



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„3D-Druck in den Geowissenschaften – Anwendungsbereiche und Qualitätsanforderungen an generative Fertigungsverfahren in den Geowissenschaften“

verfasst von / submitted by

Florian Hofer BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
Master of Science (MSc)

Wien, 2017 / Vienna 2017

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

A 066 856

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Kartographie und Geoinformation

Betreut von / Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Mein ganz besonderer Dank gilt jenen Menschen, allen voran meiner Familie, die mich vor Jahren dazu ermutigten sich der Herausforderung eines Studiums im zweiten Bildungsweg zu stellen. Bedanken möchte ich mich aber auch bei jenen Menschen, die mich während all dieser Jahre begleitet haben und Teil dieser unglaublichen Reise waren. Aber auch jenen Menschen die während all dieser Jahre, Teil dieser Reise wurden. Ohne euch wäre es nicht so spannend.

RRBC for Life

An dieser Stelle möchte ich mich aber auch bei jenen Personen sehr herzlich bedanken die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Allen voran bei Herrn Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl als Betreuer dieser Arbeit. Bei Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Florian Rist vom Institut für Kunst und Gestaltung der TU Wien für die Unterstützung bei den Laserscans und zu guter Letzt bei der Geologischen Bundesanstalt und ganz besonders bei Herrn Porpaczy Clemens, MSc, die das Untersuchungsobjekt für diese Arbeit zur Verfügung gestellt haben.

## Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, am 16.05.2017

# I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	i
II.	Abbildungsverzeichnis.....	iii
III.	Tabellenverzeichnis.....	vii
IV.	Abkürzungsverzeichnis.....	viii
V.	Abstract.....	ix
1.	Einleitung.....	1
1.1.	Hintergrund der Arbeit.....	2
1.1.1.	Persönliche Motivation.....	2
1.2.	Herausforderungen.....	3
1.3.	Fragestellung.....	4
1.4.	Methodik.....	4
1.5.	Inhaltlicher Überblick.....	6
2.	Geowissenschaften.....	8
2.1.	Begriffsbestimmung und Definition <i>Geowissenschaft</i> .....	8
2.1.1.	Systemtheorie in den Geowissenschaften.....	10
2.1.2.	Fazit.....	11
2.2.	Rolle der Kartographie und Geoinformation in den Geowissenschaften.....	12
3.	Informationsdarstellung.....	14
3.1.	Informationsdarstellung und Modellräume.....	14
3.2.	Visualisierungen und die dritte Dimension.....	16
3.3.	Vorteile physischer Modelle.....	17
3.4.	Fazit.....	18
4.	Einsatz physischer Modelle im Bereich der Geowissenschaften.....	20
4.1.	Physische Modelle im Bereich der Geographie, Meteorologie und Geophysik.....	23
4.1.1.	Vorläufer des generativer Fertigungsverfahren am Beispiel der Landschaftsmodelle und Reliefkarten.....	31
4.2.	Physische Modelle im Bereich der klassischen Erdwissenschaften.....	34
4.3.	Taktile Modelle.....	38
4.4.	Generative Fertigungsverfahren im Bereich der Geowissenschaften.....	39
4.5.	Zusammenfassung.....	46
5.	Generative Fertigungsverfahren.....	49
5.1.	Begriffsbestimmung und systematische Einteilung.....	50

5.2.	Grundprinzip der generativen Fertigung .....	54
5.3.	Faktoren der Genauigkeit .....	57
5.4.	Verfahrensablauf: Data - Digital Model - Touchable Model .....	58
5.4.1.	3D Modelle.....	59
5.4.2.	Datenformate .....	61
5.5.	Fertigungsverfahren.....	64
5.5.1.	Polymerisieren (SL).....	64
5.5.1.1.	Verfahrensgrundlagen Polymerisation / Laser- Stereolithographie.....	64
5.5.2.	Sintern- und Schmelzverfahren ((L)S) .....	68
5.5.2.1.	Verfahrensgrundlagen Sintern.....	69
5.5.3.	Schicht-Laminat-Verfahren (LLM).....	70
5.5.3.1.	Verfahrensgrundlagen Schicht-Laminate-Verfahren.....	70
5.5.4.	Extrusionsverfahren (FLM).....	72
5.5.4.1.	Verfahrensgrundlagen Extrusionsverfahren .....	73
5.5.5.	Three-Dimensional Printing (3DP) .....	74
5.5.5.1.	Verfahrensgrundlagen Three-Dimensional Printing.....	75
6.	Analyse der Druckverfahren.....	76
7.	Modellanalyse .....	83
7.1.	Analyse Ursprungsmodell (STL-Mesh Model).....	86
7.1.1	Analyse der Maschinendaten / Steuerungsdatei .....	90
7.2.	Analyse Untersuchungsobjekt (3D-Druck) .....	95
7.3.	Deviationsanalyse.....	100
7.3.1	3D-Scan .....	100
7.3.2	Ziel der Analyse .....	104
7.3.3	Deviationsanalyse mittels CloudCompare (Dokumentation) .....	104
8.	Ergebnisse .....	111
8.1	Fazit.....	121
9.	Diskussion .....	123
10.	Quellenverzeichnis .....	130

## II. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wissenschaftliche Grundlagen der Kartographie. (nach HAKE et al. 2002: 7 )Eigene Darstellung.....	13
Abb. 2: Ebenen der Kartographie und ihre Komponenten. Quelle: Eigene Darstellung nach KRIZ 1999: 50f....	15
Abb. 3: Bandwidth of Senses by. Tor Nørretranders. Quelle: <a href="https://terraframeblog.wordpress.com">https://terraframeblog.wordpress.com</a> .....	18
Abb. 4 V. l. n. r.: Imfeld X (1853-1909); Simon S (1857-1925); Imhof E(1895-1986); Meyer T(1940-2015) Quelle-Bilder: <a href="http://www.terrainmodels.com/artists.html">http://www.terrainmodels.com/artists.html</a> .....	23
Abb. 5: Große Windgälle, 3187 m (CH) 1:2000 163 x 307 cm, Eduard Imhof, 1938, Swiss Alpine Museum, Quelle-Bild: <a href="http://www.terrainmodels.com/pictures/artists/Imhof/windgaelle_9.jpg">http://www.terrainmodels.com/pictures/artists/Imhof/windgaelle_9.jpg</a> .....	24
Abb. 6: Relief von St.Gallen (CH) in Verbindung mit einer topographischen Karte des Gebietes. <a href="http://www.terrainmodels.com/pictures/applications/schoell.jpg">http://www.terrainmodels.com/pictures/applications/schoell.jpg</a> .....	25
Abb. 7: Detailansicht aus einer 3D Reliefkarte der Alpen, Quelle: <a href="https://www.interkart.de/landkarten/europa/westeuropa-landkarten/3d-reliefkarte-alpen-poster-klein.html">https://www.interkart.de/landkarten/europa/westeuropa-landkarten/3d-reliefkarte-alpen-poster-klein.html</a> .....	25
Abb. 8: Ausschnitt des Stadtmodells von Hamburg. Quelle-Bild: <a href="http://www.hamburg.de/contentblob/1441340/4d2ca156fa6f1bbb01d96b865ace221/data/stadtmodell-001.jpg">http://www.hamburg.de/contentblob/1441340/4d2ca156fa6f1bbb01d96b865ace221/data/stadtmodell-001.jpg</a> .....	26
Abb. 9: Geländemodell mit Luftfotos als Planungsgrundlage für ein Bauprojekt, (3D-Druck), Quelle-Bild: <a href="http://www.fabrica3d.de/grid?lightbox=i135um">http://www.fabrica3d.de/grid?lightbox=i135um</a> .....	28
Abb. 10: Historisches Stadtmodell von Linz (Bronze), Quelle Bild: <a href="http://www.landesmuseum.at/files/project/userdata/Foerderer-Ankaeufe/16_2009_Bronzemodell.jpg">http://www.landesmuseum.at/files/project/userdata/Foerderer-Ankaeufe/16_2009_Bronzemodell.jpg</a> ...	28
Abb. 11: Cinema4D Render der STL Datei von Hurricane Katrina 2005. Quelle-Datei: <a href="https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/hurricane-katrina">https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/hurricane-katrina</a> , Quelle-Bild: C4D Render .....	29
Abb. 12: Cinema4D Render der STL Datei eines Geoids. Quelle-Datei: <a href="http://oceanservice.noaa.gov/facts/geoid.html">http://oceanservice.noaa.gov/facts/geoid.html</a> , Quelle-Bild: C4D Render .....	30
Abb. 13: Abbildung eines Geoids inkl. thematischem Overlay des Schwerefeldes der Erde. Quelle-Bild: <a href="https://timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/geoid">https://timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/geoid</a> .....	30
Abb. 14: Detailaufnahme eines Landschaftsmodells in der Phase der Feinmodellausarbeitung. Das Streichholz dient zur Einschätzung der Größenverhältnisse. Quelle-Bild (C) Wolfgang Pusch ( <a href="http://bergmodelle.de">bergmodelle.de</a> ) .....	31
Abb. 15: TerrainTable der Firma Northrop Grunman. Quelle-Bild: <a href="http://blogs.walkerart.org/newmedia/files/2006/05/terrain-table1.jpg">http://blogs.walkerart.org/newmedia/files/2006/05/terrain-table1.jpg</a> .....	33
Abb. 16:3D-Modell der Visualisierungen der Erschütterungsintensität (Ground-Peak-Velocity) eines Erdbebens vom 24.08.2014 in San Francisco. Quelle-Bild: <a href="http://dougmccone.com/blog/wp-content/uploads/2014/09/all_tiles_above1.jpg">http://dougmccone.com/blog/wp-content/uploads/2014/09/all_tiles_above1.jpg</a> .....	34
Abb. 17: Kristallmodelle aus Aluminium und Holz, Quelle Bild: Eva Fessler <a href="https://www.uibk.ac.at/public-relations/presse/archiv/2015/603/bilder/pic_20150218085603_42a37d114a.jpg">https://www.uibk.ac.at/public-relations/presse/archiv/2015/603/bilder/pic_20150218085603_42a37d114a.jpg</a> .....	35
Abb. 18: Glas-Lasergravurmodell des Untergrundes von Wien in der Ausstellung Geologie3, Quelle-Bild: <a href="https://www.geologie.ac.at/fileadmin/_processed_/csm_ansicht_1_sw_dcfa3bd245.jpg">https://www.geologie.ac.at/fileadmin/_processed_/csm_ansicht_1_sw_dcfa3bd245.jpg</a> .....	36
Abb. 19: 3D Druck des Planungsmodells der U2/U5 Verlängerung in Wien, Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt.....	36

