugt, die die Begrenzungsflächen des jeweiligen Volumenkörpers in eine der vier Himmelsrichtungen darstellt. Somit wird mithilfe der GRIDs der Ober– und Untergrenzen und den jeweiligen vier vertikalen GRIDs ein stratigraphischer Schichtkörper nach außen hin abgegrenzt. Zusätzlich zu dieser Abgrenzung wird von Rockworks das Volumen des Körpers berechnet und dargestellt. Diese Darstellung eines Volumenkörpers kann man als Mischform der GRID - und B-REP – Methodik bezeichnen. Es ist daher eine oberflächenbasierenden Objektdarstellungsmethoden. Eine volumenbasierende Darstellungsmethode ist in diesem Fall zu speicherintensiv, da der Inhalt eines stratigraphischen Körpers nur das Attribut der stratigraphischen Schichtung gemeinsam hat.

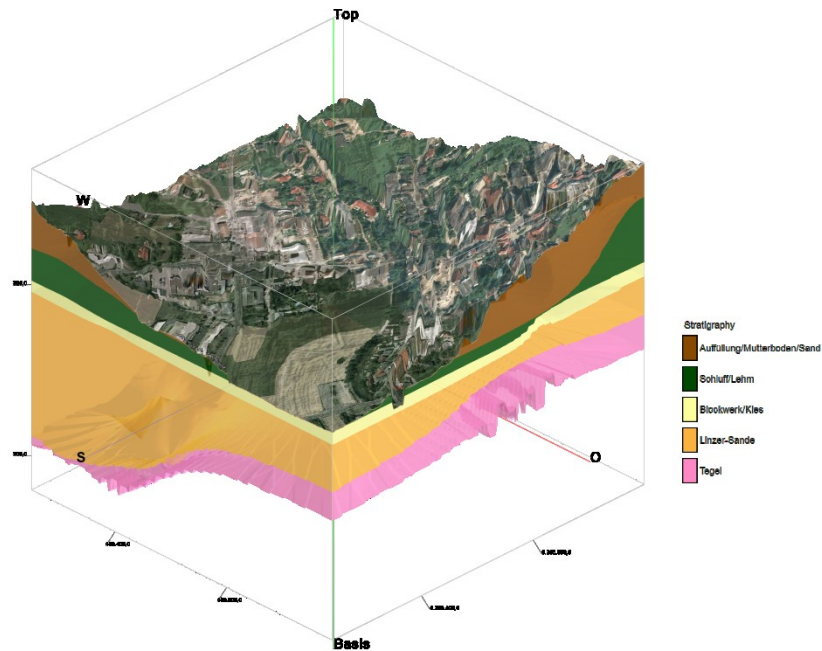


Abbildung 55: Süd-Ost Ansicht der Stratigraphie (mit Orthofoto, eigene Quelle) – im Anhang größer dargestellt.

Es wurde zur Darstellung der Stratigraphie eine 10-fache vertikale Überhöhung gewählt. Über das Ergebnis der stratigraphischen Modellierung wurde ein Orthophoto des Untersuchungsgebiets gelegt. Zur besseren Darstellung der stratigraphischen Schichtung wurde für die Visualisierung eine Transparenz von 60 Prozent gewählt.

7.6 Grundwasserkörpermodellierung

Durch die Integration der Grundwasserdaten in die Datenbank des Projektes ist es ebenfalls möglich, den Grundwasserkörper des Untersuchungsgebietes zu erstellen. Es gibt im Untersuchungsgebiet 50 Messstellen bei denen ein Grundwasserstand erhoben werden kann. Diese periodisch erhobenen Daten wurden gemittelt und ebenfalls in die Datenbank importiert. Eine überaus wichtige Position in der Grundwasserkörpermodellierung nimmt die Obergrenze des Tegels ein. Der Tegel fungiert im Untersuchungsgebiet als sogenannter „Stauer“ und ist wasserundurchlässig. Das bedeutet, dass der Grundwasserkörper im

Untersuchungsgebiet nach unten hin von der Oberkante des Tegels begrenzt wird.

7.6.1 Modellierungsprozess des Grundwasserspiegels

Für Modellierung des Grundwassers gibt es zahlreiche spezielle Softwareprodukte, wie beispielsweise VISUAL MODFLOW, die sich auf Grundwasserströmungsmodellierungen und Kontaminationstransport spezialisiert haben. Da jedoch nur der Grundwasserspiegel in weiterer Folge für die Modellierung von Interesse ist, ist die Grundwasserkörpermodellierung mittels der Software Rockworks völlig ausreichend. In Rockworks ist es möglich, mehrere Grundwasserkörper mit Hilfe von Zeitfilteroptionen zu berechnen. Dabei ist es notwendig, ein genaues Datum der Messung oder eine Zeitspanne einzugeben, um mehrere Körper über einen periodischen Zeitraum modellieren und beobachten zu können. Im Untersuchungsgebiet war dies jedoch zu aufwendig und hätte keine entscheidenden Verbesserungen für nachfolgende Modellierungen ergeben. So wurde lediglich ein Grundwasserspiegel mit gemittelten Daten erstellt.

Als grundwasserkörperhaltende Zone wurde die Oberkante des Tegelschichtkörpers definiert. Diese Schicht stellt in der Modellierung den sogenannten „Stauer“ dar. Die Interpolation wird wie bei der stratigraphischen Modellierung mittels eines stochastischen Algorithmus vorgenommen. Jedoch ist bei dieser Modellierung lediglich das berechnete GRID des Grundwasserstandes von weiterer Bedeutung, da die Untergrenze des Grundwasserkörpers, wie im Vorhinein bereits besprochen, ident mit der Obergrenze des Tegelschichtkörpers ist. Auch hier wird mit Grundwasserstanddaten ein experimentelles Variogramm erstellt und in ein theoretisches Variogramm eingepasst. Ebenso gibt es hier die Möglichkeit der Anzeige einer zweidimensionalen Variogrammatrix:

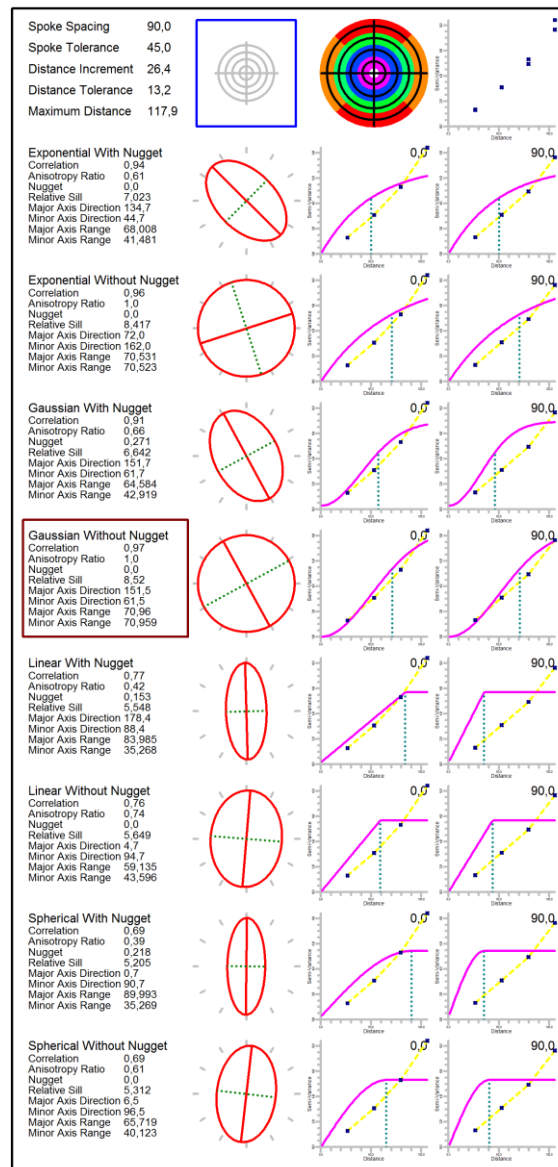


Abbildung 56: Grundwasserspiegel - Kriging Report (eigene Quelle)

Der Grundwasserspiegel des Grundwasserkörpers wurde ebenfalls mittels Kriging – Verfahren ermittelt. Die experimentellen Variogrammwerte wurden in ein Gauß'sches Variogramm ohne Nugget – Effekt eingepasst. Aufgrund dieses theoretischen Variogramms wurde der Grundwasserspiegel aus den vorhandenen Daten interpoliert.

7.6.2 Visualisierung des Grundspiegelergebnisses

Wie auch nach der stratigraphischen Modellierung, wurde im Visualisierungsprozess des Grundwasserniveaus eine vertikale Überhöhung um den Faktor 10 vorgenommen. Die Darstellungsmethode des Grundwasserspiegels entspricht dem GRID Konzept. Für die Visualisierung des GRIDs wurde ein Transparenzwert von 50 Prozent zugewiesen.

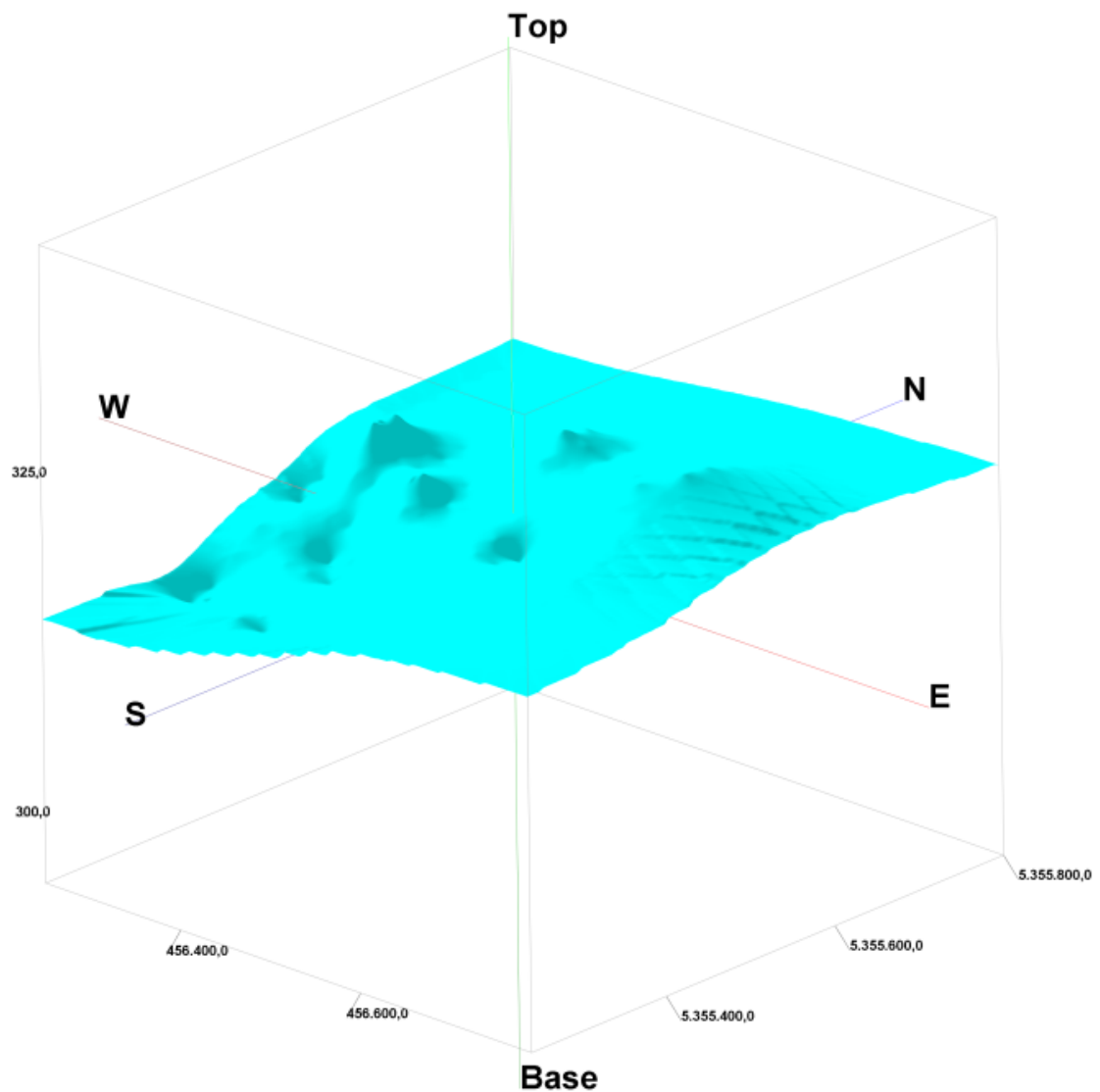


Abbildung 57: Wasserspiegelinterpolation (eigene Quellen)

7.7 Profilableitung

Nachdem die Stratigraphie – und Grundwasserdaten verarbeitet wurden, war es zusätzlich noch möglich, aus den Berechnungsergebnissen zweidimensionale Profildaten zu exportieren. Es wurden fünf verschiedene Profile gelegt. Diese Profile und deren Orientierungen wurden von der Firma BLP Geoservices vorgegeben. Alle Profile wurden durch eine unterschiedliche Anzahl an Bohrmessstellen gelegt, die in der folgenden Tabelle ersichtlich sind.

Profilnahme	Genutzte Messpunkte
DD1	BH-P, DP-41, DP-30, DP-10, DP-06, DP-48, DP-32, DP-18, DP-25, DP-26
EE1	BH-D, DP-37, DP-36, DP-59, DP-34, DP-33, Z-18, Z-13, DP-24, DP-20, Z-11, Z-10
HH1	DP-27, DP-02, DP-44, DP-16, DP-10, DP-37, DP-53
II1	DP-61, DP-31, DP-11, DP-41, DP-42, BH-I
JJ1	DP-49, DP-31, DP-15, DP-45, DP-55, DP-05, DP-08, DP-09, DP-50

Tabelle 4: Profilmesspunkte (eigene Quelle)

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Profil DD1. Alle Profile werden nochmals im Anhang deutlich größer dargestellt.

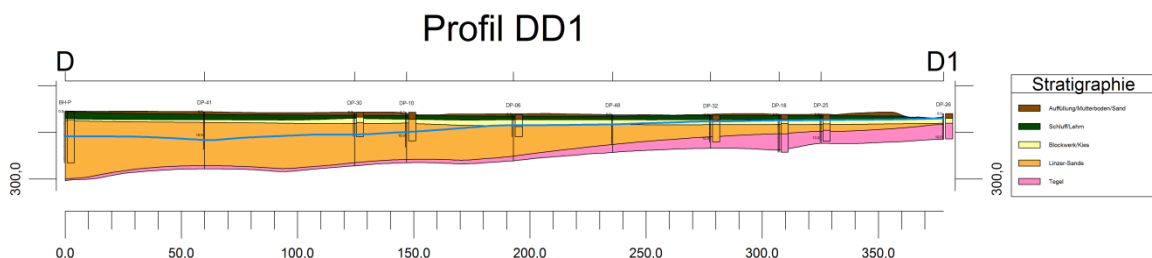


Abbildung 58: Profil DD1 (eigene Quelle)

7.8 Belastungsmodellierung

Die Datengrundlage der Belastungsmessungen ist quantitativ der größte Teil der Datenbank. Jedoch ist zu sagen, dass den Großteil dieses Datenblocks keinerlei vertikale Differenzierungen in den Messungen zulassen. Das bedeutet, viele Messungen in Bohrsondierungen zeigen Kontaminationen, jedoch gibt es keinerlei Möglichkeit diese Kontaminationen in Zusammenhang mit einer bestimmten Tiefe zu verorten. In weiterer Folge muss daher die gemessene Belastung über die

gesamte Tiefe der Bohrsondierung erstreckt werden, das wiederum keine optimale Grundlage für die Belastungskörpermodellierung ist. Neuere Kontaminationsdaten wurden jedoch mit der „Direct-Push“ – Technologie, die in Kapitel 2.1.3 näher beschrieben wurde, erhoben und ermöglichen eine vertikale Differenzierung im Zuge der Modellierung. Daher werden auch für die erste Modellierung und aufgrund des sehr kleinen Untersuchungsgebietes lediglich die, im Zuge der „Direct-Push“ – Sondierungen, erhobenen Daten für die weiteren Berechnungen herangezogen. Die in der folgenden Tabelle (Tabelle 2) ersichtlichen Direct–Push–Sondierungen sind mit UTM–Koordinaten im Untersuchungsgebiet verortet. Die Bohrungen haben unterschiedliche Endteufen (TD) und wurden auch mit einem Höhenwert beschrieben (Elevation). Es handelt sich um eine Datengrundlage von 59 Sondierungen. Zwei Bohrungen wurden nach kurzer Zeit abgebrochen, da es nicht möglich war, auf eine entsprechende Endteufe zu gelangen. Daher wurden die Direct – Push Bohrungen DP29 und DP 58 abgebrochen. In der folgenden Abbildung ist die Bohrgerätschaft der Firma FUGRO, die die Bohrarbeiten im Untersuchungsgebiet durchgeführt haben, ersichtlich. Es handelt sich dabei um eine bestimmte Form der CPT – Sondierung, dem sogenannten Direct – Push Verfahren.



Abbildung 59: Direct - Push – Bohrgerätschaft (eigene Quelle)

Bore	Easting	Northing	Elevation	TD
DP-01	456254,7638	5355524,459	330,14	13
DP-02	456297,441	5355542,278	329,36	10,6
DP-03	456387,2062	5355490,933	328,67	5,5
DP-04	456444,3259	5355524,675	327,79	9,7
DP-05	456447,3819	5355550,316	327,47	7,5
DP-06	456460,5301	5355492,792	327,71	9,6
DP-07	456487,6258	5355525,117	327,77	10
DP-08	456478,7114	5355565,821	327,81	7,6
DP-09	456531,7322	5355581,145	327,58	17,1
DP-10	456416,1815	5355480,879	328,60	15
DP-11	456315,0877	5355452,481	328,86	18
DP-12	456410,2208	5355441,171	328,37	10
DP-13	456453,5852	5355430,766	328,05	13,1
DP-14	456461,782	5355462,948	327,92	15
DP-15	456343,0006	5355485,612	328,43	10
DP-16	456366,0522	5355515,864	328,69	10
DP-17	456516,4307	5355516,428	327,35	10
DP-18	456556,1552	5355554,821	327,60	16,1
DP-19	456555,9071	5355455,87	326,91	10
DP-20	456611,1504	5355536,743	328,01	10,2
DP-21	456607,862	5355555,671	328,59	13,7
DP-22	456617,164	5355551,253	328,25	14,6
DP-23	456627,3428	5355545,774	328,18	13,4
DP-24	456593,9943	5355533,981	327,64	12,6
DP-25	456564,5004	5355570,808	327,67	11,5
DP-26	456613,4176	5355590,534	328,04	10,8
DP-27	456271,7578	5355556,607	329,39	9,1
DP-28	456397,2287	5355598,016	328,09	8,4
DP-30	456395,784	5355471,572	328,68	10,5
DP-31	456306,78	5355456,647	328,86	9,7
DP-32	456529,9654	5355541,199	327,43	11,5
DP-33	456524,6478	5355489,663	327,67	9,4
DP-34	456502,5255	5355474,589	327,66	5,15
DP-35	456478,4148	5355427,78	327,27	3,5
DP-36	456487,7728	5355453,581	327,79	3,2
DP-37	456473,3086	5355445,868	327,90	11,9
DP-38	456573,9371	5355540,352	327,60	12,5
DP-39	456562,6456	5355563,659	327,49	9,5
DP-40	456319,2831	5355452,316	328,88	5
DP-41	456346,1989	5355430,286	328,83	16
DP-42	456377,7442	5355432,701	328,44	18
DP-43	456304,9109	5355508,721	328,72	9,2
DP-44	456352,4562	5355525,12	328,69	10,3
DP-45	456389,6381	5355510,852	328,64	11,1
DP-46	456476,4202	5355474,072	327,87	10
DP-47	456459,1596	5355521,773	327,94	9,2
DP-48	456497,4896	5355514,342	327,71	12,5
DP-49	456260,6344	5355444,858	329,62	18
DP-50	456607,0485	5355610,317	327,56	3
DP-51	456308,9091	5355444,19	328,90	10,3
DP-52	456591,6298	5355567,84	328,19	6
DP-53	456540,425	5355433,499	326,70	12
DP-54	456393,7764	5355480,412	328,66	12,9
DP-55	456403,5267	5355528,894	328,33	14,2
DP-56	456421,0484	5355525,47	328,29	12,2
DP-57	456564,9427	5355549,728	327,54	3,5
DP-59	456493,2448	5355461,562	327,65	12
DP-60	456494,2924	5355417,703	327,24	12
DP-61	456246,637	5355481,685	329,06	16

Tabelle 5: Direct - Push - Sondierungen (eigene Quelle)

Bei der Datengrundlage war es mit Hilfe von Filteroptionen möglich, Belastungswerte, die unterhalb des jeweiligen Maßnahmenschwellenwertes eines Kontaminationsstoffes liegen, für weitere Berechnungen auszuschließen. Es war dadurch ausführbar, für die Interpolation also nur diejenigen Belastungsmessungen heranzuziehen, die über einem bestimmten Schwellenwert liegen. Außerdem war es gegeben, dass Kontaminationen nach dem Datum der Messung berechnet und somit Entwicklungen in der Verbreitung der Schadstoffe visualisiert werden konnten. Tabelle 5 zeigt die Prüf- und Maßnahmenschwellenwerte der zu modellierenden Kontaminationsbelastungen. Diese Werte wurden durch die Firma BLP Geoservices vorgegeben. Bei der Modellierung stellte sich jedoch heraus, dass die nach den Maßnahmenschwellenwert berechneten Belastungskörper von BTEX und MTBE keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferten, da alle Körper klarerweise nach dem gleichen Prinzip modelliert werden sollten. So musste nach anderen Modellierungswerten interpoliert werden. Daher zeigt die vorher erwähnte Tabelle auch den tatsächlich genutzten Modellierungsgrenzwert.

Belastungsstoff	Prüfwerte (µg/l)	Maßnahmenschwellenwerte (µg/l)	Modellierungswert (µg/l)
Benzol	0,6	1	0,6
BTEX	30	50	2
MTBE	5	-	2
Summe Tri Tetra	6	10	6

Tabelle 6: Prüf - und Maßnahmenschwellenwerttabelle (eigene Quellen)

7.8.1 Modellierungsprozess der Belastungskörper

Da es bei der Belastungssituation im Untersuchungsgebiet keinerlei Erklärung für die Herkunft der Kontamination gegeben hat und es sich dabei um keine bestimmt ablaufenden Prozesse und Ereignisse handelt, die zeitlich gerichtete und/oder räumlich geordnete Abfolgen von Strukturen mit der Tendenz zur Erhaltungsneigung und Persistenz zur Folge haben [GAU-10, Seite 20-21], konnte keine stochastische Interpolationsmethodik angewandt werden.

Klarerweise sind Bereiche, die näher zu einem Standort liegen, der eine starke Kontamination aufweist, dadurch auch stärker kontaminiert als Bereiche, die vom Standort der starken Belastung weiter weg liegen. Das bedeutet, dass bei der Interpolation Punkte, die näher zu einem Zielpunkt liegen höhere Gewichtungen zur Berechnung zugewiesen werden als Punkte, die weiter entfernt liegen. Diese Voraussetzungen erlauben es, den Interpolationsalgorithmus der Inversen Distanzwichtung anzuwenden. Grenzen für die Interpolation des Belastungskörpers stellen die GRIDs der Tegeloberkante und des Grundwasserspiegels dar, denn eine Verbreitung ist klarerweise lediglich innerhalb des Grundwasserkörpers möglich.