Abb. 20: Die versteinerten Zähne eines fleischfressenden Nanotyrannus-Sauriers, Quelle-Bild: <a href="http://www.handelsblatt.com/images/fossil-eines-nanotyrannus-sauriers/9101758/2-formatOriginal.jpg">http://www.handelsblatt.com/images/fossil-eines-nanotyrannus-sauriers/9101758/2-formatOriginal.jpg</a>	37
Abb. 21: Taktile Karte, Reliefkarte Europa, Quelle-Bild: <a href="http://www.mediablis-bayern.de/images/karte2_640.jpg">http://www.mediablis-bayern.de/images/karte2_640.jpg</a>	38
Abb. 22: Ama Dablam 6.858m, Mahalagur Himal, Nepal. Relief M:1:7.500, Quelle-Bild (C) Wolfgang Pusch (bergmodelle.de)	39
Abb. 23: Detailaufnahme Hohlichtgletscher, Relief Weisshorn M:1:10.000, Quelle-Bild (C) Wolfgang Pusch (bergmodelle.de)	40
Abb. 24: Sichtbarer Treppenstufeneffekt, Mount Everest Rohmodell aus dem 3D Drucker. M 1:1.000.000. Quelle-Bild: (C) Wolfgang Pusch (bergmodelle.de)	40
Abb. 25: 3D- Druck Geländemodell Quelle-Bild: <a href="https://www.3d-activation.de/information/anwendungsgebiete/">https://www.3d-activation.de/information/anwendungsgebiete/</a>	42
Abb. 26: Form des Kunsthauses Graz. Quelle-Bild: <a href="http://openbuildings.com/buildings/kunsthaus-graz-profile-38574#!buildings-media/0">http://openbuildings.com/buildings/kunsthaus-graz-profile-38574#!buildings-media/0</a>	43
Abb. 27: Tastmodell, Kunsthaus Graz, Foto: Universalmuseum Joanneum/M. Hal Quelle-Bild: <a href="https://www.museum-joanneum.at/blog/am-2-juni-barrierefrei-durchs-kunsthaus-graz/">https://www.museum-joanneum.at/blog/am-2-juni-barrierefrei-durchs-kunsthaus-graz/</a>	44
Abb. 28: Automatisch generierte taktile Karte der Seite touch-mapper.org, Bereich des Neuen Institutsgebäudes der Universität Wien, M 1:1800. Quelle-Bild: Hofer Florian C4D Render	45
Abb. 29: Farbe als thematischer Layer eines physischen Modells. „physical model of a surface interpolated from polygon-based data (average prices of building lots in 2003) Quelle-Bild: RASE 2006: 289, Fig.2	47
Abb. 30: Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren nach den Aggregatzuständen des Ausgangsmaterials in Anlehnung an die DIN 8580. – Quelle: GEBHARDT 2013:92	51
Abb. 31: Stufige Oberfläche als Folge des Schichtbauverfahrens, Prinzip. Dreidimensionales Volumenmodell (links) mit angezeichneten äquidistanten Schichten und das daraus entwickelte Schichtmodell (rechts) Quelle: FH Aachen. (GEBHARDT 2013: 22 Bild 2.1)	54
Abb. 32: Prinzipbedingte Stufung bei schichtorientierten Verfahren am Beispiel eines Zylinders. a) Zylinder parallel (quer) zur Schichtebene; b) Zylinder normal zur Schichtebene sowie Auswirkung der Schichtäquidistanz auf die Genauigkeit des Objektes – EIGENE DARSTELLUNG (nach GEBHARDT 2013: 22f Bild 21. u. 2.3)	55
Abb. 33: Schematische Darstellung einer Stützkonstruktion (orange) eines parallel zur Schichtrichtung liegenden Zylinders (Aufriss-Ansicht). EIGENE DARSTELLUNG (nach GEBHARDT 2013: 22f Bild 21. u. 2.3)	55
Abb. 34: Verallgemeinerte Darstellung der Datenwege für die Generative Fertigung (GEBHARDT 2013: 33 Bild 2.8)	59
Abb. 35: Unterschiedliche Auflösung desselben Körpers im STL Format. EIGENE DARSTELLUNG	61
Abb. 35: Definition eines Dreieckspatches im STL-Format und zugehöriger ASCII Datensatz oben (nach Hoffmann 95 und BRITE/EuRAM94 in GEBHARDT 2013: 36)	62
Abb. 37: Feingliederung der Polymerisations- und Stereolithographieverfahren. Übersicht und Fortführung von Abb. 30. – Quelle: GEBHARDT 2013:117.	65
Abb. 38: Einwirkung des Laserstrahls auf die Harzoberfläche: (li) Verhältnisse am Einzelstrahl (re)Voxelstruktur. - Quelle: GEBHARDT 2013: 107.	66

Abb. 39: Sinter- und Schmelzverfahren; Übersicht in Fortführung von Bild 30 Quelle: GEBHARDT 2013: 163 .....	68
Abb. 40: Schicht-Laminat-Verfahren; Übersicht in Fortführung von Bild 30 Quelle: GEBHARDT 2013: 228..	70
Abb. 41: Post-Processing beim LL. Quelle GEBHARDT 2013: 231 .....	71
Abb. 42: Extrusionsverfahren FLM; Übersicht in Fortführung von Bild 30 Quelle: GEBHARDT 2013: 248 ....	72
Abb. 43: 3D Printing-Verfahren; Übersicht in Fortführung von Bild 30 Quelle: GEBHARDT 2013: 264.....	74
Abb. 44: Zuordnung der generativen Verfahrensfamilien zu den unterschiedlichen Modelltypen nach VDI 3404 (Gültig nur für Modelle aus Kunststoff od. Modellmaterialien) Quelle-Bild: Eigene Darstellung nach GEBHARDT 2013: 330.....	78
Abb. 45: Vereinfachte Schichten des Wiener Untergrundes inklusive der Bezeichnung der Schichten. Quelle- Bild: © Geologische Bundesanstalt .....	85
Abb. 46: Gegenüberstellung der originalen STL-Druckdatei (rechts) und des bearbeiteten Objekts [Anzahl der Facets vervierfacht] (rechts) Quelle-Bild: Hofer Florian C4D-Render.....	88
Abb. 47: Detailansicht der Gegenüberstellung im Bereich inhomogenen Geländes. Quelle-Bild: Hofer Florian C4D Render. ....	89
Abb. 48: Visualisierung der .gcode Steuerungsdatei des Basement Elements Quelle-Bild: Screenshot.....	91
Abb. 49: Visualisierung der .gcode Steuerungsdatei des Basement Elements 2 Quelle-Bild: Screenshot.....	92
Abb. 50: Vollständige Visualisierung der .gcode Steuerungsdatei des Pannon Elements (Deckelement) inkl. Stützkonstruktion (Türkis) Quelle-Bild: Screenshot.....	92
Abb. 51: Querschnitt der .gcode Steuerungsdatei des Pannon Elements(Deckelement) inkl. Stützkonstruktion (türkis) Quelle-Bild: Screenshot .....	93
Abb. 52: Orientierung bei der Fertigung sowie Schichtlage der generierten Schichten am geologischen Modell. Quelle-Bild: Eigene Darstellung, C4D Render inkl. Overlay .....	93
Abb. 53: Seitliche Detailaufnahme der einzelnen geologischen Schichten. Quelle-Bild: Hofer Florian .....	96
Abb. 54: Detailaufnahme Basement Objekt. Quelle-Bild: Hofer Florian .....	96
Abb. 55: Detailaufnahme Bereich Wienerwald. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt.....	96
Abb. 56: Aufsicht #1. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt .....	97
Abb. 57: Aufsicht #2. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt .....	97
Abb. 58: Aufsicht #3. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt .....	98
Abb. 59: Aufsicht #4. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt .....	98
Abb. 60: Seitliche Detailaufnahme der einzelnen Schichten des Ursprungsmodells (C4D-Render) Quelle-Bild: Hofer Florian .....	99
Abb. 61: Modell mit Cyclododecan -Beschichtung. Quelle-Bild: Hofer Florian.....	101
Abb. 62: Abtasten des geologischen Schichtmodells mittels handgeführtem Laserscanner Model Maker MMD50. Quelle-Bild: Hofer Florian.....	102
Abb. 63: Artefakte nach dem Scanvorgang des vollständigen Objektes (vgl. Abb. 62) Quelle-Bild: Screenshot CloudCompare .....	102
Abb. 64: gesamte Scaneinheit – handgeführter Laserscanner inkl. Gelenkmessarm und Stativ und Laptop für die Datenaufnahme. Quelle-Bild: Hofer Florian.....	103
Abb. 65: Beide Modelle, geladen in der Arbeitsumgebung von CloudCompare Quelle: Screenshot.....	105

Abb. 66: Überlagerung der bounding-boxen (gelb) Punktdatensatz (weiß) und STL-Datensatz (grün-türkis) jedoch noch nicht endgültig ausgerichtet. Quelle: Screenshot.....	105
Abb. 67: Die beiden Objekte durch eine manuelle Rotation und Transformation aneinander ausgerichtet. Quelle: Screenshot.....	106
Abb. 68: Ergebnis der ICP Registrierung und Transformation. Die Farbgebung im Modell spiegelt die Zuordnung von align -, und reference Modell wieder (Abb. 68). Quelle: Screenshot .....	107
Abb. 69: Menüfenster der ICP Registrierung. Quelle: Screenshot.....	107
Abb. 70: Menüfenster Distance Computation Quelle: Screenshot.....	108
Abb. 71: Ergebnis der Distance Computation ohne Anpassung der Scalar Fields. Quelle: Screenshot.....	108
Abb. 72: Properties Menüfenster. Color Scale und SF display parameter. Quelle: Screenshot.....	109
Abb. 73: Propertiesmenü Scalar Field Parameter. Quelle: Screenshot .....	109
Abb. 74: Einstellungen im Color Scale Editor. Quelle: Screenshot.....	110
Abb. 75: Endergebnis der Deviationsanalyse in mm des kompletten geologischen Schichtmodells, Quelle: Screenshot.....	110
Abb. 76: Deviationsanalyse (in mm) des gesamten Schichtmodells. Quelle: Screenshot.....	112
Abb. 77: Ergebnisse der Deviationsanalyse (in mm) des gesamten Schichtmodells, unterteilt in die 3 Wertebereiche [-0,2-+0,2]oben, [min. - -0,2] mitte, [+0,2-max.] unten. Quelle: Screenshot.....	113
Abb. 78: Deviationsanalyse (in mm) des Basement Elementes Quelle: Screenshot .....	114
Abb. 79: Ergebnisse der Deviationsanalyse (in mm) des Basement Elementes, unterteilt in die 3 Wertebereiche [-0,2-+0,2]oben, [min. - -0,2] mitte, [+0,2-max.]unten. Quelle: Screenshot.....	115
Abb. 80: Deviationsanalyse (in mm) des Baden-Karpat-Elementes Quelle: Screenshot .....	116
Abb. 81: Ergebnisse der Deviationsanalyse (in mm) des Baden-Karpat-Elementes, unterteilt in die 3 Wertebereiche [-0,2-+0,2]oben, [min. - -0,2] mitte, [+0,2-max.]unten. Quelle: Screenshot.....	117
Abb. 82: Statistisches Modell des „Objektes gesamt“. Quelle: CloudCompare .....	119
Abb. 83: Statistisches Modell des „Basement“ Objektes. Quelle: CloudCompare .....	119
Abb. 84: Statistisches Modell des „Baden-Karpat“ Objektes. Quelle: CloudCompare .....	119
Abb. 85: Überhöhter Bereich des Gesamtmodells an der Oberfläche. Quelle: Screenshot.....	121

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der wichtigsten generativen Verfahren in Verfahrensfamilien inkl. englischer Bezeichnung und gebräuchlicher Abkürzung (GEBHARDT 2013: 101).....	52
Tabelle 2: Auflistung und Beschreibung der CAD-Elemente und Modelltypen inkl. Kurzbeschreibung der Eigenschaften und Eignung für die Generative Fertigung [GF] (nach GEBHARDT 2013: 30 Bild 2.) .....	60
Tabelle 3: Modelldefinitionen nach VDID und VDI. Aus: GEBHARDT 2013: 323 .....	76
Tabelle 4: Modelldefinitionen nach VDI 3404. Aus: GEBHARDT 2013: 323 .....	77
Tabelle 5: Unterschiede zwischen monochromem und polychromem 3D Druck. Quelle: <a href="http://3d-druckercheck.de/wissen/3d-farbdrucker/">http://3d-druckercheck.de/wissen/3d-farbdrucker/</a> (Stand 31.03.2017).....	79
Tabelle 6: Einteilung der Maschinen für die Generative Fertigung. Tabelle nach GEBHARDT 2013: 18 .....	80
Tabelle 7: Technische Daten und Information generativer Fertigungsanlagen. Zusammengefasst nach Verfahrensfamilien in Anlehnung an GEBHARDT 2013: 535 – 601 .....	80
Tabelle 8: Datenblatt Witbox 2: Quelle-Datenblatt: 3DEE Store Wien, Bild: <a href="https://i.otto.de/i/otto/18014557/bq-3d-drucker-witbox-2-weiss.jpg?\$formatz\$">https://i.otto.de/i/otto/18014557/bq-3d-drucker-witbox-2-weiss.jpg?\$formatz\$</a> (10.02.2017) ..	84
Tabelle 9: Analyse der Druckdaten inkl. Kennzahlen der Formkomplexität (Namensgebung der Schichten wurde übernommen von der GBA – Reihenfolge der Schichten in der Tabelle ist gleich der Reihenfolge am Objekt.).....	86
Tabelle 10: Maßzahlen der Formkomplexität der einzelnen Schichten des geologischen Modells. ....	87
Tabelle 11: Maßzahlen der Formkomplexität einer hohlen Halbkugel Beispiel Abb. 35 .....	87
Tabelle 12: Vergleich der Formkomplexitätskennzahlen gleicher Objekte mit unterschiedlichen Detaillierungsgrad. ....	88
Tabelle 13: Maßzahlen der Formkomplexität im Vergleich von Objekten mit unterschiedlichen Detaillierungsgrad.....	89
Tabelle 14: Technische Daten des Laserscanners MMD50 (Model Maker D50) Quelle-Bild: Hofer Florian .....	101
Tabelle 15: Größe der Punktwolken und Dateigröße der Scans des geologischen Modells .....	101
Tabelle 16: Kennzahlen der Punktwolken aller Elemente unbereinigt und bereinigt (SOR).....	118
Tabelle 17: Standardabweichung und Statistisches Mittel der Deviationsanalyse der Elemente.....	119
Tabelle 18: Schema eines möglichen Verfahrensablauf 3D-Druck, Eigene Darstellung.....	128

## IV. Abkürzungsverzeichnis

3DP	Three-Dimensional Printing
AMF	Additive Manufacturing File Format
CAD	Computer-aided design
CLI	Common Layer Interface
CT	Computertomographie
DEM	Digital Elevation Modell
DLP	Digital Light Processing
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FLM	Fused Layer Modeling
FTI	Film Transfer Imaging
GBA	Geologische Bundesanstalt
GF	Generative Fertigungsverfahren
GIS	Geoinformationssystem
LLM	Layer Laminated Manufacturing
LOM	Laminated Object Manufacturing
(L)S	Laser Sintering
MJM	Multi-jet Modeling
PLY	Polygon File Format
SGC	Solid Groung-Curing
SL	Stereolithographie
SLI	SereoLithography Interface
SLM	Selective LASER Melting
SLS	Selective LASER Sintering
STL	Standard Tessellation Language
SMS	Selective Mask Sintering
USGS	United States Geological Survey
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VDID	Verband Deutscher Industrie Designer
VRML	Virtual Reality Modeling Language

## V. Abstract

Visualizations in geoscientific disciplines are of great importance and value, from classic maps and general illustrations to digital and multimedia-based applications in various forms such as hyperglobes, virtual- or augmented reality. These visualizations are a key component in the scientific communication, within the scientific community or towards the public, official decisionmakers or in the area of education on all levels. 3-dimensional visualizations can be considered as standard in the scientific work by now. Through those, we are able to visualize complicated spatial relations in a very natural way, something that is a core component of every scientific research, especially in geoscientific disciplines. Real, physical 3-dimensional visualizations can also be found in the field of geosciences, but they are clearly in the minority compared with digital and analog forms of visualizations.