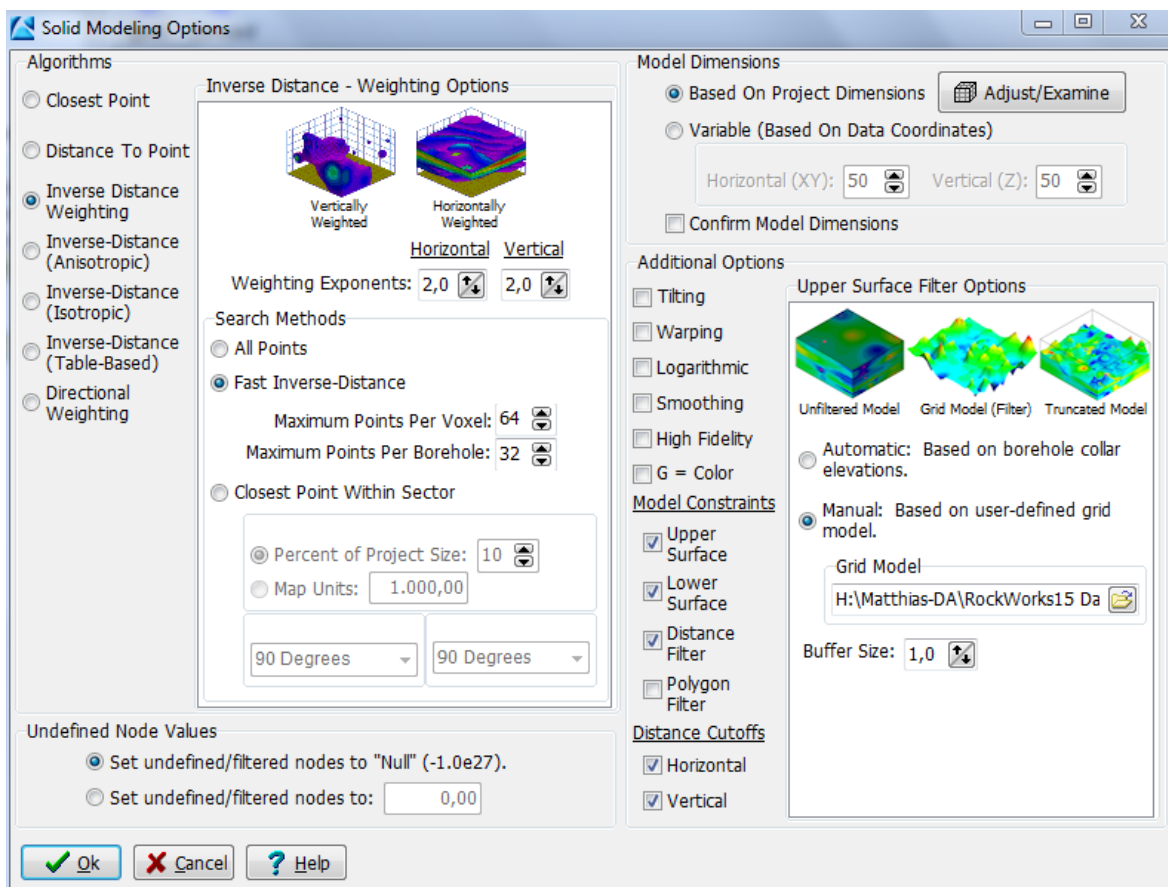


Abbildung 60: Belastungskörpermodellierung (eigene Quelle)

Die Einstellungen des Interpolationsalgorithmus wurden so gewählt, dass die Residuen zwischen den interpolierten Werten und den tatsächlich gemessenen

Werten minimal waren. Das bedeutet, jedes erstellte Modell eines Belastungsstoffes wurde hinlänglich der angewandten Interpolationseinstellungen und den Residuen mit den anderen Modellen verglichen.

Zusätzlich, um die Unsicherheiten der Interpolation zu übergehen, wurden auch sogenannte Sphären – Modelle erstellt. Bei diesen Sphären handelt es sich um Kugeln, die je nach Kontaminationswert in der Größe variieren. Es werden daher nur die Messstellen der Belastungen sowie deren Wert angezeigt. Diese Modelle sollen jedoch eher als Messpunkt – Visualisierungen dienen und nicht als eigentliche Visualisierung eines Belastungskörpers.

7.8.2 Visualisierung der Belastungskörper

Bei der Visualisierung des Belastungskörpers wurde eine volumenbasierende Objektdarstellungsmethode gewählt. Es handelt sich dabei um eine Form der 3D – ARRAY Methodik. Dabei kann jeder interpolierte Belastungswert eines vordefinierten Voxels farblich dargestellt werden. Wird bei der Visualisierung zusätzlich noch ein Transparenzwert eingestellt, ist es möglich, den Belastungskörper ganzheitlich darzustellen und auch die Belastungswerte die im Inneren des Volumenkörpers interpoliert wurden, zu sehen.

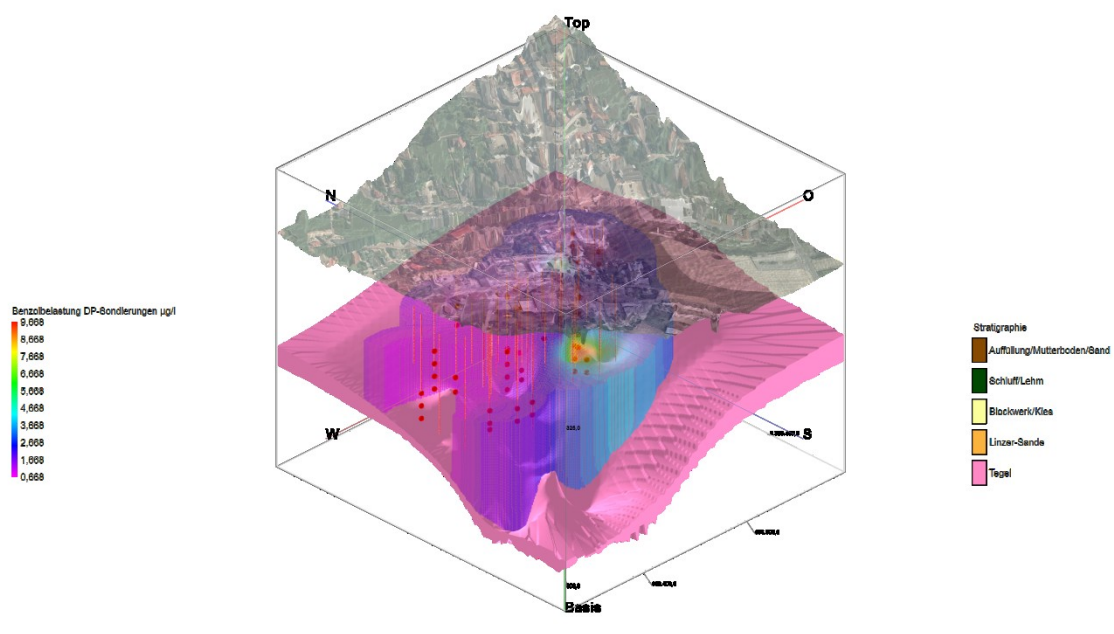


Abbildung 61: Benzol - Belastungskörper (eigene Quelle) – im Anhang größer dargestellt.

Die vorangegangene Abbildung zeigt den modellierten und visualisierten Benzol – Belastungskörper mit den zusätzlich abgebildeten Achsen der Direct – Push – Sondierungen. Der Interpolationskörper ist bei dieser Berechnung im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes zu lokalisieren und scheint sich im südwestlichen Becken, das sich durch den Abfall der Tegelschicht gebildet hat, zu sammeln. Um fehlerhafte Interpolationsergebnisse zu vermeiden, wurden sogenannte Distanzfilterungen bei den Berechnungen miteinkalkuliert. Das bedeutet, dass Gebiete des Untersuchungsraums bei der Interpolation nicht berücksichtigt wurden, die mehr als zehn Prozent von der Ausdehnung des gesamten Untersuchungsgebiets vom nächstgelegenen Belastungsmesspunkt entfernt liegen. Somit sollten Interpolationen in unsicheren Bereichen verhindert werden. Zusammenfassend ist jedoch zu sagen, dass die Schadstoffmodellierungen nur eine Momentaufnahme für die Belastungssituation des Gebietes bilden. Jedoch ist es möglich, Kontaminationsmodellierungen von gleichen Schadstoffen und unterschiedlichen Mess-Zeitpunkten miteinander zu kombinieren. Es ist mittels einer Morphing – Berechnung in Rockworks 15 somit machbar, die Bewegungen einer Schadstofffahne nachzuvollziehen. Dies setzt jedoch regelmäßige und periodische Messintervalle voraus. Das Ergebnis dieses Morphing Prozesses ist eine Videodatei, die die Bewegungen des Schadstoffkörpers zwischen den Messdurchgängen simuliert.

7.8.3 Sphärenmodelle der Belastungen

Um die Unsicherheiten der Belastungskörpermodellierung zu umgehen und um eine alternative Repräsentationsmöglichkeit zu erhalten, wurden die Belastungsdaten auch andersartig visualisiert. Wie in Kapitel 7.7.1 erwähnt, war es auch möglich die Schadstoffe mit Hilfe von sogenannten Sphären sichtbar zu machen. Hierbei wurden den Belastungsstoffen je nach der Stärke der Kontamination Kugelradien zugewiesen. Bei dieser Art der Darstellung war es möglich, alle Schadstoffe gleichzeitig in einem Modell abzubilden. Es gibt dabei die Möglichkeiten, den Belastungssphären Größen nach linearen oder exponentiellen Kurven zuzuweisen. Da die Kontaminationswerte an sich schon

sehr stark variierten, wurden die Größen mittels einer linearen Funktion zugewiesen. Nachteil hierbei ist es jedoch, dass die Belastungssphären für sich alleine stehen und keinerlei Einfluss zueinander nehmen. Es ist jedoch eine gute Art der Repräsentation von stark - und weniger stark kontaminierten Messpunkten.

Zusätzlich zu den modellierten Sphären wurde auch die Möglichkeit von Zwischenstauerschichten nach Rücksprache mit der Firma BLP Geoservices in Erwägung gezogen. Das bedeutet, dass sich zwei zusätzliche, dünne, wasserundurchlässige Schichten in der Schichtabfolge des Untersuchungsgebiets befinden und damit die Bewegung des Grundwasserkörpers sowie die Bewegung der Schadstofffahnen mit beeinflussen. Diese Schichten wurden zusätzlich bei der Visualisierung der Schadstoffsphären berücksichtigt.

- Benzol



- BTEX



- MTBE



- Summe TriTetra

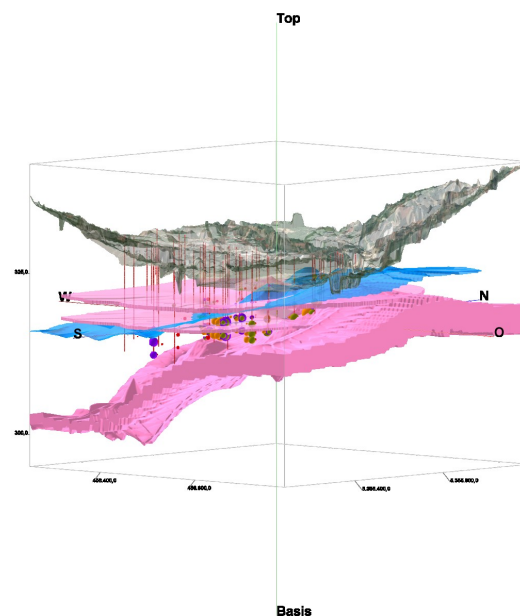


Abbildung 62: Sphärenmodellierung mit Zwischenstauer (eigene Quelle) – Im Anhang größer dargestellt

7.9 Exportmöglichkeiten – Interoperabilität

Um auch Interoperabilität zu gewährleisten, stellt Rockworks 15 auch unterschiedliche Exportfunktionen zur Verfügung. GRIDs können als ASCII – Dateien exportiert werden. Es gibt auch die Möglichkeit, Dateien zu exportieren, um sie in Programme wie Autocad oder ArcGis einlesen zu können. Auch volumetrische Daten können beispielsweise als ESRI – Shape Punktwolke exportiert werden und bieten damit die Möglichkeit, diese berechneten Modelle auch mit anderen Programmen zu bearbeiten. Beispielhaft wurden bei der folgenden Abbildung die Stratigraphie– und Bohrachsdaten des Untersuchungsgebiets exportiert, um sie in ArcScene 9.3 weiter bearbeiten zu können.

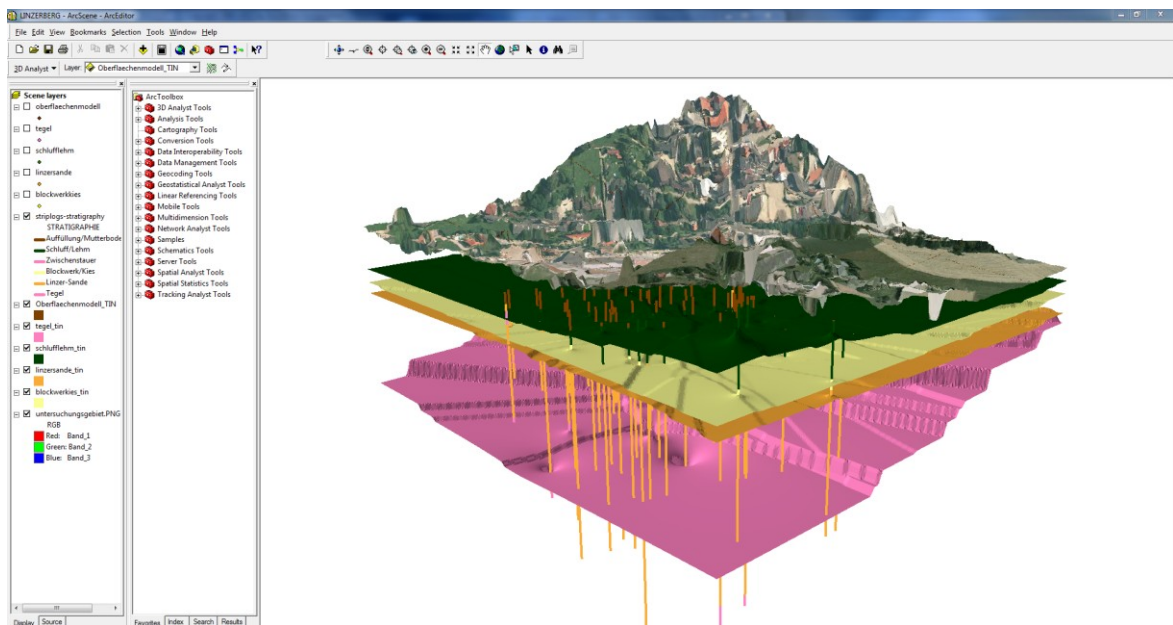


Abbildung 63: ArcScene - Export (eigene Quelle)

8 Zusammenfassung

8.1 Ziele und Ergebnisse der Arbeit

Die Ergebnisse der Diplomarbeit sind eine Reihe von Modellen, die aus den zur Verfügung gestandenen Daten der Firma BLP Geoservice modelliert wurden. Es wurden dabei die stratigraphischen Schichten des Untersuchungsgebiets aus den Bohrsondierungsdaten mittels geostatistischen Verfahren interpoliert. Als Grundlage für die Belastungskörpermodellierung wurde eine Schicht definiert, die den Grundwasserkörper, in dem sich die Kontaminationen ausbreiten konnten, trägt. Diese grundwasserkörpertragende Schicht stellt die Oberkante des Tegels dar. Aus den Messreihen zur Definition des Grundwasserspiegels wurde ein GRID modelliert, das die Oberkante des Grundwasserkörpers darstellt. Innerhalb dieser definierten Grenzen wurden die Belastungskörper der vier Hauptkontaminationsstoffe mittels definierter Grenzwerte interpoliert.

Eines der Ziele dieser wissenschaftlichen Arbeit war das Aufzeigen der wichtigsten Punkte im Prozess der Modellierung von geologischen Strukturen und deren dreidimensionaler Visualisierung. Dabei stellte die Beschaffung der Datengrundlagen einen Teilaspekt dieser Forschungsfrage dar. Außerdem war es zusätzlich wichtig, sich mit der Thematik der räumlichen Interpolation und der daraus resultierenden räumlichen Repräsentationsfrage zu beschäftigen.

Die Visualisierung der interpolierten Modellierungsergebnisse war auch Teil einer Forschungsfrage dieser Arbeit. Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur Visualisierung besprochen. Im praktischen Teil der Arbeit fiel der Entschluss auf eine Visualisierung innerhalb des verwendeten Softwarepakets, da es sich um die schnellste und kostengünstigste Variante handelte.

Aufgrund von sehr vieler Recherche innerhalb des Forschungsgebiets der dreidimensionalen Geologie und dessen Visualisierung war es ersichtlich, dass der Stand der Technik dieser Disziplin relativ breit gefächert ist. Jedoch gibt es noch zahlreiche Verbesserungspotentiale, was natürlich zusätzlich immer an die Hard- und Softwareentwicklung innerhalb dieses Gebiets gekoppelt ist. Es

wurden einige Beispiele an Softwarepakete genannt, die stellvertretend für eine Vielzahl von spezialisierten Softwarepaketen stehen. Die Wissenschaft in dieser Disziplin stellt sehr viele Lösungsansätze zur Verfügung, jedoch hat sich nach meinen Erkenntnissen noch keine Software als absoluter Marktführer herauskristallisiert. Außerdem fehlen Standards, die es erlauben, kompatibel innerhalb verschiedener Programme zu arbeiten und erschweren damit einen reibungslosen Arbeitsablauf.

Das für die Erstellung der Modelle genutzte Softwarepaket Rockworks 15 der Firma Rockware wurde vom Auftraggeber BLP Geoservices zur Verfügung gestellt. Es stellt innerhalb der Lösungsansätze ein eher vielseitiges Programm dar. Es ist darauf ausgelegt, die Problemstellung eines Projektes nur innerhalb des eigenen Softwarepakets zu lösen, hat jedoch Exportfunktionen, die es ermöglichen, Modelle in andere Softwareapplikationen zu importieren. Es gibt jedoch Programme, die wesentlich bessere Lösungsansätze, beispielsweise bei Themen wie Grundwasserkörpermodellierung oder Modellierung von Kontaminationsausbreitungen, bieten. Zusammenfassend ist jedoch zu sagen, dass Rockworks 15 sehr gute Möglichkeiten bietet, geologische Basismodelle zu interpolieren und zu visualisieren.

8.2 Fazit und Ausblick

Die praktische Umsetzung der Diplomarbeit war sehr zeitaufwändig. Große Probleme gab es bei der Implementierung der Datengrundlage, da diese in völlig unterschiedlichen Ablage- und Speicherstrukturen geliefert wurden. Es war auch im Vorhinein notwendig, die Bohrsondierungen stratigraphisch zu interpretieren. Dies geschah natürlich mittels fachlicher Unterstützung durch die Firma BLP Geoservices. Die Grundlagen der geologischen Modellierung und der Visualisierung wurden im theoretischen Teil besprochen und danach im praktischen Teil der wissenschaftlichen Arbeit umgesetzt. Probleme bei der Umsetzung mit dem Softwarepaket konnten mit Hilfe von unterstützenden Foren – Einträgen [ROC-11b] und mit dem Benutzerhandbuch der Software [ROC-11a] beseitigt werden.

Zukünftig wäre es zusätzlich möglich, sich mit der Schadstoffausbreitung von Kontaminationsstoffen stärker zu beschäftigen. Es gäbe Funktionen, die es auch erlauben würden, mit Hilfe von Tracer – Einsatz zu modellieren, wie sich Stoffe innerhalb eines Grundwasserkörpers ausbreiten und bewegen. Dies war aufgrund von Zeitmangel und fehlenden Datengrundlage in dieser Diplomarbeit nicht mehr möglich. Ebenfalls wäre es auch denkbar, die Exportfunktionen der Softwarepakete weiter zu verbessern. Beispielsweise wäre es vorstellbar, Schnittstellen zu Internetbrowsern besser zu entwickeln, um modellierte Ergebnisse von Interpolationen geologischer Strukturen auch einem breiteren Publikum zur Verfügung zu stellen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Forschungsgebiet der Modellierung und Visualisierung ein sehr interessanter und zukunftssträchtiger Bereich der Wissenschaft ist. Es ist sehr wichtig Parameter von Interpolationsalgorithmen so zu wählen, damit das realitätsnaheste Ergebnis zu Stande kommt. Auch im Bereich der Visualisierung gibt es, wie vorhin bereits erwähnt, noch einiges an Entwicklungspotential.

Literatur

Bibliographie:

- [ABD-08] ABDUL-RAHMAN, A., PILOUK, M.: Spatial Data Modeling for 3D GIS. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 2008, 289 Seiten.
- [ABD-92] ABDUL-RAHMAN, A.: Triangular irregular network in digital terrain relief modelling. M. Sc. Thesis, ITC, Enschede, Niederlande, 1992, 80 Seiten.
- [AKI-88] AKIS, H., SIEMES, H.: Praktische Geostatistik. Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften. Berlin, Springer Verlag, 1988, 304 Seiten.
- [BAI-11] BALEY, J.E., CHEN, A.: The role of Virtual Globes in geoscience. In: Computers & Geosciences, Volume 37, Issue 1, 2011, Seite 1-2.
- [BAN-93] BANDEMER, H.: Unkenntnis und Wahrscheinlichkeit. Beitrag für den Arbeitskreis für Mathematische Geologie und Geoinformatik. Köln, Verlag Sven von Loga, 1993, Seite 1-5.
- [BAR-04] BARNES, J.W., LISLE, R.J.: Basic Geological Mapping. Wiley, Chichester, West Sussex, England, 2004, Seite 184 ff.
- [BAR-05] BARTELME, N.: Geoinformatik. Modelle Strukturen Funktionen. Berlin, Springer Verlag, 2005, 454 Seiten.
- [BEN-06] BENDER, M., BRILL, M.: Computergrafik: ein anwendungsorientiertes Lehrbuch. München/Wien, Hanser Verlag, 2006, 517 Seiten.
- [BER-86] BERANN, H.C.: Darstellende Kunst im Panorama. In: Herrmann, C., H.F. Kern (Hrsg.): Kartenverwandte Darstellung – Werkstättenberichte. Karlsruher geowissenschaftliche Schriften, Reihe A, Band 4. Karlsruhe, 1986, Seite 57-67.
- [BIL-01] BILL, R., ZEHNER, M.: Lexikon der Geoinformatik, Heidelberg, Wichmann Verlag, 2001, 312 Seiten.
- [BIL-99a] BILL, R.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1, Hardware, Software und Daten. Heidelberg, Wichmann Verlag, 1999, 454 Seiten.
- [BIL-99b] BILL, R.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2, Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Heidelberg, Wichmann Verlag, 1999, 475 Seiten.

- [BIN-94] BINOT, F., RÖHLING, H.-G.: 1994. Grenzflächen - 2½ D-Modellierung im Gebiet Vörden-Hunteburg im Systemverbund ISP/IES/ISM (SATTLEGGGER, GEOQUEST, DYNAMIC GRAPHICS) In: Studie über die Möglichkeiten Räumlicher Geologischer Modellierung im Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, Seite 73–86.
- [BON-09] BONOMI, T.: Database development and 3D modeling of textural variations in heterogeneous, unconsolidated aquifer media: Application to the Milan plain. In: COMPUTERS & GEOSCIENCES, Heft: 35, 2009, S. 134-145.
- [BUN-02] BUNGARTZ, H.-J., GRIEBEL, M., ZENGER, C.: Einführung in die Computergrafik: Grundlagen, Geometrische Modellierung, Algorithmen. Braunschweig/Wiesbaden, Vieweg & Teubner Verlag, 2002, 327 Seiten.
- [DEL-02] DE LANGE, N.: Geoinformatik in Theorie und Praxis. Berlin, Springer Verlag, 2002, 438 Seiten.
- [DEP-11] DE PAOR, D.G., WHITMEYER, S.J.: Geological and geophysical modeling on virtual globes using KML, COLLADA, and Javascript. In: Computers & Geosciences, Volume 37, Issue 1, 2011, Seite 100-110.
- [DIE-08] DEITEL, P.J., DEITEL, H.M.: AJAX, Rich Internet Application, and Web Development for Programmers. Prentice Hall, 2008, 1040 Seiten.
- [DRA-97] DRANSCH, D.: Computeranimation in der Kartographie – Theorie und Praxis. Berlin, Springer Verlag, 1997, 144 S.
- [DYK-05] DYKES, J., MACEACHREN, A., KRAAK, M.-J. [Hrsg.]: Exploring Geovisualization. Amsterdam, Elsevier, 2005, 720 S.
- [EGE-89] EGENHOFER, M.: A Formal Definition of Binary Topological Relationships. In: LITWIN, W., SCHEK, H.-J.: 3rd International Conference on Foundations of Data Organization and Algorithms, Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1989, S. 457-472.
- [ELF-04] ELFERS, H., BOMBIEN, H., FRANK, H. et al.: Wege zur 3D-Geologie. Personenkreis 3D der BIS-Steuerungsgruppe. Krefeld, 2004, 14 S.
- [GAU-10] GAU, C.: Geostatistik in der Baugrundmodellierung – Die Bedeutung des Anwenders im Modellierungsprozess. Berlin, Vieweg & Teubner Verlag, 2010, 405 S.