In recent years, a technology has developed very fast which creates the possibility to produce real 3-dimensional objects without relying on specialized professionals such as modelmakers: the technology of 3D-printing.

The technology itself is not new. Already developed in 1983, it is undergoing a constant development since, and has meanwhile arrived in the middle of society. The range of additive manufacturing devices extends from simple production units for households to highly complex machines used in industrial manufacturing processes.

The main goal of the thesis is to create a linkage between those two areas. The main focus is to combine the potential of 3D-models within the scientific communication, with the prospects of the technology of 3D-printing. Through the technology of additive manufacturing (3D-printing), which shifts the production of physical components, from specialized companies and production facilities to the end user, new possibilities arise to integrate physical models into a scientific discourse.

The thesis includes a theoretical review on the fundamentals of the 3D-Printing technology, as well as the area of 3-dimensional information representations in the context of geoscience. In addition to the theoretical review, a detailed analysis of a 3D-printed object is carried out in the practical part of this thesis.

# 1. Einleitung

Visualisierungen in geowissenschaftlichen Disziplinen haben einen hohen Stellenwert. Von klassischen Karten und Abbildungen, über digitale und multimediale Anwendungen in unterschiedlichsten Ausprägungen wie Hyperglobes, virtual-, od. augmented reality. Diese Visualisierungen sind essentielle Bestandteile der wissenschaftlichen Arbeit und Kommunikation, innerhalb der wissenschaftlichen Community sowie auch in Richtung der Öffentlichkeit, der politischen Entscheidungsträger, oder auch des Bildungswesens auf allen Ebenen. 3-dimensionale Visualisierungen gehören mittlerweile zum Standard des wissenschaftlichen Arbeitens. Durch sie ist man in der Lage komplizierte räumliche Sachverhalte direkt und sehr realistisch zu visualisieren. Etwas, dass gerade in geowissenschaftlichen Disziplinen zum Kern der Forschung zählt.

Echte, also physische, 3-dimensionale Visualisierungen sind im Bereich der Geowissenschaften durchaus zu finden doch sind sie, verglichen mit digitalen und analogen Formen der Visualisierung klar in der Minderheit.

In den letzten Jahren hat sich eine Technologie sehr stark weiterentwickelt die die Möglichkeit schafft, echte 3-dimensionale Abbildungen zu produzieren ohne dabei auf spezialisierte Bereiche wie den des professionellen Modellbaus angewiesen zu sein. Die Rede ist hier von 3D Druck.

Die Technologie des 3D Druckes ist keine neue. Bereits 1983 entwickelt und seitdem einer ständigen Weiterentwicklung unterzogen, ist der 3D-Druck in der Mitte unserer Gesellschaft angekommen. Die Bandbreite reicht von einfachen Fertigungsanlagen für den privaten Bereich bis hin zu hochkomplexen Fertigungsverfahren in der Industrie.

Diese Arbeit setzt sich zum Ziel diese beiden Bereiche miteinander zu verknüpfen. Hauptaugenmerk liegt darauf, dass Potential physischer Visualisierungen für die geowissenschaftliche Kommunikation mit den Möglichkeiten der Technologie des 3D-Drucks zu verknüpfen. Durch die Technologie der generativen Fertigung (3D-Druck), welche die Produktion von physischen Bauteilen, von spezialisierten Betrieben hin zu den Endanwendern / Endanwenderinnen verlagert, ergeben sich neue Möglichkeiten physische Modelle in einen wissenschaftlichen Diskurs zu integrieren.

Die Arbeit beinhaltet eine theoretische Aufarbeitung der Grundlagen des 3D-Druckes, sowie des Bereiches der 3-dimensionalen Informationsdarstellungen im Kontext der Geowissenschaften. Zusätzlich dazu, erfolgt eine ausführliche Analyse eines, generativ gefertigten, Modells aus dem Feld der Geologie im praktischen Teil der Arbeit.

## **1.1. Hintergrund der Arbeit**

In einer Lehrveranstaltung des Masterstudiengangs Kartographie und Geoinformation am Institut für Geographie und Regionalforschung wurde ein bis zu diesem Zeitpunkt nicht fertiges Landschaftsmodell der Region um den Schneeberg besichtigt. Da der Lehrveranstaltungsleiter meine berufliche Vergangenheit als Bildhauer kannte, wurde die Idee angesprochen, ich könnte mich doch im Zuge einer Masterarbeit mit dem Thema Landschaftsmodellbau auseinandersetzen. Wie auch in dieser Arbeit kurz angesprochen wird, hat der klassische Landschaftsmodellbau eine lange Tradition, die vermutlich auch regelmäßig in wissenschaftlichen Publikationen aufgearbeitet wird. Der Grundgedanke der Idee ist geblieben, nur ist der 3D Druck an die Stelle des klassischen Landschaftsmodellbaus gerückt. Grundsätzlich gibt es Literatur zu diesem Thema, wie die Publikationen von RASE (2006, 2009, 2010), HASUIK (2014 a, b) FAULKNER (2006) und CALDWELL (2001) zeigen. Die Technologie des 3D Drucks wird in diesen Arbeiten natürlich erwähnt, dass es aber auch innerhalb dieser Technologie mittlerweile sehr große Unterschiede in der Entwicklung gibt, wird eher selten angesprochen. Ziel der Arbeit ist es auch, die Unterschiede im Bereich der generativen Fertigung herauszustreichen und zu einem besseren Verständnis dieser Fertigungstechnologie beizutragen.

### **1.1.1. Persönliche Motivation**

Die persönliche Motivation, sich mit diesem sehr speziellen Thema zu beschäftigen, ergibt sich aus der vorstudienzeitlichen Tätigkeit und Ausbildung als Bildhauer. Obwohl der Bereich der Bildhauerei augenscheinlich wenig mit dem Feld der Kartographie und Geoinformation zu tun hat, ergeben sich doch Parallelen und Anknüpfungspunkte. Gerade im Bereich der Visualisierung sowie der Gestaltung kartographischer oder kartenverwandter Darstellungen kommt es speziell in der Kartographie immer wieder zur Verwendung des Begriffes „Kunst“. Auch wenn alles in den Wissenschaften den Rahmenbedingungen wissenschaftlicher Forschung folgt, so bewegt sich zum Beispiel die Kartographie auch oftmals über diese Grenzen hinaus und bedient sich der Werkzeuge und Mittel der Kunst. Als Beispiele nennen wir an dieser Stelle die atemberaubenden Panoramabilder des BERAN H.C. oder die eindrucksvollen Modelle des Reliefbauers MAIR T. Für mich als gelernten Bildhauer haben physische Modelle natürlich einen großen Reiz und begründen das ursprüngliche Interesse an der Thematik. Sich mit schon bewährten und lang gedienten Methoden und technischen Möglichkeiten im Bereich des physischen Modellbaus zu beschäftigen, scheint wenig sinnvoll. Der Reiz liegt in der Verbindung des vorhandenen (Bildhauerei) mit dem gelernten (Studium der Kartographie und Geoinformation) und dem neuen (3D Druck).

## 1.2. Herausforderungen

Wie bei jeder wissenschaftlichen Arbeit treten Herausforderungen oder Probleme auf, die nicht ignoriert werden können und beizeiten auch sehr wichtig für den Arbeitsprozess sind. Das Kapitel „Problemstellungen der Arbeit“ zu nennen würde eine zu negative Konnotation besitzen.

Eine sehr große Herausforderung stellt die Eingrenzung des Themas dar – gerade bei einer Arbeit, deren Inhalt auf den ersten Blick 3 riesige Themenbereiche (Geowissenschaften, Generative Fertigungsverfahren, Physischer Modellbau) beinhaltet. Deshalb war es unumgänglich, einen sehr engen Rahmen zu stecken, einen Rahmen, der einerseits zulässt, dass Themenbereiche ausreichend und ausführlich behandelt werden, aber klar abgegrenzt ist, um nicht in Details zu versinken, die nicht dem Ziel und dem Fokus der Arbeit entsprechen.

Das Feld der generativen Fertigung ist unglaublich dynamisch. Nicht ohne Grund wird dieser Technologiebereich sehr oft mit dem Begriff der „*dritten industriellen Revolution*“ in Verbindung gebracht (vgl. N.N. 2012). Obwohl der 3D Druck zentraler Bestandteil dieser Arbeit ist, kann diese Technologie nicht in ihrem ganzen Umfang berücksichtigt werden. Gerade die Fragen über die Wirtschaftlichkeit, die Kosten oder die eingesetzten Materialien können nicht ausreichend bearbeitet werden, da sie den Umfang der Arbeit sprengen würden. Gerade weil dieser Bereich so dynamisch ist, können Fragen nicht endgültig beantwortet werden, sondern sollten sich ebenso weiterentwickeln wie die Technologie selbst (vgl. BASILIERE 2011: 29).

Die Auswahl der Methode bzw. deren Durchführung musste anders als geplant erfolgen. In einem ersten Konzept war vorgesehen, Vergleiche an selbst gedruckten Modellen durchzuführen. Nach einiger Planung und Recherche stellte sich heraus, dass dies durch die anfallenden Kosten nicht realisiert werden konnte. Eine Neuorientierung in diesem Bereich war dadurch erforderlich. Nach eingehender Recherche nach bereits 3D-gedruckten Modellen im Bereich der Geowissenschaften wurde mit der Geologischen Bundesanstalt ein Kooperationspartner gefunden, der über die gesuchten Modelle verfügt und diese auch für die Untersuchungen der Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Eine geplante sozialwissenschaftliche Erhebung, um herauszufinden in welchen Bereichen der Geowissenschaften der 3D-Druck Anwendung finden würde, wurde gegen eine Deviationsanalyse ausgetauscht. Da (wie bereits angesprochen) ein Vergleich von selbstgedruckten Modellen aus finanziellen Gründen nicht durchführbar war, wurde eine neue Aufteilung zwischen dem theoretischen und dem praktischen Teil der Arbeit durchgeführt.

### 1.3. Fragestellung

Die Fragestellung stellt den Fahrplan der wissenschaftlichen Arbeit dar. Sie definiert den Rahmen der Arbeit. Den Kern der Arbeit bilden drei große Themenblöcke: die Geowissenschaften, 3D Druck od. generative Fertigungsverfahren <sup>1</sup>und jenen Bereich, der als Verbindungsglied der zuvor genannten Bereiche dient, nämlich den des physischen Modellbaus als kleinem Teilbereich in dem riesigen Feld der Geowissenschaften.

Ziel der Fragestellung ist es, gezielt auf den Überschneidungsbereich zwischen generativen Fertigungsverfahren sowie den Vorgaben und Anforderungen und vor allem den Möglichkeiten dieser Technologie im Bereich des physischen Modellbaus in den Geowissenschaften zu fokussieren.

Dabei sind die folgenden Fragen von Interesse und sollen durch diese Arbeit beantwortet werden.