- [GRO-06] GROSHONG, R. H. Jr.: 3-D Structural Geology. A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map Interpretation. Berlin, Springer Verlag, 2006, 400 S.
- [HAE-03] HÄBERLING, C.: Topografische 3D-Karten: Thesen für kartografische Gestaltungsgrundsätze. Zürich, Dissertation der Eidgenössischen Technischen Hochschule ETH Zürich, 2003, 255 Seiten.
- [HAG-77] HAGGETT, P., CLIFF, A.D., FREY, A.: Locational Analysis in Human Geography. New York, Wiley Verlag, 1977, 605 Seiten.
- [HAK-02] HAKE, G., GRÜNREICH, D., MENG, L.: Kartographie. Berlin. de Gruyter, 2002, 604 Seiten.
- [HIL-05] HILBRING, D.: 3d-GIS Visualisierung in der Umweltinformatik. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2005, 217 Seiten. (Internetquelle: http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/dbkit/uv/getUvkaDocument.php?vv_id=1000003649).
- [HOE-63] HÖLZEL, F.: Perspektivische Karten. In: Imhof, E. (Hrsg.): Internationales Jahrbuch für Kartographie, 3. Gütersloh, 1963, Seite 100-118.
- [HOU-00] HOULDING, S. W.: Practical Geostatistics – Modeling and Spatial Analyses. Berlin, Springer Verlag, 2000, 158 S.
- [HUN-07] HUNT, R. E.: Geotechnical Investigation Methods - A Field Guide for Geotechnical Engineers. New York, CRC Press, Taylor Francis Group, 2007, 342 S.
- [IMH-63] IMHOF, E.: Kartenverwandte Darstellung der Erdoberfläche – eine systematische Übersicht. In: Imhof, E. (Hrsg.): Internationales Jahrbuch für Kartographie, 3. Gütersloh, Seite 55-99.
- [ISA-89] ISAAKS, E. H. & SRIVASTAVA, R. M.: An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, 1989, 561 Seiten.
- [JAN-10] JANSSENS-CORON, E., POULIOT, J., MOULIN, B., RIVERA, A.: An Experimentation of Expert Systems Applied to 3D Geological Models Construction. In: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, 71-91 S.
- [JOL-09] JOL, H.M.: Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Amsterdam, Elsevier, 2009, 544 Seiten.
- [JOU-78] JOURNEL, A. G. & HUIJBREGTS, C. J.: Mining Geostatistics. Academic Press, London, 1978, 600 Seiten.

- [KES-09a] KESSLER, H., MATHERS, S., SOBISCH H.-G.: The capture and dissemination of integrated 3D geospatial knowledge at the British Geological Survey using GSI3D software and methodology. In: COMPUTERS & GEOSCIENCES, Heft: 35, 2009, S. 1311-1321.
- [KRA-92] KRAAK, MJ.: Working with triangulation-based spatial data in 3D space. ITC Journal 1992-1, 1992, Seite 20-33
- [KRI-51] KRIGE, D. G.: A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Af. 52 (6), 1951, Seite 119 – 139.
- [KRI-66] KRIGE, D. G. (1966): Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore evaluation. (Proc. Symp. on Math. Statistics and Computer Application on Ore Evaluation, Johannesburg), J. S. Af. Inst. Min. Metall. 66, 1966, Seite 13 – 38.
- [KUR-10] KURATA, Y.: From Three-Dimensional Topological Relations to Contact Relations. In: NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, 123-142 S.
- [LEY-01] LEYMÜLLER, M.: GIS-gestützte Erstellung mittelmaßstäbiger Klimakarten. Wien, 2001, 156 S.
- [LIA-05] LIAROKAPIS, F., GREATBATCH, I., MOUNTAIN, D., GUNESH, A., BRUJIC-OKRETIC, V., RAPER, J.: Mobile Augmented Reality Techniques for GeoVisualisation. In: Proc. 9th International Conference on Information Visualisation, IEEE Computer Society, 2005, Seite 745-751.
- [MAI-90] MEIER, S., KELLER, W.: Geostatistik. Theorie der Zufallsprozesse. Wien, Springer Verlag, 1990, 206 Seiten.
- [MAL-05] MALOLEPSZY, Z.: Three-Dimensional Geological Maps. In: The Current Role of Geological Mapping in Geosciences. Dordrecht, Springer Verlag, 2005, Seite 215-224.
- [MAR-00] MARINONI, O.: Geostatistisch gestützte Erstellung baugelogeischer Modelle am Beispiel des Zentralen Bereiches von Berlin. Dissertation, TU Berlin, 2000, 149 Seiten.
- [MAT-65] MATHÉRON, G.: Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Herausgeber Masson, 1965, Paris.

- [MCC-06] McCARTHY, J:D, GRANIERO, P.A.: A GIS-based borehole data management and visualization system. In: COMPUTERS & GEOSCIENCES, Heft: 32, 2006, S. 1699-1708.
- [MIN-10] MING, J., MOA, P., HONGGANG, Q.; ZHIHONG, G.: GSIS: A 3D geological multi-body modeling system from nettycross-sections with topology. In: COMPUTERS & GEOSCIENCES, Heft: 36, 2010, S. 756-767.
- [MIT-96] MIDTBØ, T.: Spatial modelling by delaunay networks of two and three dimensions. PhD thesis. Norwegian Institute of Technology. University of Trondheim, Norway, 1996.
- [MUE-78] MUEHRKE, P.C.: Map Use: Reading, analysis and interpretation. Madison, WI, JP Publications, 1978, 469 S.
- [NEB-06] NEBER, A., CLASSON, R., HOWAHR, M.: Construction and usage of geological near-surface models with GSI3D – applied (hydro-) geological information for land sites and urban areas. In: Austrian Journal of Earth Sciences, ÖGG, 2006, Volume 99, Seite 62-69.
- [NEU-10] NEUTENS, T., DE MAEYER, P. [Hrsg.]: Developments in 3D-Geoinformation Sciences. Berlin, Springer Verlag, 2010, 219 S.
- [POS-01] POST, C.: Über die Anwendbarkeit geostatistischer Verfahren und Optimierung von Daten zur Bewertung der hydraulischen und geologischen Gegebenheiten als Grundlage für Sanierungsmaßnahmen am Beispiel des Ronneburger Erzrevieres. Dissertation, RWTH Aachen, Mitt. Ing. u. Hydr. 77, 2001, 152 Seiten.
- [PRI-99] PRISSANG, R., SPYRIDONOS, E. & FRENTROP, K. R.: Computer assisted 3D modelling and planning for the cement industry of El Salvador. Mathematische Geologie 4, 1999, Seite 61 – 72.
- [RON-94] RONGXING, L.: Data structures and application issues in 3-D geographic information systems. Geomatica. Vol.48, No.3, 1994, Seite 209-224.
- [SAU-97] SAURER, H. & BEHR, F.J.: Geographische Informationssysteme: Eine Einführung. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1. Auflage, 1997, 235 S.
- [SCH-06] SCHNEIDER, D.: Konzept und Implementierung einer Geometrie-Datenstruktur in das Programmsystem SLang basierend auf der "Boundary Representation Data Structure". Gera/Thüringen, Deutschland, Universität Weimar – Institut für Strukturmechanik, 2006, 71 Seiten. (Internetquelle: <http://www.uni->

weimar.de/cms/fileadmin/bauing/files/professuren/ism/Abschlussarbeiten/DA_Schneider_2006.pdf)

- [SCH-99] SCHAFMEISTER, M.: Geostatistik für die hydrologische Praxis. Berlin, Springer Verlag, 1999, 172 S.
- [SIB-81] SIBSON, R.: A Brief description of natural neighbor interpolation. In: Interpreting Multivariate Data (ed. V. Barnett). Chichester, Wiley Verlag, 1981, Seite 21-36.
- [STE-07] STEINMETZ, T.: Integration, Analyse und interaktive Visualisierung von Daten für das Risikomanagement großräumig kontaminierter Standorte. Halle (Saale). Dissertation an der Naturwissenschaftlichen Fakultät III der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2007, 169 Seiten. (Internetquelle: <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/07/08H002/prom.pdf>)
- [STO-91] STONE, D.: Analysis of scale exaggeration on seismic profiles. In: American Association of Petroleum Geologists Bulletin 75, 1991, Seite 1161–1177.
- [TOB-70] TOBLER, W. R. (1970): A computer model simulating urban growth in the Detroit region. Econ. Geogr. 46 (2), 1970, Seite 234 – 240.
- [TSE-08] TSE, R., GOLD, C., KIDNER, D. 3D City Modelling from LIDAR Data. In: VAN OOSTEROM, P., ZLATANOVA, S., PENNINGA, F., FENDEL, E. [Hrsg.]: Advances in 3D-Geoinformation Systems. Berlin, Springer Verlag, 2008, 161-175 S.
- [VER-06] VERMA, V., KUMAR, R., HSU, S.: 3D building detection and modeling from aerial LIDAR data. In: CVPR 2006, Volume 2, 2006, Seiten 2213–2220.
- [VON-10] VON REUMONT, F.: „Web3D und dessen Potenzial zur Visualisierung geologischer Daten – gezeigt am Beispiel der Stadt Wien. Diplomarbeit, Universität Wien, 2010, 139 Seiten.
- [WAN-07] WANG, Y., WU, L., SHI, W. LIU, X.: On 3D GIS Spatial Modeling. Paper of the IPSRS Workshop on Updating Geo-spatial Databases with Imagery & the 5th IPSRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS. 2007, Seite 237-240. (Internetquelle: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/4-W54/papers/237-240%20Yanbing%20Wang.pdf>)
- [WEB-07] WEBSTER, R., OLIVER, M.: Geostatistics for environmental scientists. Chichester, Wiley Verlag, 2007, 315 Seiten.

- [WEG-29] WEGENER, A.: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Braunschweig, 1929, Friedr. Vieweg & Sohn, 221 Seiten.
- [WYC-09] WYCSIK, P., HUBERT, T., GOSSEL, W., NEUMANN, C.: High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites. In: COMPUTERS & GEOSCIENCES, Heft: 35, 2009, S. 165-182.
- [ZAN-09] ZANCHI A., DE DONATIS M., GIBBS A, et al.: Imaging geology in 3D. In: COMPUTERS & GEOSCIENCES, Heft: 35, 2009, S. 1-3.
- [ZLA-00] ZLATANOVA, S.: On 3D Topological Relationships. In: Erwig, M., Schneider, M., Sellis, T. (eds.): International Workshop on Advanced Spatial Data Management, IEEE Computer Society, 2000, S. 913-924.

Internetquellen:

- [GEO-11] GEO-LOG 2011: Direct-Push-Technologien.
http://www.geo-log.com/uploads/media/Direct_Push_Technologien.pdf
Letzter Zugriff: 28.April 2011
- [ENV-08] ENVISOFT 25.Mai 2008: Zum Einsatz von Direct-Push-Verfahren.
<http://envisoft.blogspot.com/2008/05/zum-einsatz-von-direct-push-verfahren.html>
Letzter Zugriff: 29.April 2011
- [WIK-11] WIKTIONARY: Teufe
<http://de.wiktionary.org/wiki/Teufe>
Letzter Zugriff: 29.April 2011
- [UNI-11] UNI-PROTOKOLLE: Azimut
<http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Azimut.html>
Letzter Zugriff: 29.April 2011
- [STA-11] DER STANDARD: Interface aus "Minority Report" im Real-Einsatz
<http://derstandard.at/1304428485741/Video-Interface-aus-Minority-Report-im-Real-Einsatz>
Letzter Zugriff: 04.Mai 2011
- [OBL-11] OBLONG INDUSTRIES
<http://oblong.com/#!/home>
Letzter Zugriff: 04.Mai 2011
- [MOD-11] ALLGEMEINES ZUM MODELLBEGRIFF: Prof. Dr. Alfred Schreiber / Megger Online
http://www.gefilde.de/ashome/vorlesungen/anwendungen/modellbildung/v01/Allgemeines_zum_Modellbegriff.pdf bzw. <http://www.megger-online.com/downloads/07lb2informatischemodelle.pdf>
Letzter Zugriff: 17. Mai 2011
- [LEX-11a] GEOINFORMATIK LEXIKON DER UNI ROSTOCK (Delaunay-Triangulation)
<http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=477>

Letzter Zugriff: 17.Juni 2011

Letzte Änderung: 22.Dezember.2003

[CSE-98] DELAUNAY TRIANGULIERUNGSSALGORITHMUS

<http://www.cse.unsw.edu.au/~lambert/java/3d/delaunay.html>

Letzter Zugriff: 17. Juni 2011

Letzte Änderung: 22. September 1998

[HEB-04] HEBELER, INTERPOLATIONSKLASSIFIZIERUNG

http://www.geo.unizh.ch/~fhebeler/interpolation_gis2.pdf - HEBELER, Felix

letzter Zugriff: 6. Juli 2011

[KIS-04] KISSAUER, GEOSTATISTIK II – KRIGING INTERPOLATION

http://www.geogr.uni-jena.de/~c5hema/gis_ws04/ha/kissauer.pdf - KISSAUER, S.

letzter Zugriff: 6.Juli 2011

[LEX-11b] GEOINFORMATIK LEXIKON DER UNI ROSTOCK (Interpolation)

<http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=991>

letzter Zugriff: 6. Juli 2011

[RIE-10a] RIEDL, D., INVERSE DISTANCE WEIGHTING

http://homepage.univie.ac.at/doris.riedl/model0910/tut_geostat/IDW.htm - RIEDL, Doris

letzter Zugriff: 27. Juli 2011

[RIE-10b] RIEDL, D., TREND OBERFLÄCHEN

http://homepage.univie.ac.at/doris.riedl/model0910/tut_geostat/trendoberflaechen.htm - RIEDL, Doris

letzter Zugriff: 27. Juli 2011

[RIE-10c] RIEDL, D., KRIGING BASICS

http://homepage.univie.ac.at/doris.riedl/modelle/modelle2010/tut_geostat/KrigingBasics.htm

letzter Zugriff: 03.August 2011

[RIE-10d] RIEDL, A., MULTIMEDIATECHNOLOGIE UND

GEOKOMMUNIKATION – Skript für das Studienjahr 2011/12 – Universität Wien

http://www.univie.ac.at/karto/lehre/multimed/mmgk1011/tutorials/theorie/mmgk10_skript.pdf

letzter Zugriff: 06. September 2011

- [NEU-11] NEUBAUER, W., BLUT UND SAND – Das Leben und Sterben der Gladiatoren im Römischen Österreich

<http://archpro.lbg.ac.at/press-release/school-gladiators-discovered-roman-carnuntum-austria>

letzter Zugriff: 07. September 2011

- [UMW-96] UMWELTBUNDESAMT – Entwurf für eine „vorläufige Empfehlung zur Handhabung von Richtwerten für die Gefährdungsabschätzung von Altlasten in Österreich

<http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/BE068.pdf>

letzter Zugriff: 06. Oktober 2011

- [ROC-11a] ROCKWORKS 15 BENUTZERHANDBUCH – Benutzerhandbuch für die Software Rockworks 15 der Firma Rockware

http://www.rockware.com/assets/products/165/downloads/documentation/41/rw15_manual.pdf

letzter Zugriff: 10. Oktober 2011

- [3DG-11] 3D GEOMODELLER HOMEPAGE

<http://www.geomodeller.com>

letzter Zugriff: 25. Oktober 2011

- [GOC-11] GOCAD HOMEPAGE

<http://www.gocad.org/www/>

letzter Zugriff: 25. Oktober 2011

- [GAB-11] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: Definition Plug-In

<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/plugin.html>

letzter Zugriff: 25. Oktober 2011

- [ROC-11b] ROCKWORKS 15, SUPPORT FORUM

<https://www.rockware.com/forum/>

letzter Zugriff: 20. November 2011

Anhang

- Screenshots einiger berechneter Modelle

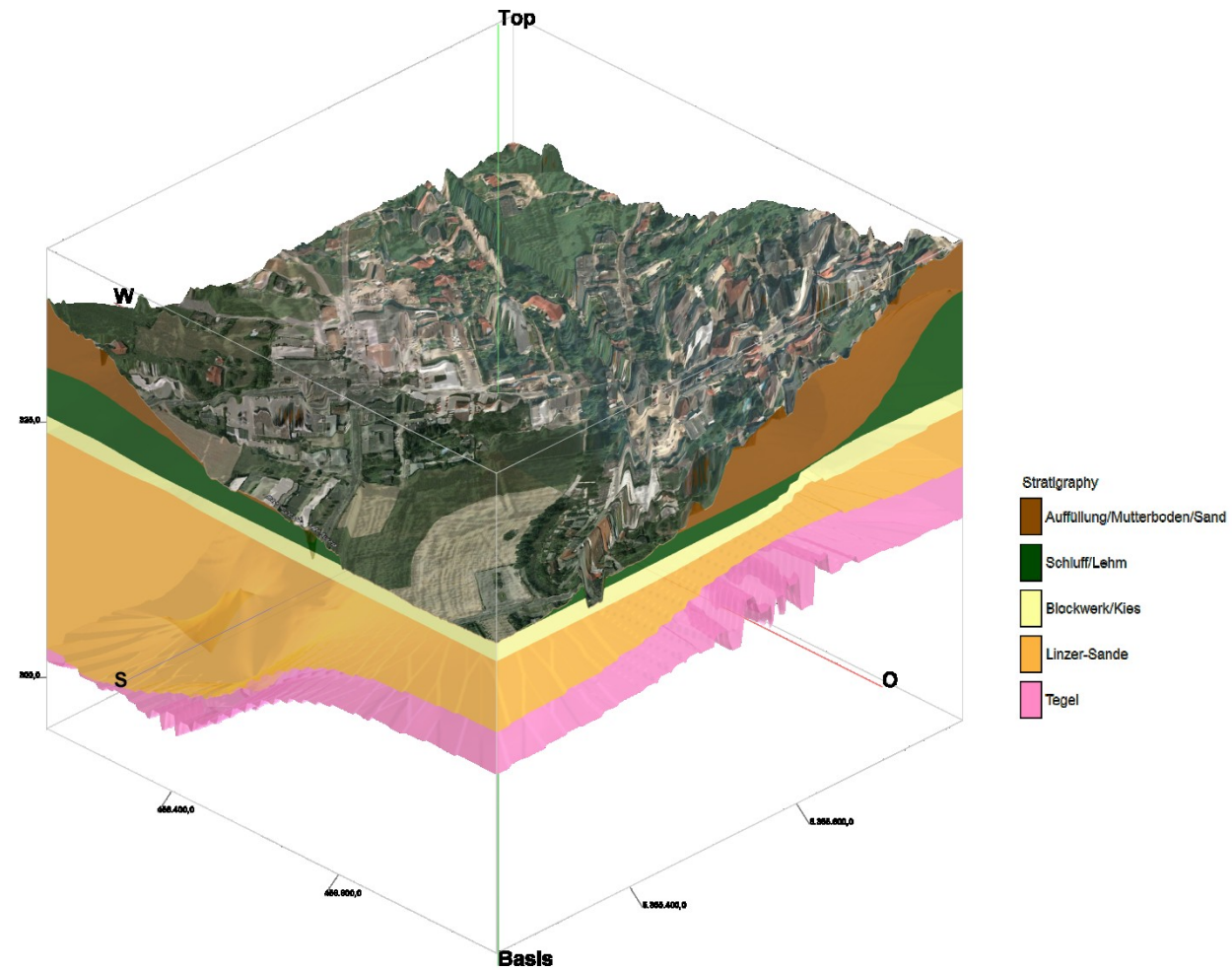


Abbildung 64: Stratigraphie, südöstliche Ansicht (eigene Quelle)

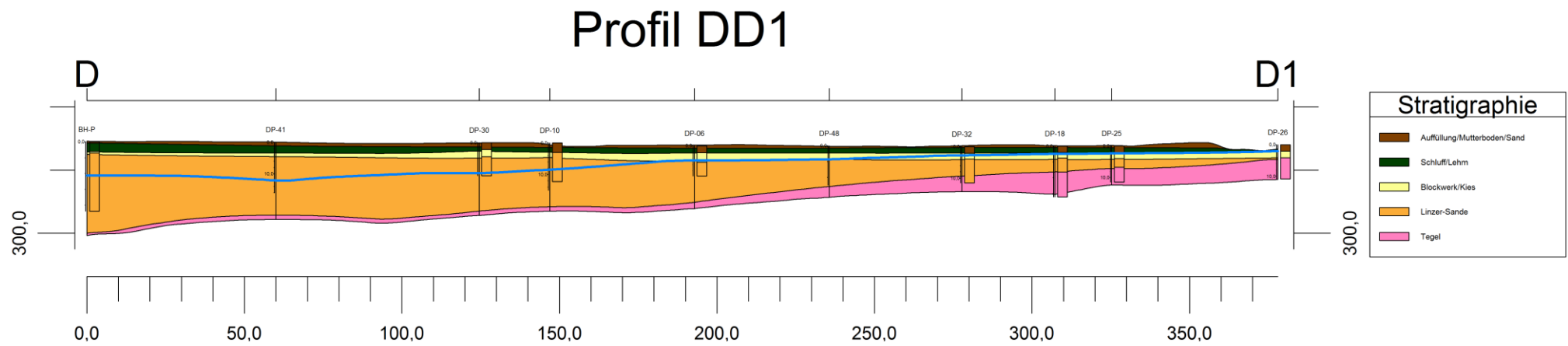


Abbildung 65: Profil DD1 (eigene Quelle)

Profil EE1

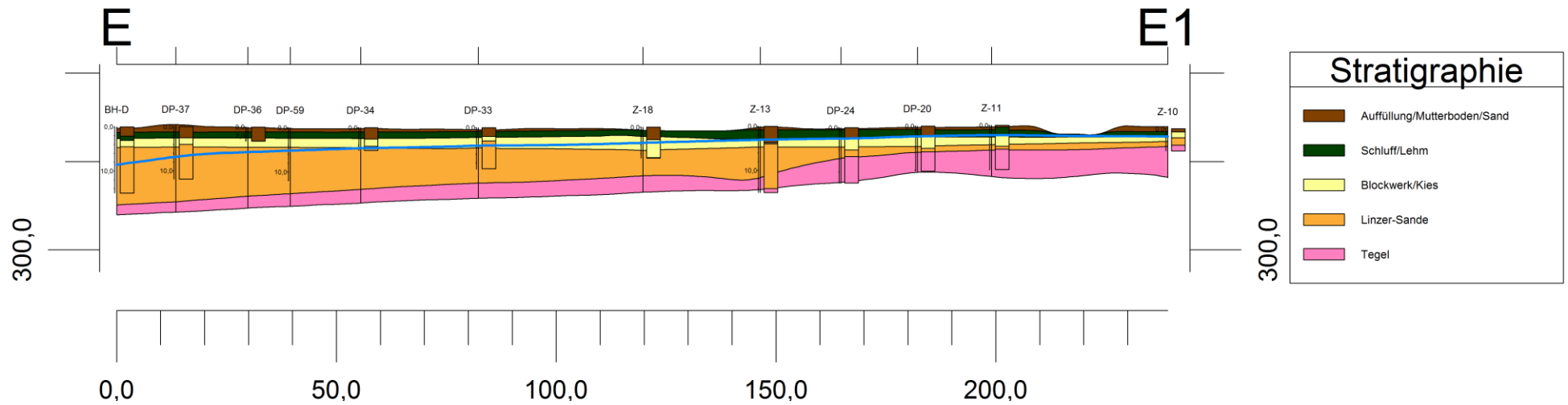


Abbildung 66: Profil EE1 (eigene Quelle)

Profil HH1

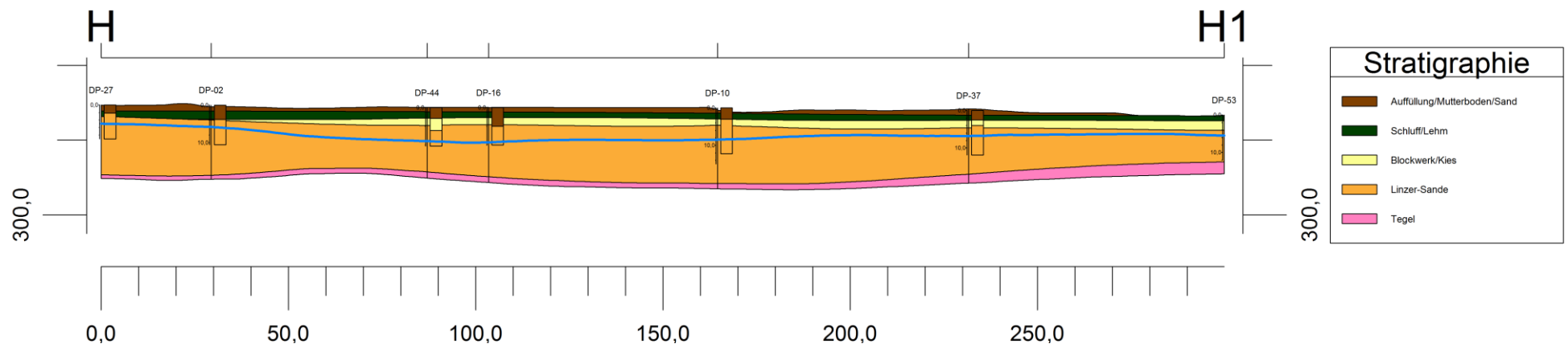


Abbildung 67: Profil HH1 (eigene Quelle)