**Welche Druckverfahren gibt es, welche Eigenschaften besitzen sie und welche sind für geowissenschaftliche Fragestellungen interessant?**

- Was wären potentielle Anwendungsbereiche im geowissenschaftlichen Umfeld?
- Welche Druckverfahren kommen dafür auf Basis ihrer Eigenschaften in Frage?

**Wo liegen die Vorteile und der Nutzen physisch-dreidimensionaler Informationsdarstellung?**

- Welche Vor- und Nachteile haben generative Fertigungsverfahren in diesem Zusammenhang?

**Welche Rolle spielen Generalisierung und Detaillierung im Zusammenhang mit generativen Fertigungsverfahren?**

- Wie genau sind generative Fertigungsverfahren?

**Wie sieht ein möglicher Verfahrensablauf aus?**

### 1.4. Methodik

Methodisch bedient sich die Arbeit zweier Bausteine. Ziel dieser methodischen Bausteine ist es, die für die Arbeit relevante Fragestellung nach den Kriterien des wissenschaftlichen Arbeitens umfassend zu

**Theoretischer Teil**

**Praktischer Teil**

---

<sup>1</sup> Der Begriff „3D-Druck“ wird in der Literatur als auch im täglichen Sprachgebrauch sehr oft verwendet. In einem wissenschaftlichen Kontext ist der Begriff der „generativen Fertigung“ dem Begriff des 3D-Druck vorzuziehen. Eine genauere und detaillierte Begriffserklärungen befindet sich im Kapitel 5.1

beantworten. Die zwei Bausteine des methodischen Fundamentes können wie folgt aufgegliedert werden.

**Theoretischer Teil:** Zentraler Bestandteil der theoretischen Aufarbeitung ist die Analyse und Gegenüberstellung der unterschiedlichen generativen Fertigungsverfahren (Kap.5). Hierbei liegt der Fokus auf einer umfassenden Darstellung der Technologie aus der Sicht eines Endverbrauchers, einer Endverbraucherin. Ziel ist es, die Funktionsweisen und Unterschiede der Technologie herauszuarbeiten, ohne dabei zu sehr in technische Details einzutauchen. Für den Standpunkt der gewählten Perspektive ist es weiters unumgänglich, eine genaue Begriffsdefinition durchzuführen. Im Zuge der Recherche musste festgestellt werden, dass sich eine einheitliche Terminologie im Bereich der generativen Fertigungstechnologien noch nicht durchgesetzt hat (vgl. GEBHARDT 2013: 3; FASTERMANN 2014: 11; HAGL 2015: 13f.).

Führt man den vorhin genannten Gedanken weiter, so ist die Technologie nicht alleiniger Schwerpunkt der Arbeit. Die Verknüpfung der EndverbraucherInnen, in diesem Fall die Geowissenschaften, mit den generativen Fertigungsverfahren bilden den Kern der Arbeit. Dafür muss der Begriff Geowissenschaften jedoch präzisiert werden. Der Überbegriff Geowissenschaften vereint unterschiedliche Disziplinen unter einem Dach. NEGENDANK (2000: 300 f.) spricht dabei sogar von einer integrierenden Überdisziplin (»Superdisziplin«). Daher wird eine deutliche Abgrenzung von Nöten sein, in Hinsicht darauf, wie der Begriff der Geowissenschaften in der Arbeit zu verstehen ist und welche Disziplinen er im speziellen für diese Arbeit berücksichtigt.

Ein weiterer Punkt, der im theoretischen Teil der Arbeit untersucht werden soll, ist eine überblicksartige Darstellung über das Potential von Visualisierungen mit Fokus auf geowissenschaftliche Disziplinen (Kap. 3). Hier soll im Hinblick auf die generativen Fertigungstechniken vorwiegend auf das Potential von 3-dimensionalen Visualisierungen eingegangen werden. In weiterer Folge werden einige Anwendungsbeispiele des physischen Modellbaus im Bereich der Geowissenschaften vorgestellt und in Verbindung mit generativen Fertigungsverfahren gebracht (Kap. 4).

Die Beispiele sollen helfen, gemeinsam mit dem praktischen Teil der Arbeit ein besseres Verständnis für diese spezielle Thematik zu entwickeln und Antworten auf die spezifischen Fragen zu finden, die in der Fragestellung dieser Arbeit definiert wurden.

**Praktischer Teil:** Der praktische Abschnitt beschäftigt sich vor allem mit dem Teil der Fragestellung, in dem die Anforderungen an die Qualität von generativen Fertigungsverfahren untersucht werden. Analysiert wird dabei ein Modell der geologischen Bundesanstalt (GBA), das den geologischen Untergrund Wiens visualisiert.

Kernstück der Arbeit bildet eine Deviationsanalyse. Das generativ gefertigte Modell wird dabei erneut vermessen und das dadurch digitalisierte Objekt mit dem ursprünglichen digitalen 3D-Modell in Beziehung gesetzt. Verwendet wird dazu das Programm *CloudCompare*, das in der Lage ist, Punktwolken mit Referenzobjekten zu vergleichen und die Abweichung (Deviation) zu messen.

## **1.5. Inhaltlicher Überblick**

Auf einige Themenbereiche und Inhalte mancher Kapitel wurde bereits kurz eingegangen. An dieser Stelle soll ein inhaltlicher Überblick über die Struktur der Arbeit Aufschluss geben. Alle Kapitel und relevanten Unterkapitel werden dabei kurz beschrieben.

Am Beginn der Arbeit in Kapitel 2 steht eine kurze Auseinandersetzung mit dem Begriff der Geowissenschaften, wie dieser Begriff definiert wird und vor allem wie der Begriff Geowissenschaften in dieser Arbeit zu verstehen ist. Die Arbeit bedient sich dazu zum Teil des theoretischen Konstruktes der Systemtheorie (Kap. 2.1.1). Auch die Rolle der Kartographie und Geoinformation und ihre spezielle Stellung im Bezug zu diesem Thema wird thematisiert (Kap 2.2).

Kapitel 3, in dem vorrangig das Thema der Informationsdarstellung behandelt wird, stellt ein Bindeglied zwischen den einzelnen Themenbereichen dar. Nach einer sehr überblicksartigen Einführung in das Thema (Kap 3 u. 3.1) richtet sich der Fokus ausschließlich auf die Frage der Informationsdarstellung in Bezug auf die 3. Dimension (Kap. 3.2 u. 3.3) und hier vor allem auf den Bereich der echten 3-dimensionalen Visualisierung.

Mit dem Bereich der echten 3-dimensionalen Visualisierung im Zusammenhang mit den geowissenschaftlichen Disziplinen beschäftigt sich Kapitel 4 eingehender. Überblicksmäßig werden dazu einige bekannte und auch unbekannte Beispiele vorgestellt (Kap. 4.1 4.2 u. 4.3) und diese dann in weiterer Folge direkt in Verbindung mit den Möglichkeiten der generativen Fertigung gebracht (Kap. 4.4) bevor in Kapitel 4.5 das Kapitel zusammengefasst wird.

Bevor jedoch endgültige Aussagen über 3D-Druck im Zusammenhang mit den Geowissenschaften getroffen werden können, wird in Kapitel 5 die dafür notwendige Grundlage zu diesem Thema erarbeitet. Nach einer einleitenden Begriffsbestimmung und einer Verortung der generativen Fertigung in der Welt der Fertigungstechnik (Kap. 5.1) werden die Grundlagen dieser Technologie von den verfahrenstechnischen Eigenheiten (Kap. 5.2 u. 5.3) bis hin zum Verfahrensablauf besprochen (Kap. 5.4). Anschließend werden in Kapitel 5.5 die fünf gebräuchlichsten und am weitverbreitetsten Verfahren beschrieben und die Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahrensfamilien herausgearbeitet.

Als Ergebnis der vorangegangenen Untersuchungen werden in Kapitel 6 die beiden Themenbereiche der echten 3-dimensionalen geowissenschaftlichen Informationsdarstellung und die generative Fertigung in Beziehung zu einander gesetzt

Ab Kapitel 7 fokussiert sich die Arbeit auf den praktischen Teil der Untersuchungen und analysiert dabei ein generativ gefertigtes Bauteil aus dem Bereich der Geologie. Nach einer Analyse der Ursprungsdatei und der Ermittlung einiger relevanter Kennzahlen (Kap 7.1) folgt eine Untersuchung des generativ gefertigten Objektes (Kap 7.2). Die so geschaffenen Grundlagen sind notwendig, um bei der anschließenden Deviationsanalyse (Kap 7.3) bereits ein Verständnis für das Modell entwickelt zu haben.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse des praktischen Teils der Arbeit zusammengefasst und anschließend in Kapitel 9 mit dem theoretischen Teil der Arbeit in Beziehung gesetzt.

## 2. Geowissenschaften

Geowissenschaften. Im Titel der Arbeit ist der Name sehr prominent vertreten, ohne jedoch genauere Aufschlüsse darüber zu geben, was sich hinter diesem vermeintlich „großen“ Namen verbirgt. Was ist Geowissenschaft? Handelt sich hierbei um eine eigenständige Wissenschaftsdisziplin oder ist es nur ein Begriff, der unterschiedliche wissenschaftliche Disziplinen unter sich vereint? Eingangs (Kap 1.4) wurde der Antwort bereits ein wenig vorweggegriffen und die Definition des Begriffes „Geowissenschaften“, wie sie im Lexikon der Geowissenschaften von J.F.W. NEGENDANK erläutert wird, in kurzen Auszügen beschrieben. Trotz der kurzen Einleitung zum Thema „Geowissenschaften“ muss der Begriff für die Verwendung in Arbeit weiter eingegrenzt werden. Dazu wird in einem nächsten Schritt erläutert, wo der Forschungsschwerpunkt der Geowissenschaften liegt und welche Disziplinen sich hinter diesem Begriff verbergen.

### 2.1. Begriffsbestimmung und Definition *Geowissenschaft*

Ein erster Schritt, sich der Frage nach dem genauen Inhalt der Geowissenschaften zu widmen, führt über die etymologische Dekonstruktion des Begriffes. Der Begriff „Geowissenschaften“ (Erdwissenschaften) setzt sich aus den beiden Wörtern *Geo* und *Wissenschaft* zusammen. Der Begriff „Geo“ hat den Ursprung im (alt)griechischen und ist gleichbedeutend mit dem Begriff »*Erde*« (<https://de.wiktionary.org>).

Diese sehr einfache Vorgehensweise liefert die ersten, aber unzureichenden, Hinweise darauf, welche Forschungsschwerpunkte dieser Wissenschaftsbereich innehaben könnte. Eine weiterführende Recherche in fachspezifischer Literatur ist daher unumgänglich. Aber auch in dieser lässt sich keine eindeutige Definition finden, die den Begriff „Geowissenschaft“ explizit und präzise definiert. Je nach wissenschaftlicher Teildisziplin ändert sich der Blickwinkel auf den Begriff und somit auch der Kern seiner Definition. Dies führt unweigerlich zu Konflikten, wenn man versucht, die Disziplinen zu nennen, die sich unter dem Dach der Geowissenschaften sammeln.

In der Definition des Begriffes im Geologischen Wörterbuch (MURAWSKI et al. 2010), also aus Sicht der Geologie, umfassen die Geowissenschaften *„alle jene Naturwissenschaften, die sich der Untersuchung des Aufbaus der Erde und ihrer Gesteine, ihrer Morphologie und Besiedelung sowie der Irdischen Wasser- und Lufthülle widmen. [...] Zu den G<sup>2</sup>. gehören: Geologie, Paläontologie, Mineralogie, Kristallographie, Petrologie, Geophysik, Meteorologie, Hydro(geo)logie, Geographie, Lagerstättenkunde, Geochemie, Bodenkunde, Meereskunde, Gletscherkunde, Geodäsie u. a.“* (MURAWSKI et al. 2010: 60).

---

<sup>2</sup> G - Geowissenschaften

Dieser erste Versuch, Teildisziplinen zu erörtern, scheint schon sehr erfolgreich zu sein. Es gibt eine klare Abgrenzung des Forschungsgebietes, eine Aufzählung unterschiedlicher Teildisziplinen und eine Beschränkung lediglich auf den Bereich der Naturwissenschaften. Betrachtet man nun die Geowissenschaften aus einem anderen Blickwinkel, nämlich dem der Geographie, so müsste man annehmen, dass die Definitionen sich gleichen, zumal die Geographie in der genannten Definition als Teilwissenschaft genannt wird. Im Wörterbuch Allgemeine Geographie (LESER H. et.al. 2010) trifft man schon zu Beginn auf den Umstand, dass sowohl der Begriff der Geowissenschaften als auch der der Erdwissenschaften getrennt voneinander erörtert werden und muss weiter feststellen, dass sich die Definition des Begriffes „Geowissenschaften“ nicht mit der aus dem Geologischen Wörterbuch deckt.