Profil II1

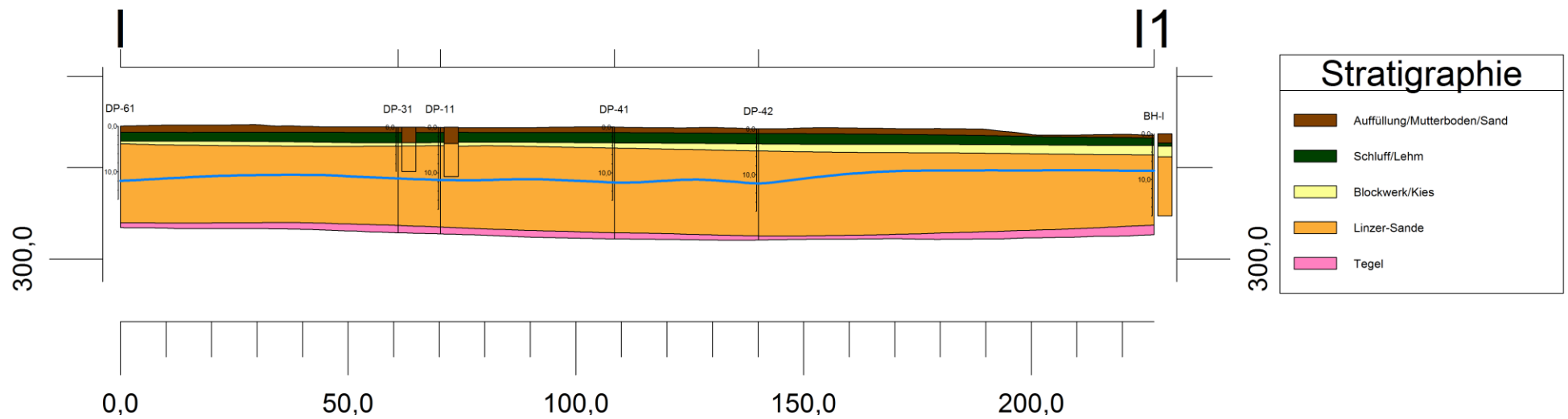


Abbildung 68: Profil II1 (eigene Quelle)

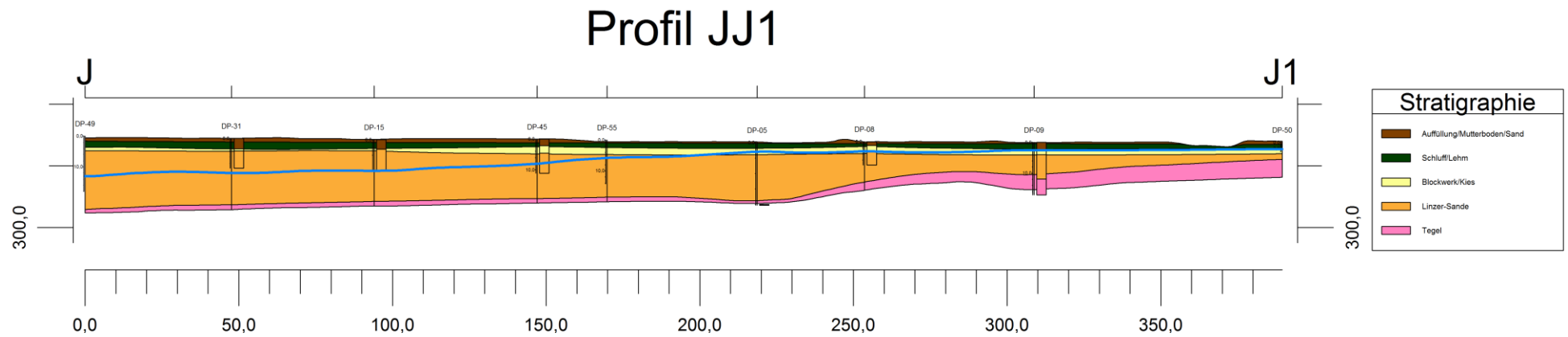


Abbildung 69: Profil JJ1 (eigene Quelle)

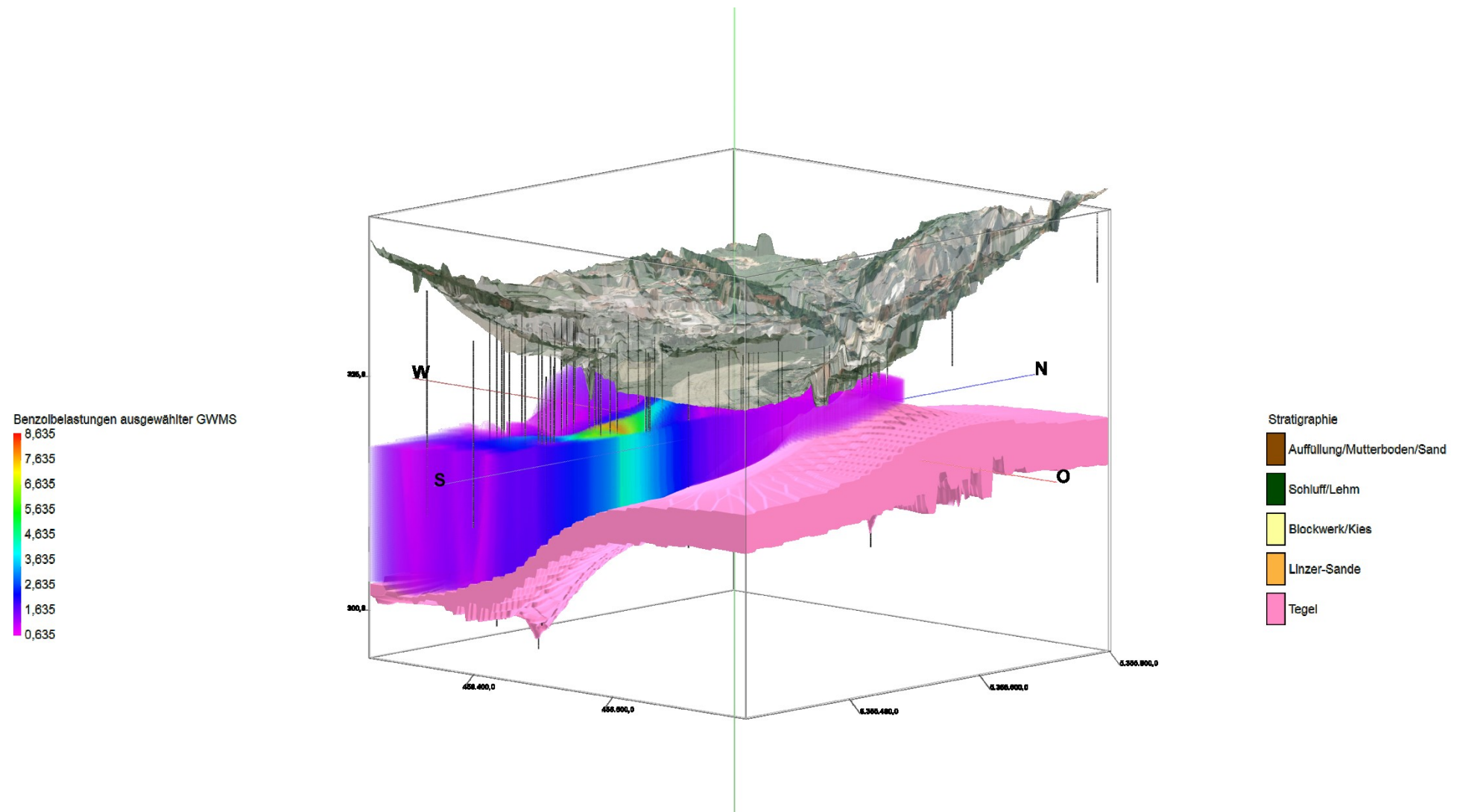


Abbildung 70: Benzolbelastung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle)

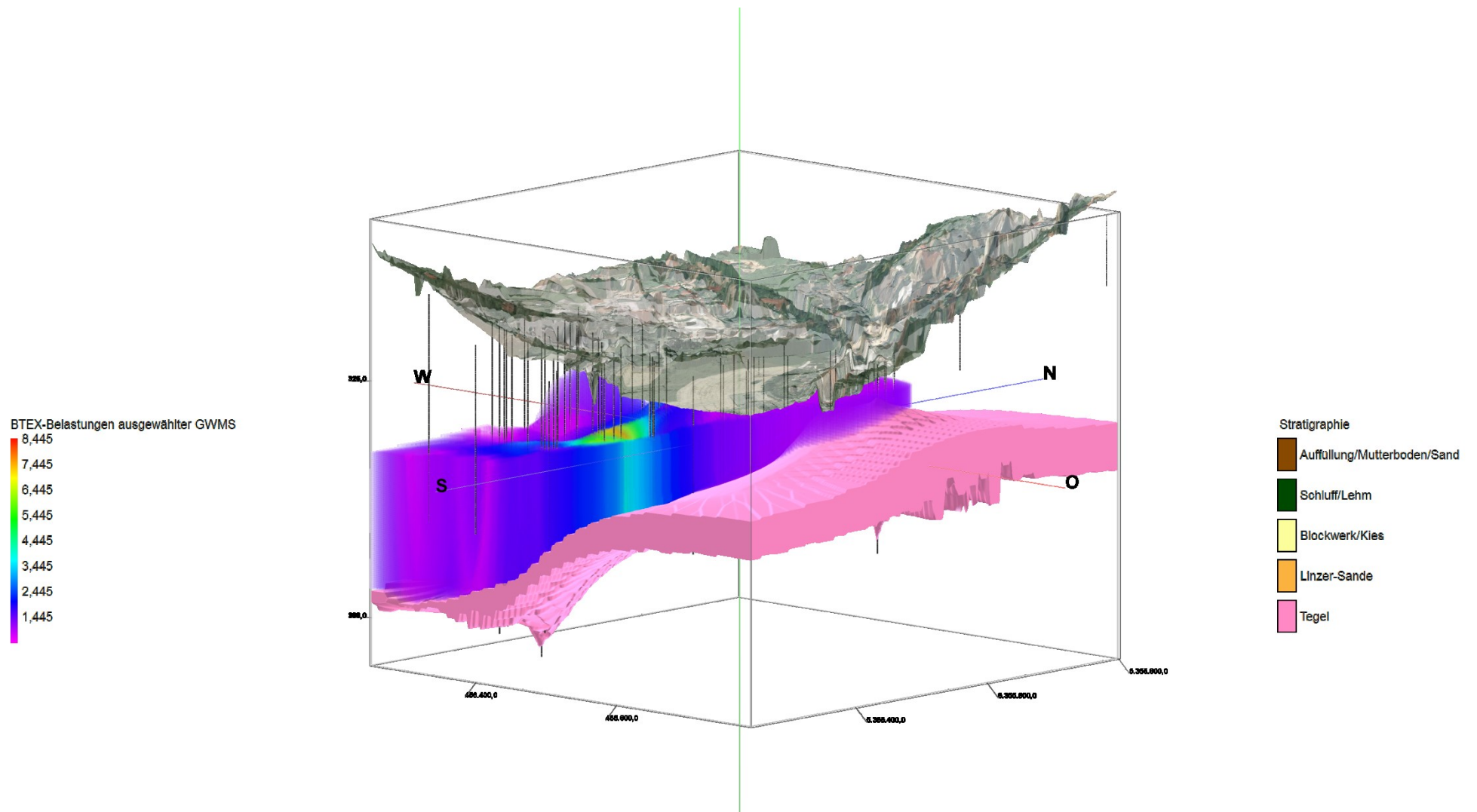


Abbildung 71: BTEX-Belastung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle)