*„**Erdwissenschaften** earth science: auch als Geowissenschaften bezeichnet. Der Begriff E<sup>3</sup>. besitzt mehrere Bedeutungen. 1. Sammelbezeichnung für alle wissenschaftlichen Disziplinen die sich im weiteren Sinne mit der Erde beschäftigen. Dazu gehören Geographie, Geologie, Geophysik, Mineralogie, Pedologie und Petrologie. 2. Im engeren Sinne umfassen die E. die Geologie, Mineralogie, Pedologie und Teile der Physiogeographie. 3. Im engsten Verständnis werden zu den E. nur Geologie, Mineralogie und Teile der Pedologie gerechnet.“* (LESER et al. 2010: 199)

Interessant ist hierbei die Unterteilung des Begriffes in unterschiedliche Ebenen. Von einer sehr offenen, mehrere Disziplinen beinhaltenden, bis hin zu einer sehr strikten und engen Auslegung unter Punkt 3.

Bevor wir zur Definition des Begriffes „Geowissenschaften“ im Wörterbuch Allgemeine Geographie kommen, wollen wir noch eine weitere interessante Definition näher betrachten, die aus GÖTZE (2016) Einführung in die Geowissenschaften stammt, in der der Begriff wie folgt definiert wird:

*„Als **Geowissenschaften** werden diejenigen Naturwissenschaften zusammengefasst, welche sich mit dem Aufbau des Erdkörpers, mit seiner Entstehung und seiner Entwicklung beschäftigen. Ihre Disziplinen unterscheiden sich nach den Schwerpunkten ihrer Betrachtungsweise und nach der Art der Untersuchungsmethoden.“* (GÖTZE et al. 2016: 13ff.) In einer weiteren Erklärung werden einzelne Fachdisziplinen wie die Geologie, Paläontologie, Mineralogie, Petrologie, Geochemie, Geophysik, Geoinformatik, Fernerkundung und Geodäsie näher erläutert. Im Vergleich zu den vorherigen Definitionen ist diese anhand der genannten Disziplinen mit der Definition der Erdwissenschaften (LESER et al. 2010) im engeren Sinne zu vergleichen.

Interessant sind hierbei die Begriffe „Geoinformatik“ und „Fernerkundung“, die in diesem Zusammenhang in keiner anderen Definition zuvor erwähnt wurden. Vor allem die mit der Teildisziplin verbundenen Möglichkeit „Daten und Erkenntnisse [...] in Modellen zu simulieren, zu analysieren und zu visualisieren“. (GÖTZE et al. 2016: 14) wird hier herausgestrichen. Darauf wollen wir zu einem

---

<sup>3</sup> E - Erdwissenschaften

späteren Zeitpunkt aber näher eingehen, wenn die Frage nach der Rolle der Kartographie und Geoinformation im Gefüge der Geowissenschaften erörtert werden wird.

Wieder zurück zu LESER und seiner Definition des Begriffes Geowissenschaften, in der zum ersten Mal der Begriff „System“ od. „Systemtheorie“ eine Rolle spielt. „Geowissenschaften“ werden als eine *„Gruppe von verschiedenen Wissenschaften, die sich mit der Erde als Ganzes, Teilen davon oder kleineren biosphärischen Erdräumen beschäftigt. Die Erde oder ihre Teilräume werden holistisch – als Funktionssystem – von einem Prozessgefüge bestimmt, das terrigene, aber auch extraterrigene Komponenten enthält.“* (LESER et al. 2010: 292f.) In weiterer Folge werden auch einzelne Disziplinen genannt, deren Zuordnung jedoch auf Basis der Ebene variiert, von welcher man den Begriff betrachten will, ähnlich dem Begriff der Erdwissenschaften im selben Buch nur wenige Seiten zuvor. Im Lexikon der Geowissenschaften wird ähnlich zu LESER der systemtheoretische Gedanke in Verbindung mit den Geowissenschaften weiterverwendet. *„Geowissenschaften bzw. Erdwissenschaften sind einerseits ein Wissensfeld, die dessen Untersuchung die zeitliche Dimension seit Entstehung der Erde und der terrestrischen Planeten eine grundlegende Rolle spielt. Andererseits steht dabei immer mehr das Verständnis der laufenden aktiven Prozesse auf und in unserem aktiven (lebenden) Planeten im Vordergrund, für das die klassischen Disziplinen Biologie, Chemie, Physik und Mathematik die Grundlagen liefern. Man könnte die Geowissenschaften also als eine systemorientierte (problemorientierte) integrierende Überdisziplin (Superdisziplin) bezeichnen“* (NEGENDANK 2000: 300f.), in der die einzelnen Disziplinen und Teilbereiche in einer engen Beziehung zueinanderstehen.

### **2.1.1 Systemtheorie in den Geowissenschaften**

Sich mit der allgemeinen Systemtheorie und ihrer Rolle in den Naturwissenschaften eingehender zu beschäftigen, ist in dieser Arbeit nicht möglich. Trotzdem ist es unumgänglich, sie in ihrer Grundidee zu verstehen, um die Definitionen von NEGENDANK und LESER entschlüsseln zu können – umso wichtiger deshalb, weil die Definition von NEGENDANK und LESER auf Basis des systemtheoretischen Ansatzes die Grundlage für die Definition des Begriffes „Geowissenschaften“ liefert, wie er in dieser Arbeit verstanden wird.

Systemtheoretische Ansätze gibt es in vielen Wissenschaften; sie sind auf die Anforderungen der jeweiligen Disziplin zugeschnitten. Hinter der Allgemeinen Systemtheorie, also der Grundidee, steckt der Gedanke, dass sich diese auf keine spezielle Disziplin beschränkt, sondern von interdisziplinärem Charakter ist (vgl. ROPOHL 2009: 71). Die Intention hinter dem systemtheoretischen Ansatz war es von Beginn an, der *„Atomisierung der wissenschaftlichen Erkenntnis entgegenzuwirken“* (ROPOHL 2009: 72), um somit die einzelnen Teildisziplinen wieder näher aneinander heranzuführen und interdisziplinäres Arbeiten und die Einheit der Wissenschaft wieder an oberste Stelle zu bringen (vgl. ebd.). Die Kernaussage des Systemkonzeptes definiert ROHPOL wie folgt:

*„Die Eigenschaften und Verhaltensweisen höherer Ebenen sind nicht durch die Summation der Eigenschaften und Verhaltensweisen ihrer Bestandteile erklärbar, solange man diese Isoliert betrachtet. Wenn wir jedoch das Ensemble der Bestandteile und Relationen kennen, die zwischen ihnen bestehen, dann sind die höheren Ebenen von den Bestandteilen ableitbar“* (BERTALANFFY 1948: 25 zitiert von ROPOHL 2009: 72).

### **2.1.2 Fazit**

Umgelegt auf die Geowissenschaften bedeutet dies, dass die Geowissenschaften nicht bloß durch die Summe der einzelnen Disziplinen, die sie vereint, erklärbar sind, sondern durch die Summe der Disziplinen und der Beziehungen zwischen ihnen. Der Kern der Aussage liegt dabei auf dem interdisziplinären Gedanken der Geowissenschaften, die somit vor allem die Aufgabe hat, alle naturwissenschaftlichen Disziplinen, die sich mit Phänomenen, Strukturen und Prozessen auf, in und über der Erde beschäftigen, zu vereinen. Die Geowissenschaften bilden somit das Dach bzw. das Wissensfeld (um es mit den Worten NEGENDANKs zu sagen), um die teils sehr unterschiedlichen Disziplinen zu vereinen.

Als Beispiele für die unterschiedlichen Disziplinen aus dem Feld der Geowissenschaften werfen wir einen Blick auf die Universität Wien und die Fakultät für Geowissenschaften und listen auf, welche Disziplinen sich hier unter dem Dach der Geowissenschaften sammeln. Die „Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie setzt sich zusammen aus den Instituten und Departements: (Abgerufen unter <https://fgga.univie.ac.at/ueber-uns/institute-departments/> 08.05.2017)

- Institut für Astrophysik
- Departement für Geodynamik und Sedimentologie
- Institut für Geographie und Regionalforschung
- Departement für Lithosphärenforschung
- Institut für Meteorologie und Geophysik
- Institut für Mineralogie und Kristallographie
- Institut für Paläontologie

Dabei wird gleich bei der Namensgebung etwas ersichtlich, das bereits angesprochen wurde: Auch hier werden unter dem Namen „Geowissenschaften“ die klassischen Erdwissenschaften „Geodynamik und Sedimentologie“, „Lithosphärenforschung“ und „Mineralogie und Kristallographie“ zusammengefasst und die Geographie („Geographie und Regionalforschung“ und „Meteorologie und Geophysik“) nicht direkt in den Begriff der Geowissenschaften eingegliedert. Die Astrophysik als Teilbereich der Geowissenschaften wird bei den vorhergegangenen Begriffsbestimmungen nicht erwähnt. Die Beschreibungen und Erklärungen beziehen sich hauptsächlich auf Bereiche der Erde. Aus diesem Grund wird die Astrophysik in den weiteren Ausführungen nicht berücksichtigt.

## 2.2. Rolle der Kartographie und Geoinformation in den Geowissenschaften

Welche Rolle spielt nun die Kartographie und Geoinformation in diesem Gefüge? Die Frage muss natürlich gestellt werden, da diese Arbeit aus einer kartographischen Perspektive verfasst wird.

Es muss geklärt werden, welche Position die Kartographie im Gefüge der Geowissenschaft einnimmt und wie sie mit den anderen Wissenschaftsbereichen verknüpft ist. Antworten darauf findet man in HAKEs *Kartographie*, einem Standardwerk der Kartographie im deutschsprachigen Raum.

*„Die Kartographie ist ein Fachgebiet, das sich befasst mit dem Sammeln, Verarbeiten, Speichern und Auswerten raumbezogener Informationen sowie in besonderer Weise mit deren Veranschaulichung durch kartographische Darstellungen.“* (HAKE et al. 2002: 3). Wie sich die Kartographie im Laufe der Zeit entwickelt hat, ist nicht Thema dieser Arbeit. Jedoch sei erwähnt, dass die Stellung der Kartographie als eigenständige wissenschaftliche Disziplin nicht von Anfang an ausgeprägt war. Vielmehr wurde sie nur als Hilfsmittel für andere wissenschaftliche Bereiche gesehen (vgl. ebd.: 5f). Dies spiegelt sich auch in früheren Definitionen des Bereiches „Kartographie“ nieder, in denen die Kartographie immer wieder auf die „Karte“ als einziges Erkenntnisobjekt der Disziplin reduziert worden ist. Die Karte als ein Erkenntnisobjekt ist der Disziplin natürlich geblieben. *„In letzten 30 Jahren hat sich die Kartographie im Zusammenhang mit der allgemeinen Formalisierung von Informations- und Kommunikationsprozessen, ausgehend von der Kybernetik, und Semiotik, den Kommunikationswissenschaften und der Informations- und Kommunikationstechnologie, in fragestellungsorientierter und methodischer Hinsicht erheblich verändert“* (spektrum.de) und weiterentwickelt.

*„Die Merkmale der Kartographie verdeutlichen zwar ihre Eigenständigkeit in Theorie und Praxis, doch bedingt ihr sachbezogenes Wirken zwangsläufig auch eine enge Verknüpfung mit verschiedenartigen Wissenschaften und Berufsfeldern.“* (HAKE et al. 2002: 523). Was HAKE unter den Merkmalen der Kartographie versteht, wird in Abbildung 1 verdeutlicht.

*„Im Vorgang der Erfassung von Daten, vor allem ihrer Geometrie, sowie im Gebrauch der Werkzeuge zu ihrer Verarbeitung, Darstellung, Speicherung und Verwaltung beruht sie auf den mathematischen und technischen Prinzipien des Vermessungswesens, der Informatik, Reproduktionstechnik und Statistik. Dagegen geht es bei der Strukturierung der Bildzeichen, vor allem ihrer semantischen Objektmerkmale, sowie der Generalisierung und späteren Auswertung auch um den mehr geisteswissenschaftlichen Bezug einer spezifischen Zeichensprache.“* (ebd et al. 2002: 7).

Bei den Ausführungen wird deutlich, dass die Kartographie in einer ständigen Wechselbeziehung und einem regen interdisziplinären Austausch mit anderen Disziplinen steht. Wie eingangs erwähnt, spielt die Visualisierung durch kartographische, und kartenverwandte Produkte eine sehr bedeutende Rolle für andere Wissenschaften.

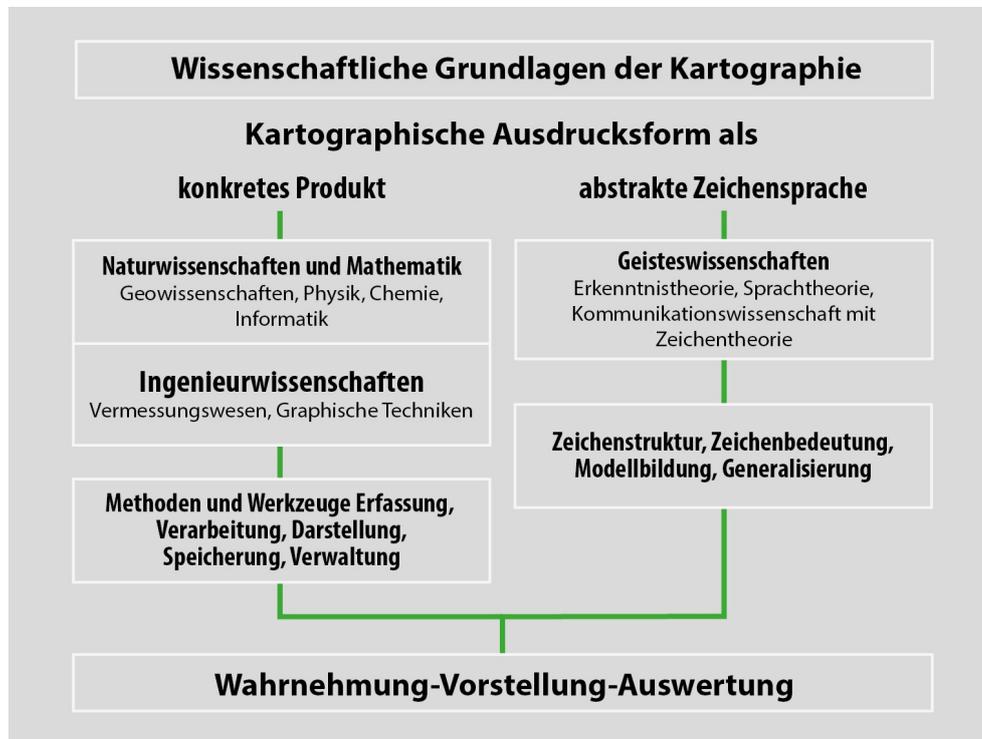


Abb. 1: Wissenschaftliche Grundlagen der Kartographie. (nach HAKE et al. 2002: 7) Eigene Darstellung

Die Rolle der Geoinformation bzw. von GIS ist hier in fundamentalen Bereichen gleich. Eine kurze Definition soll hier der Vollständigkeit halber angeführt werden.

„The ultimate purpose of GIS is to provide support for making decisions based on spatial data, as illustrated by a few geological examples [...] GIS achieves these major goals through one or more of the following activities with spatial data: organization, visualization, query, combination, analysis and prediction“ (BONHAM-CARTER. 1994: 3).

### 3. Informationsdarstellung

„Data is the new soil“ (McCANDLESS 2010) lautete die Kernaussage des Datenjournalisten David McCANDLESS in seinem Vortrag bei einem TED<sup>4</sup> Talk mit dem Thema „The beauty of data visualization“.

Obwohl der Fokus des Vortrages nicht auf geowissenschaftlichen Fragestellungen beruht, ist die Kernaussage generell auf viele Bereiche anwendbar. Vor allem in Bereichen, in denen durch die Verarbeitung von Grundlagendaten mittels Visualisierungen unterschiedlichster Art Produkte konzipiert werden, deren Aufgabe es ist, Informationen und Verbindungen wahrnehmbar zu machen, die aus einer rein tabellarischen Auflistung nicht erfassbar wären.

„But if you look at it [Rohdaten] directly, it's just a lot of numbers and disconnected facts. But if you start working with it and playing with it in a certain way, interesting things can appear and different patterns can be revealed.“ (McCANDLESS 2010: min. 5:05)

Visualisierungen (analoger oder digitaler Art) sind seit jeher essentieller Bestandteil aller Modellbildungen in geowissenschaftlichen Disziplinen. *„Modelle (wiederrum) sind Bestandteile der täglichen Kommunikation und Arbeitsmittel der Wissenschaft. Durch Ansatz mathematischer Beziehungen, graphischer Darstellungen, verbaler Formulierungen, körperlicher Nachbildung usw. nähern sie sich entsprechend dem jeweilige Erkenntnisstand mehr oder weniger gut der Wirklichkeit oder Teilen davon.“* (HAKE et al. 2002: 19). HAKEs generelle Definition über Modellbildung in der Wissenschaft knüpft an die Aussagen von McCANDLESS an, indem er die graphischen Darstellungen als ein wichtiges Kommunikationsmedium und essentiellen Bestandteil von wissenschaftlichen Arbeitsweisen ansieht. HAKE erwähnt auch den Begriff der körperlichen Nachbildung in Bezug auf die Beschreibung der Wirklichkeit oder Teilen davon. Deshalb ist die Beschreibung für diese Arbeit von besonderem Interesse. Wie diese Aussagen im Bezug zur Arbeit stehen, sollen die nun folgenden Erläuterungen klären, die sich zuerst mit den Möglichkeiten und Ausprägungen von graphischen Darstellungen beschäftigen und in einem weiteren Schritt mit dem Kernthema dieser Arbeit, nämlich der physischen Umsetzung von digitalen 3-dimensionalen Daten.

#### 3.1. Informationsdarstellung und Modellräume

Vorgelagert dem Prozess der Herstellung physischer Modelle durch generative Fertigungsverfahren steht eine digitale graphische Darstellung des Objektes, ein 3D-Datensatz, der zu Realisierung gelangt. In Kapitel 5.4 wird ein Verfahrensablauf skizziert und auf die speziellen Spezifikationen eingegangen, die Datensätze aufweisen müssen, damit sie überhaupt weiterverarbeitet werden können. Welche

---

<sup>4</sup> TED – Technology, Entertainment, Design (www.ted.com)

Aufgabe diese Visualisierungen innehaben und welche theoretischen Grundkonzepte ihr unterliegen, wollen wir uns in diesem Kapitel ansehen.

Kartographische Produkte spielen in allen geowissenschaftlichen Disziplinen eine essentielle Rolle, ob spezielle Karten für geologische Fragestellungen oder die Vielfalt der thematischen Visualisierungen in geographischen Fachgebieten. Aber auch abseits dieser klassischen Bereiche sind kartographische Produkte zu unseren ständigen WegbegleiterInnen geworden. Die klassische Karte als ausschließliches zentrales Forschungsobjekt der Kartographie gehört der Vergangenheit an. Die Anforderungen an das Fach sind, wie MacEACHERN klärt, anspruchsvoller und vielseitiger denn je.

„Modern cartography, thus, deals with a complex process of geospatial information organization, access, display, and use – with ‚maps‘ no longer conceived of a simply graphic representation of geospatial space, but as dynamic portals to interconnected, distributed, geospatial data resources.“  
(MacEACHERN et al. 2000: 5).

Die Geoinformation (und im speziellen die Kartographie) wurde, wie schon erwähnt, lange Zeit als Hilfswissenschaft gesehen (Kap 2.2) – als Hilfswissenschaft, deren Aufgabe unter anderem die Erstellung klassischer Kartenwerke war. Die Aufgabe der Kartographie hat sich über die Jahre verändert und erweitert. Sie hat sich zu einer eigenen wissenschaftlichen Disziplin entwickelt. Sie bleibt aber dennoch jene wissenschaftliche Disziplin, deren Fokus die Visualisierung und Verarbeitung raumbezogener Information ist, dies aber über die Grenzen der eigenen Disziplin hinaus. Kartographische Grundlagen wie die konzeptionellen Modellräume sind unter diesem Blickwinkel auch auf Visualisierungen anderer Disziplinen anwendbar. (Karto-) Graphische Darstellungen lassen sich in einen (karto)graphischen Modellraum einordnen, der aus den Ebenen **Dimension**, **Wahrnehmung** und **Gestaltung** besteht (Abb. 2).

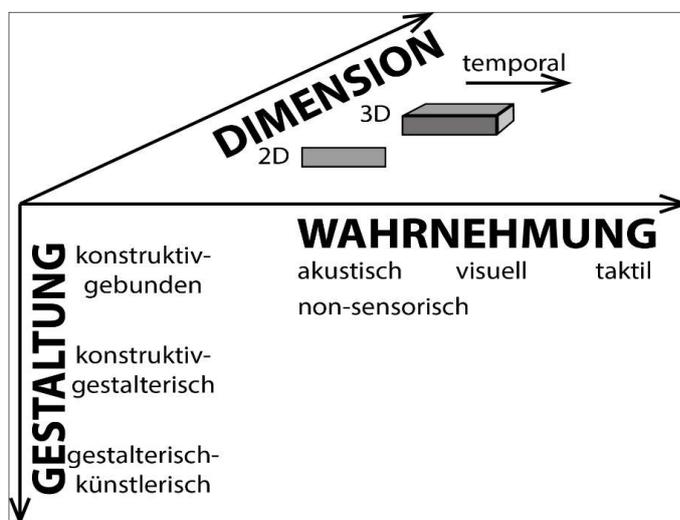


Abb. 2: Ebenen der Kartographie und ihre Komponenten. Quelle: Eigene Darstellung nach KRIZ 1999: 50f.

### **Dimension**

In allen Darstellungen mit Bezug zu Objekten der Realität kommt es unweigerlich zu einer Abstraktion derselben. Die Ausprägungen und der temporale Zustand der Objekte der Wirklichkeit unterliegen immer der Notwendigkeit der Generalisierung, also der Reduzierung auf den eigentlichen Informationsgehalt. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um eine klassische 2-dimensionale Abbildung einer

topographischen Karte, eine pseudodreidimensionale perspektivische Darstellung eines Blockbilds oder eine echte 3-dimensionale Darstellung in Form eines Reliefs handelt. Eine Reduzierung der Wirklichkeit auf die für den Erkenntnisgewinn essentiellen Bestandteile ist dabei immer unumgänglich.

### ***Wahrnehmung***

Wie in vielen anderen Bereichen spielt die visuelle Wahrnehmung eine bedeutende Rolle, wenn auch nicht die ausschließliche. Begründet in der anhaltenden Entwicklung und technischem Fortschritt werden zunehmend auch andere Wahrnehmungsbereiche angesprochen. Erwähnt sei hier nur die akustische Komponente bei Navigationssystemen oder die taktile Komponente bei physischen Modellen wie z.B. Karten für visuell-sensorisch beeinträchtigte Personen.

### ***Gestaltung***

Die dritte Ebene ist jene der Gestaltung, der Bereich, wo Funktionalität und Ästhetik im ständigen Zusammenspiel sind. KRIZ unterteilt die Ebene in drei Bereiche: eine konstruktiv-gebundene, eine konstruktiv-gestalterische und eine gestalterisch-künstlerische Form; sozusagen eine Entwicklung von der Funktionalität hin zur Ästhetik. Dabei muss festgehalten werden, dass Funktionalität und Ästhetik Eigenschaften sind, die in den Augen des Autors dieser Arbeit durchaus in einer Symbiose vorkommen können. (vgl. KRIZ 1999: 50f.)

Wo physische Modelle einzuordnen sind, bzw. welcher der Ebenen eine größere Bedeutung zukommt, ist auf den ersten Blick ersichtlich. Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal physischer Modelle ist die Möglichkeit, diese auch taktil zu wahrzunehmen. Ohne an dieser Stelle dem restlichen Kapitel vorgreifen zu wollen, kann dies jetzt schon als ein Alleinstellungsmerkmal angesehen werden.

## **3.2. Visualisierungen und die dritte Dimension**

Der Dimensionsbegriff und dessen Definition ist mit unterschiedlichen Bedeutungen belegt. Gerade in geowissenschaftlichen Fragestellungen liegen diesem Begriff unterschiedliche Definitionen und Auslegungen zu Grunde (vgl. LESER et al. 2010: 157. 950), wie auch der oben genannte Begriff der Dimension im (karto)graphischen Modellraum eine andere Bedeutung besitzt. Der Dimensionsbegriff für den Bereich der Geometrie, in dem wir uns bewegen, wird folgendermaßen definiert:

*„(Dimension ist) im gewöhnlichen Raum die drei Maße Länge, Breite, Höhe zur Beschreibung der Ausdehnung von Körpern. Ein Punkt hat keine, eine Linie eine Dimension, ein flächenhaftes Gebilde zwei, ein räumliches Gebilde drei Dimensionen. Die Anzahl der*

*Dimensionen eines Gebildes entspricht der Anzahl der zur Festlegung eines seiner Punkte notwendigen Koordinaten (HILBRING 2005: 9 od. vgl. wissen.de).“*

Solange ein Objekt nicht physisch vorhanden ist, bezieht sich der Begriff der 3-Dimensionalität bei Visualisierungen also immer auf den Darstellungsraum, expliziter ausgedrückt auf die Koordinatenachsen X, Y und Z, die den Darstellungsraum aufspannen (vgl. HILBRING 2005: 9). Die eigentliche Visualisierung bleibt dabei immer 2-dimensional, da Ausgabemedien wie Bildschirme, Virtual-Reality-Brillen, Hardcopies usw. immer auf diese Ebene (X/Y) reduziert bleiben.