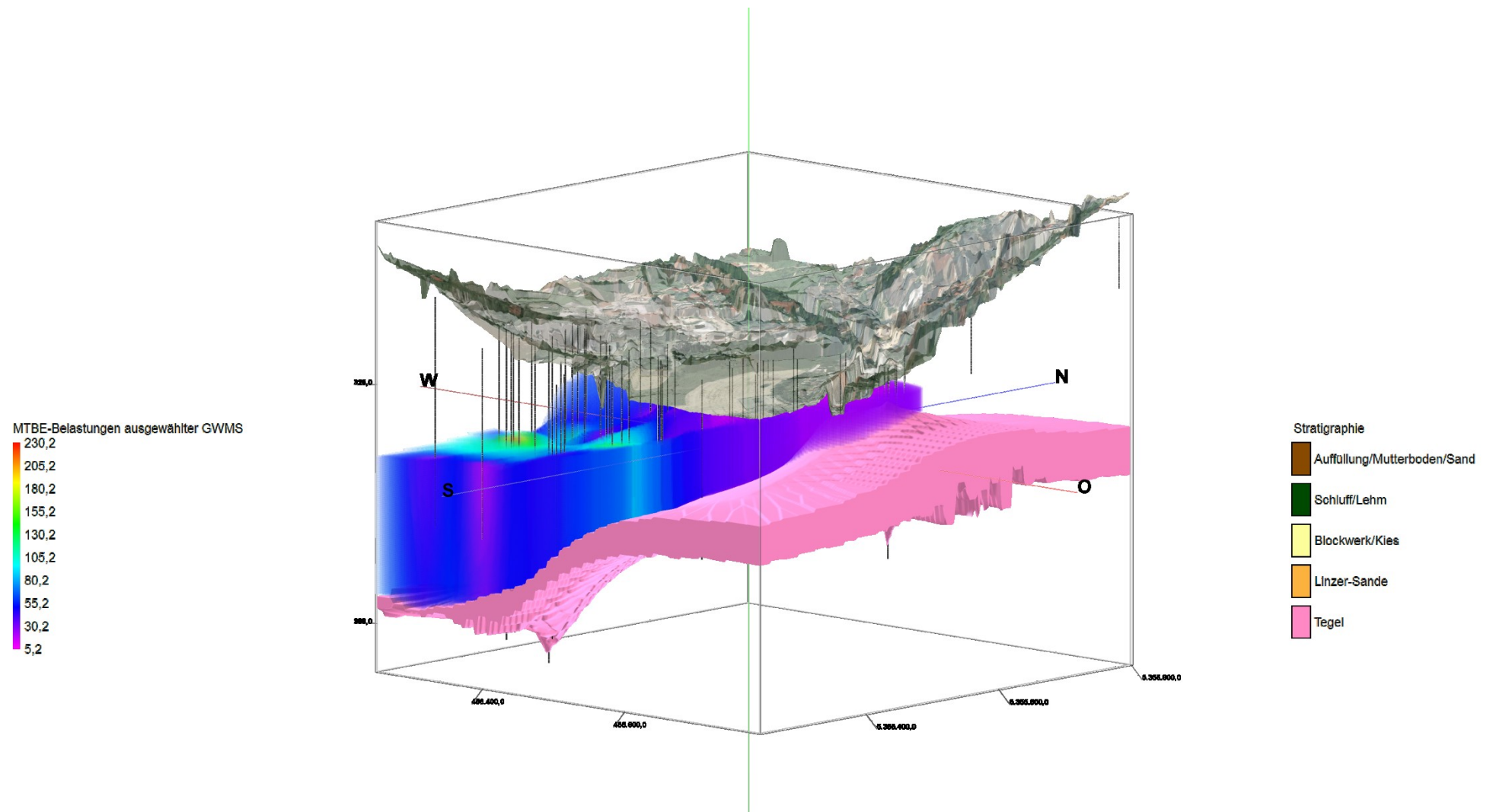


Abbildung 72: MTBE-Belastung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle)

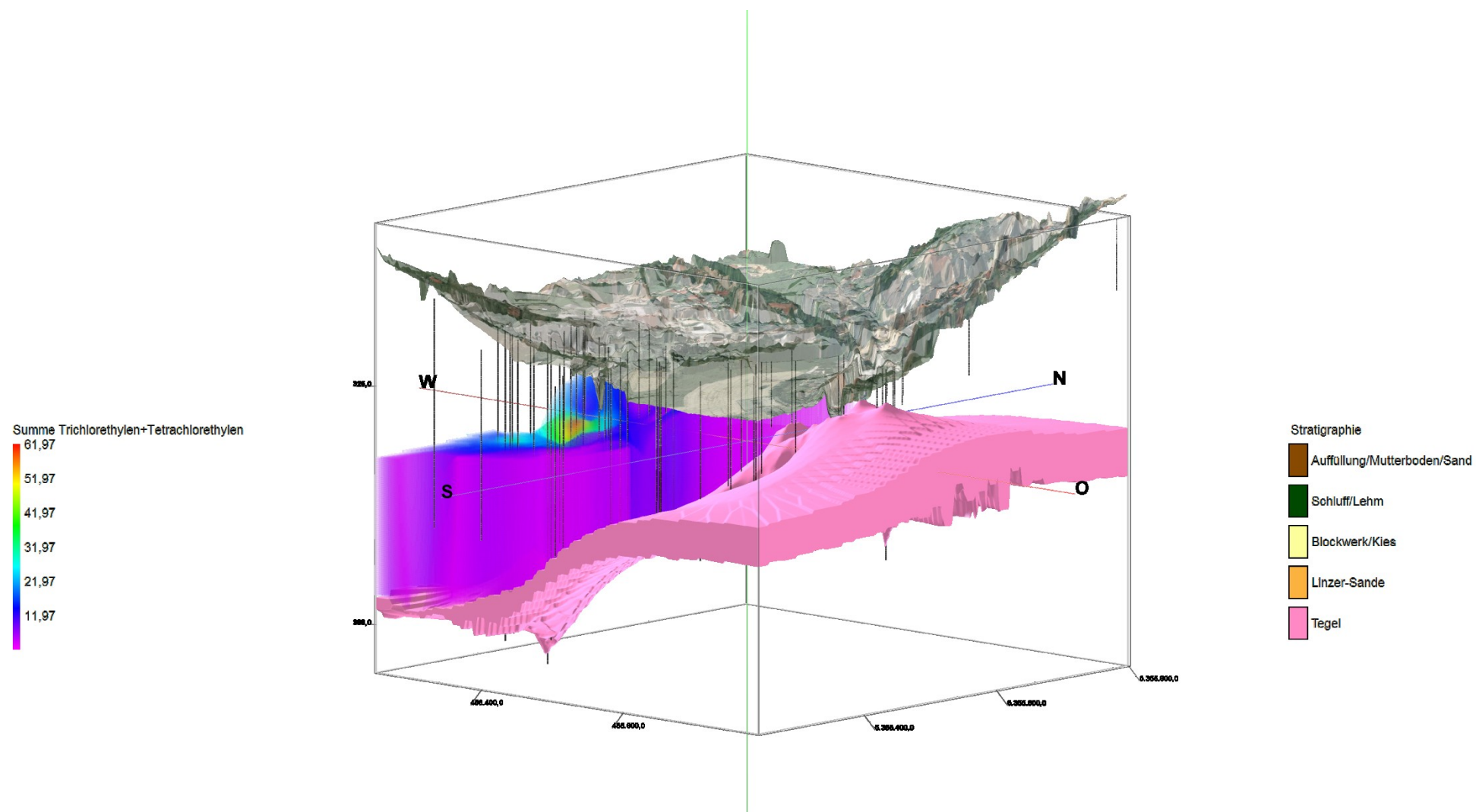


Abbildung 73: TriTetra-Belastung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle)

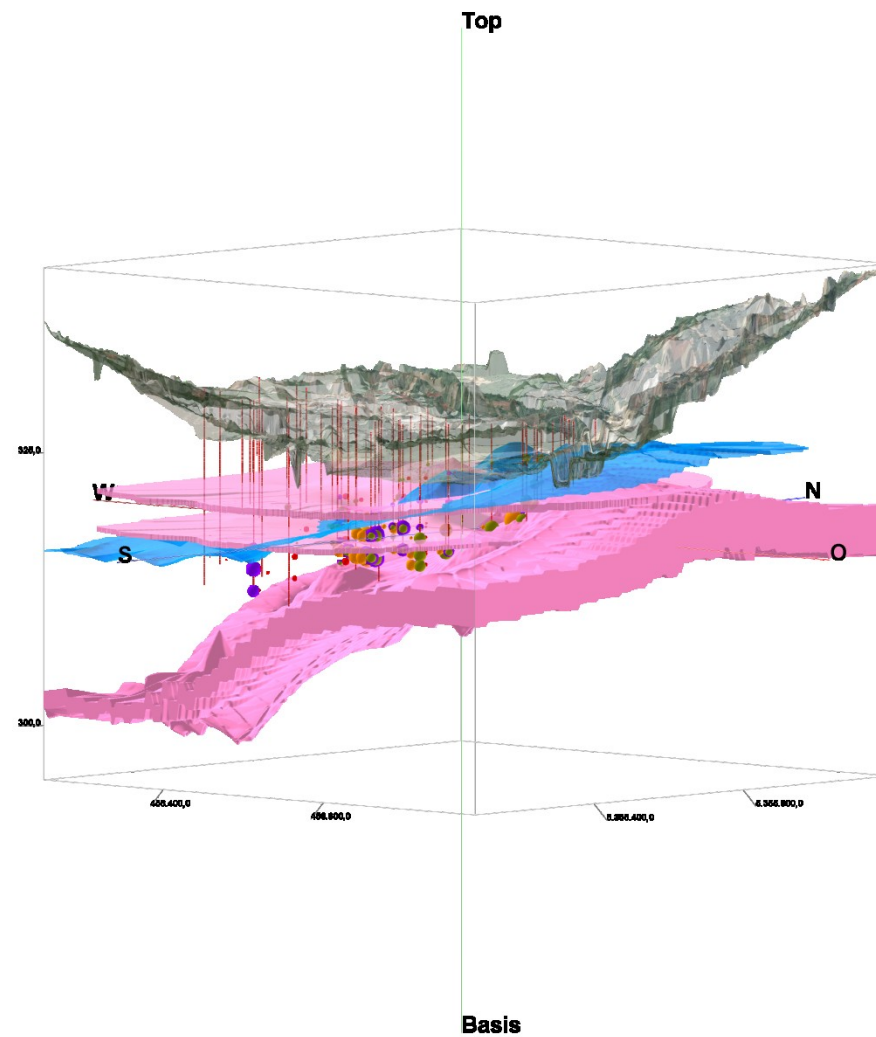


Abbildung 74: Sphärenmodellierung Nov.-Dez. 2010 (eigene Quelle)

Lebenslauf

Persönliche Angaben:

Geburtsdatum: 07.12.1985
Geburtsort: St. Pölten
Nationalität: Österreich
Familienstand: ledig

Hochschulausbildung:

Oktober 2005 bis Juli 2012:

*Diplomstudium Geographie an der Universität Wien mit Schwerpunkt
Kartographie und Geokommunikation*

Arbeitserfahrung und Praktika:

Seit Dezember 2012:

Vollanstellung als Projektleiter des NÖVOG-GIS

Seit April 2007:

Geringfügig beschäftigt NÖVOG (GIS – Datenpflege und Analysen, QS)

2006, 2007, 2008, 2009:

Mitarbeiter TEICH AG in Weinburg (Produktion) – jeweils 2 Monate

Okt. 2004 bis Sept. 2005:

Zivildienst an der Rettungsstelle des ASBÖ in Frankenfels

2003:

Mitarbeiter Fa. BRUCHA in Michelhausen (Montage) – 2 Monate

2002:

Mitarbeiter Fa. Zimmerei Dachdeckerei Wutzl in Frankenfels – 1 Monat

Schulbildung:

17. Juni. 2004:	<i>Matura</i>
2000 bis 2004:	<i>Oberstufenrealgymnasium in Scheibbs</i>
1996 bis 2000:	<i>Bundesrealgymnasium in Wieselburg</i>
1992 bis 1996:	<i>Volksschule in Frankenfels</i>

EDV Kenntnisse:

GIS	<i>ArcGIS, Manifold, MapPoint, QGIS, UDig, JUMP</i>
WebGIS	<i>UMN Mapserver, Geoserver, Mapbender</i>
Räumliche Datenbanken	<i>PostgreSQL (PostGIS)</i>
Textverarbeitung	<i>MS-Word, Powerpoint</i>
Datenverarbeitung	<i>MS-Excel, SPSS</i>
Grafik	<i>Illustrator, Photoshop, Director, InDesign</i>
3D	<i>Cinema 4D, Vue, Bryce</i>
3D Geologie	<i>Rockworks 15</i>
Homepage	<i>Dreamweaver</i>
Programmierung	<i>Grundkenntnisse PHP</i>
Bildverarbeitung	<i>ERDAS IMAGINE</i>

Sprachen:

Englisch	<i>fließend</i>
Spanisch	<i>Grundkenntnisse</i>

Ich versichere:

- dass ich die Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum

Unterschrift