Wichtig zu wissen: Stereoskopisches Sehen (räumliches Sehen) ist eine Eigenschaft, die auch der Mensch in seiner Evolution erst entwickeln musste. Denn die visuelle Information die unsere Augen an das Gehirn weiterleiten sind 2-dimensional. Erst durch das zusammenfügen der beiden Bilder im Gehirn entsteht der räumliche Eindruck (vgl. RASE 2009: 677f. u. dasgehirn.info 2016).

Hinter den beiden Begriffen „dreidimensional“ und „pseudodreidimensional“ stecken also im Grunde reine 2-dimensionale Abbildungen. Als „(echt) dreidimensional“ können nur physische Modelle bezeichnet werden. Alle anderen Darstellungen, deren Visualisierung auf ein zweidimensionales Medium beschränkt ist, werden daher als „pseudodreidimensional“ bezeichnet (vgl. BUCHROITHNER 1999: 1f.).

Das heißt aber auch, dass sowohl pseudodreidimensionale als auch physische Modelle, wenn vom Menschen optisch wahrgenommen, nur als 2-dimensionale Objekte „gesehen“ werden. Erst durch die Weiterverarbeitung im Gehirn werden diese in ein räumliches Bild umgewandelt.

Wo liegen also die Vorteile eines analogen physischen Modells, wenn unser Gehirn die als zweidimensional aufgenommenen Daten verarbeiten muss, egal ob das Modell dreidimensional oder pseudodreidimensional vorliegt?

### **3.3. Vorteile physischer Modelle**

*“On planar maps the third dimension is encoded by visual or graphic variables (size, lightness, color, texture, shape, orientation). The reader of the map must be able to decode the variables and mentally reconstruct the third dimension, perhaps assisted by a legend, but this process is not intuitive.*

*Some people have problems in decoding the visual variables of maps because they do not have the necessary training or experience, and then the message in the map is never received.*

*Humans have had a long training in interpreting 3D objects or pictures of objects and constructing them as 3D mental models. This experience is both evolutionary, from primates to homo sapiens, and individual from infant to adult” (RASE 2006: 286f.).*

RASEs Aussagen können dahingehend interpretiert werden, dass die Perzeption physischer Modelle im täglichen Sein des Menschen präsenter und verankert ist als die Perzeption von pseudodreidimensionalen Visualisierungen und deren anschließende Decodierung.

*„[...] the tools for consuming and editing content electronically exist and are really pretty good and there is just something about the tactile, physical nature of printed material that we prefer, in some circumstances” (FAULKNER 2006: 2).*

Mit dieser Aussage rückt ein weiterer Vorteil physischer Modelle in den Fokus. Denn damit wird es möglich, das schon angesprochene Alleinstellungsmerkmal physischer Modelle argumentativ zu untermauern, nämlich den Vorteil, die Modelle auch taktil erfassen zu können – eine Möglichkeit, die bei pseudodreidimensionalen Visualisierungen nicht gegeben ist.

### 3.4. Fazit

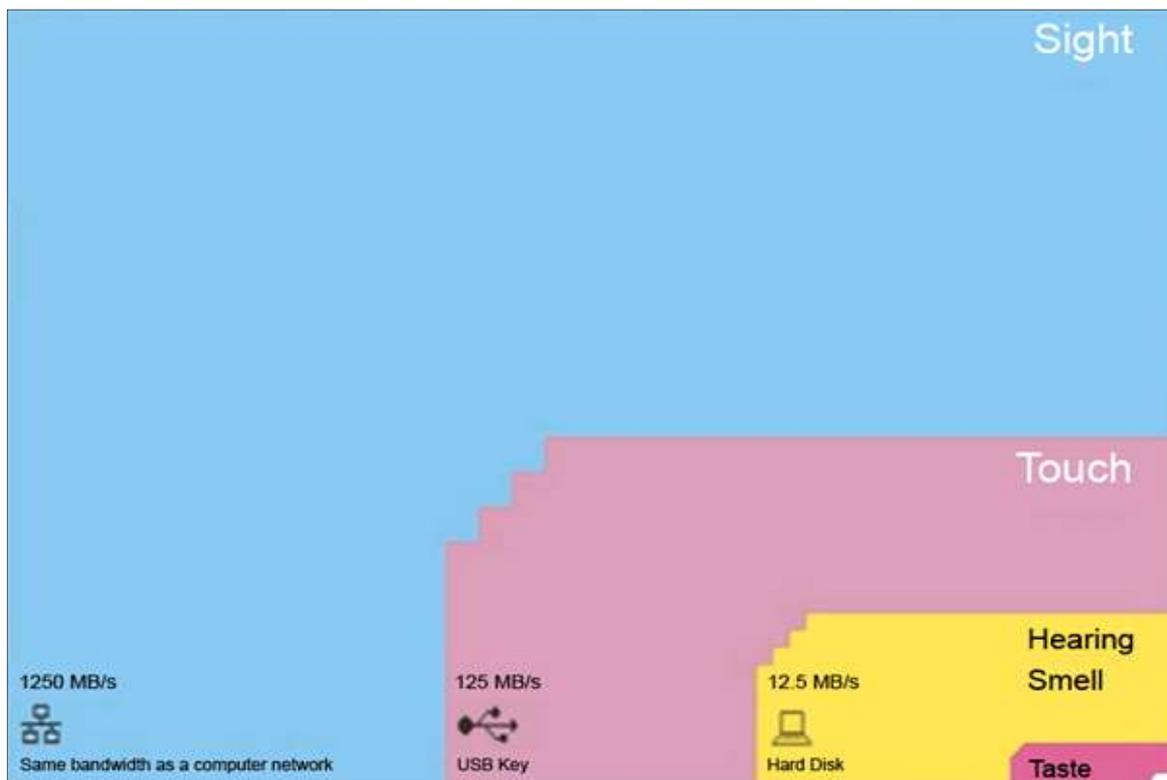


Abb. 3: Bandwidth of Senses by. Tor Nørretranders. *Quelle: <https://terraframeblog.wordpress.com>*

In dem eingangs erwähnten Vortrag von McCANDLESS verwies dieser auf den norwegischen Physiker Tor Nørretranders, der die menschlichen Sinnesorgane mit Bandweiten aus der Computertechnik vergleicht (Abb. 3) (McCANDLESS 2010: min. 9:15).

Die Visuelle Aufnahmefähigkeit wird hier mit der Bandbreite eines Computernetzwerkes gleichgesetzt, die taktile Wahrnehmung mit der eines USB-Sticks. Gemeinsam nehmen sie einen Großteil des möglichen sensorischen Spektrums eines Menschen ein. Darin liegt auch der Mehrwert physischer Modelle begründet. Sie ermöglichen eine Vergrößerung der perceptiven Bandbreite bei der Erfassung.

Die Möglichkeiten pseudodreidimensionaler Visualisierungen ist mit dem technologischen Fortschritt stark angestiegen. 3D-Visualisierungen finden mittlerweile in allen geowissenschaftlichen Disziplinen und darüber hinaus Anwendung. Ob 3D-Stadtmodelle, geologische Schichtmodelle, Visualisierungen in der physischen Geographie oder unterschiedlichste kartographische Produkte von Spezialanwendungen bis hin zu Alltagsprodukten wie Navigationssystemen oder online Kartendienste. Die Liste an Anwendungen ist lang und vielseitig.

Durch die Möglichkeit, Darstellungen mit Datenbanken zu verknüpfen, anhand der Variable Zeit den Modellraum um eine vierte Dimension zu erweitern und somit Dynamik in statische Sachverhalte zu bringen, sind pseudodreidimensionale Darstellungen für wissenschaftliche Zwecke sehr interessant. Das kann somit als Alleinstellungsmerkmal von digitalen pseudodreidimensionalen Darstellungen angesehen werden (vgl. RASE 2006: 286).

Technischer Fortschritt und Weiterentwicklung führten gleichzeitig dazu, dass sich im Bereich der generativen Fertigung seit den Anfängen dieser Technologie 1986 (Kap. 5), vieles rasant weiterentwickelt hat. Die Anzahl an unterschiedlichen Fertigungsverfahren und damit auch die technischen Möglichkeiten (siehe Kap. 5.5) sind gestiegen. Die Palette reicht von sehr komplizierten und aufwändigen Verfahren für hochtechnologisierte Bereiche wie die Luft- und Raumfahrt bis hin zu Anlagen für den privaten Bereich. (vgl. FASTERMANN 2014: 2, 4, u. Tabelle 7)

Die Voraussetzungen für die Anwendung bei geowissenschaftlichen Fragestellungen dieser Technologie ist grundsätzlich gegeben. Die Frage, welchen Nutzen „gedruckte“ physische Modelle haben, muss aber noch beantwortet werden. Aus den vorhergehenden Aussagen geht hervor, dass die Möglichkeit des taktilen Erfassens als ein Alleinstellungsmerkmal definiert werden kann. Da die generative Fertigung nicht das einzige Verfahren darstellt, mit dem physische Modelle erzeugt werden können, steht die Frage im Raum, welchen Vorteil aber auch Nachteil generative Verfahren zum Beispiel gegenüber den klassischen Methoden des Modellbaus haben?

## 4. Einsatz physischer Modelle im Bereich der Geowissenschaften

Grundsätze der Visualisierung oder, genereller ausgedrückt, Grundsätze der Informationsdarstellung, wie sie im vorhergehenden Kapitel behandelt wurden, gibt es viele. Ihr interdisziplinärer Stellenwert in den Wissenschaften ist unumstritten. HOROWITZ und SCHULTZ machen das einleitend in ihrem Beitrag deutlich. „*Data visualization is a core component of every scientific project, ...*” (HOROWITZ, et.al. 2014:138). Dieser Umstand wurde bereits in Kapitel 3 näher beleuchtet. Für die Arbeit relevant sind die weiteren Erläuterungen, liefern sie doch die Grundlagen und Begründungen, sich mit diesem Thema zu beschäftigen und auch jene Basis, auf der sich alle folgenden Untersuchungen stützen.

*„...however, generation of physical models previously depended on expensive of labor-intensive modeling, sculpting, or laser sintering techniques. Physical models have the advantage of providing not only visual but also tactile modes of inspection, thereby allowing easier visual inspection as well as access to the visually challenged. Recent advances in three-dimensional (3D) printing technology have created low-cost systems capable of translating 3D shape and terrain elevation models into physical models”*

(ebd. 2014:138)

HOROWITZs Erklärung ist dabei sehr umfassend, spricht er doch von Wissenschaften generell. Sie unterstreicht aber auch die schon getätigte Aussage, dass ein großer Vorteil gegenüber anderen Visualisierungen (nicht physischer Art) die Möglichkeit der taktilen Erfassung ist. Ein wenig drastischer, dafür aber zielgerichteter auf das Feld der Geowissenschaften, stellt sich hier die Aussage von HASIUK dar. Trotzdem sollen einige Punkte an dieser Stelle herausgestrichen werden, die für die weitere Bearbeitung des Themas relevant sind. HOROWITZ und SCHULTZ beschreiben die klassische Art des physischen Modellbaus als teuer (*expensive*) und arbeitsintensiv (*labor-intensive*) im Vergleich zu den Kosten, die durch eine generative Fertigung anfallen würden. Sie unterstreichen auch, wie wichtig physische Modelle für Blinde oder Menschen mit Sehschwäche sind. Ein Argument, das sich im Zusammenhang mit physischen Modellbau für wissensvermittelnde Zwecke in sehr vielen Artikeln und Büchern wiederfindet.

*„Geoscientists are some of most prolific producers of three-dimensional (3-D) data. These data do not belong in our computers – they belong in our hands. The power of computers to make accurate and speedy calculations on 3-D data sets is impossible for humans to match. Likewise, the power of the human mind and its sensory system to perceive qualitative aspects of physical objects is currently beyond computers.”*

(HASIUK 2014: 28)

Die beiden Zitate sollen auch die schon in diese Richtung getätigten Aussagen auf den vorhergehenden Seiten untermauern, die dort aber in einem generellen Kontext stehen. HASIUKs Aussagen sind dahingehend relevanter, da sie sich speziell auf die Geowissenschaften beziehen. Seine drastische Ausdrucksweise, dass 3-dimensionale Daten als physische Modelle vorhanden sein sollen und nicht als digitale Modelle an Computersysteme gebunden, wirkt aber zu drastisch – in der Hinsicht, als dass bereits festgehalten wurde, wo der Vorteil von digitalen Daten liegt, nämlich in der Verknüpfung von Darstellungen mit Daten unterschiedlichster Art und der Erweiterung um eine 4. Dimension (vgl. Kapitel 3.4 S.18), etwas das physischen Modellen größtenteils verwehrt bleibt. Diese Definition unterstützt jedoch die Aussagen aus Kapitel 3.3 (Abb. 3), dass etwas taktil erfassbares, gepaart mit den angeborenen sensorischen Fähigkeiten eines Menschen, den Tastsinn betreffend, in keinem Vergleich zur digitalen Wiedergabe oder Erfassung steht.

*“In an era filled with virtual reality and other digital interactive three-dimensional spaces, physical models may seem outdated. However, the straightforward simplicity of physical models makes them appealing and accessible. Conversely, relatively few people are trained to operate the sophisticated software for visualizing terrain. Ideally, virtual modeling and physical terrain modeling should be seen as complementary rather than competitive technologies. Together they provide natural multiple modalities and media for viewing the terrain.”*

(CALDWELL 2001: 66)

CALDWELLs Aussagen sind im Vergleich dazu nicht mehr so drastisch und können als Erweiterung von RASEs erwähnten Vorteilen digitaler 3-dimensionaler Visualisierungen gesehen werden. Auch aus dieser Beschreibung sollen einige für die weitere Untersuchung relevante Punkte herausgestrichen werden. CALDWELL beschreibt physische Modelle als ansprechend, reizvoll, attraktiv (appealing), etwas, das wir zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal aufgreifen werden, handelt es sich doch um ein sehr subjektives Argument. Eine weitere Aussage, die CALDWELL hier tätigt, ist die, dass wenige Nutzer im Umgang mit anspruchsvoller 3D-Software geübt sind. Seit der Publikation 2001 hat sich in diesem Sektor vieles verändert und dreidimensionale Darstellungen sind in vielen Bereichen unseres Alltags schon Usus. Schon auf die AnwenderInnenebene beschränkt hat sich seit 2001 sehr viel weiterentwickelt. Auf der HerstellerInnenebene sind nach wie vor spezielle Kenntnisse notwendig, um dreidimensionale (nicht physische) Visualisierungen zu verwirklichen. CALDWELL spricht von einer sich gegenseitig befruchtenden Koexistenz physischer und digitaler Visualisierungen. Man kann CALDWELL hier nur zustimmen, wir gehen jedoch einen Schritt weiter und verweisen darauf, dass gerade in der Verbindung von physischen und digitalen Visualisierungen neue Wege beschritten werden, wie wir noch an Beispielen sehen.

Welche Möglichkeiten und Formen des physischen Modellbaus finden wir nun in den Geowissenschaften vor? Diese Frage ist nicht einfach zu beantworten. Die Gesamtheit aller möglichen physischen Modelle im Bereich der Geowissenschaften zu erfassen ist in diesem Umfang nicht durchführbar. In Kapitel 2 wurde schon ersichtlich das alleine eine Begriffsbestimmung bzw. Definition des Begriffes der Geowissenschaften nicht sehr einfach ist. Somit bedarf es einer vorherigen Strukturierung, wenn die Frage nach den in den Geowissenschaften verwendeten Modellen beantwortet werden soll. Neben der Strukturierung sollten aber auch die möglichen Disziplinen (der Geowissenschaften) eingegrenzt bzw. zusammengefasst werden.

In dieser Arbeit geschieht dies auf Basis der an der Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie vertretenen Disziplinen die zu zwei großen Bereichen zusammengefasst werden. Für jeden der zwei Bereiche werden stellvertretend Beispiele für physische Modelle gezeigt. Die einzelnen Teilbereiche der Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie wurden bereits in Kapitel 2.1.1 erläutert. Für die weitere Bearbeitung werden diese Disziplinen in zwei Bereiche eingegliedert. Unter dem Begriff der **Geographie** werden die beiden Institute Geographie und Regionalforschung und Meteorologie und Geophysik zusammengefasst. Bei den **klassischen Erdwissenschaften** werden die Bereiche der Geodynamik und Sedimentologie, Lithosphärenforschung, Mineralogie und Kristallographie sowie die Paläontologie zusammengefasst. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, wurde der Begriff der Geowissenschaften auf die „Phänomene, Strukturen und Prozesse auf, in und über der Erde“ (S.11) beschränkt weshalb der Bereich der Astrophysik für diese Arbeit und die weitere Analyse nicht relevant ist.

Im Bereich der Geographie, Meteorologie und Geophysik werden Exemplarisch einige Modelle bzw. Modelltypen vorgestellt. Im Bereich der Geographie werden zuerst die klassischen Landschaftsmodelle und Reliefkarten in unterschiedlichen Ausprägungen vorgestellt. Anschließend wird Beispielhaft die Gruppe der Stadt- bzw. Planungsmodelle besprochen. Hierbei handelt es sich um bereits etablierte Formen des physischen Modellbaus in dieser Disziplin. Im Bereich der Meteorologie und Geophysik wird die Suche nach Modellen etwas fordernder. Hier zeigt sich das diese Disziplin im Gegensatz zur „klassischen Geographie über keine so große Tradition im wissenschaftlichen Modellbau hat.

#### 4.1. Physische Modelle im Bereich der Geographie, Meteorologie und Geophysik

Spricht man von physischen Modellen im Kontext der Geowissenschaften und der Geographie, so kommt man am klassischen Landschaftsmodell (terrain model) nicht vorbei. Diese Form des physischen Modellbaus hat bereits lange Tradition. Zu Beginn des 16. Jh. entstanden unter Maximilian I. vier sehr einfache Landschaftsmodelle der Ostalpen. Der Verwendungszweck dieser Modelle hatte damals fast ausschließlich einen militärischen Hintergrund (vgl. [terrainmodels.com](http://terrainmodels.com)<sup>1</sup>). Geschichtlich gesehen waren Paris und Venedig bedeutende Orte des Landschaftsmodellbaus. Ende des 18. Jh. verlagerte sich der Schwerpunkt des Reliefbaus in die Schweiz, die bis heute noch alle großen Namen des Landschaftsmodellbaus wie IMHOF E; IMFELD X; SIMON S. und den erst vor wenigen Jahren verstorbenen MEYER T (vgl. [terrainmodels.com](http://terrainmodels.com)<sup>1</sup>) beheimatete.

Die ETH Zürich hat diesem Umstand eine eigene Homepage gewidmet, die sich ausschließlich mit dem Landschaftsmodellbau befasst ([www.terrainmodels.com](http://www.terrainmodels.com)). Im Bereich der historischen Aufarbeitung des



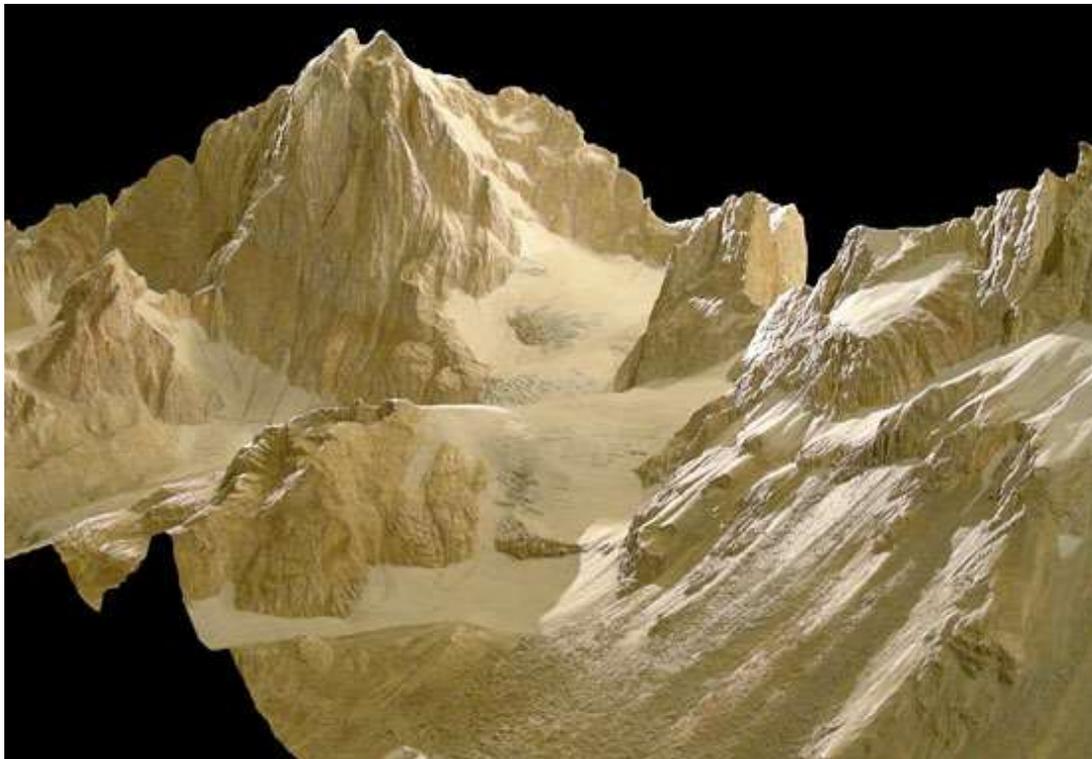
Abb. 4 V. l. n. r.: Imfeld X (1853-1909); Simon S (1857-1925); Imhof E (1895-1986); Meyer T (1940-2015)  
Quelle-Bilder: <http://www.terrainmodels.com/artists.html>

Themas treffen wir auf eine interessante Aussage, die für den Kontext der Arbeit nicht unwesentlich ist, und die in einer ähnlichen Form auch in dieser Arbeit schon erläutert wurde.

*„For a long time, topographic maps were very rare and the problem of the representation of the third dimension was not simple to manage on maps. Especially in hilly and mountainy regions it was less difficult to create a three-dimensional model of the earth's surface than to translate it into a two-dimensional map. Whereas today a terrain model is usually shaped after the contour lines of a map, the approach at the end of the 18<sup>th</sup> century was reverse.”* (vgl. [terrainmodels.com](http://terrainmodels.com)<sup>1</sup>)

Was hier angesprochen wird, kann als Erweiterung bzw. Beispiel von RASEs Zitat aus Kapitel 3.3 gesehen werden. Es ist sozusagen der Beweis, dass die Decodierung 3-dimensionaler Information aus physischen Modellen für den Menschen einfacher ist, da dies von Geburt an ständig trainiert wird, die Decodierung aus 2-dimensionalen Darstellung hingegen erst erlernt werden muss.

Das Landschaftsmodell in Abbildung 5, erbaut von Eduard Imhof ist ein Modell des Grosse Windgällen im Bereich der Glarner Alpen im Schweizer Kanton Uri der Schweiz. Das Modell im Maßstab 1:2000 hat eine Größe von 163cm x 307cm und zählt zu den klassischen und bekanntesten Formen des physischen Modellbaus in geowissenschaftlichen Disziplinen.



*Abb. 5: Große Windgälle, 3187 m (CH) 1:2000 163 x 307 cm, Eduard Imhof, 1938, Swiss Alpine Museum, Quelle-Bild: [http://www.terrainmodels.com/pictures/artists/Imhof/windgaelle\\_9.jpg](http://www.terrainmodels.com/pictures/artists/Imhof/windgaelle_9.jpg)*

Diese Art des Modellbaus (Landschaftsmodellbau) ist in all ihren Ausprägungen eng verbunden mit der Kartographie und Geoinformation. Verständlicherweise gehören Visualisierungen zu den Hauptaufgaben beider Disziplinen. So kommt es auch, dass diese Disziplinen in der Vergangenheit auch sehr spezielle Formen der Umsetzung hervorbrachten.

Eine dieser speziellen Formen der Umsetzung kann in Abbildung 6 (kommende Seite) betrachtet werden. Es handelt sich dabei um ein sogenanntes Taschenrelief. Eine Verbindung einer topographischen Karte mit dem Relief desselben Gebietes. Das Taschenrelief diente als Hilfsmittel bei der Navigation in Gebirgsregionen, zu einer Zeit als Höheninformationen (Höhenschichtlinien) noch nicht in Karten enthalten waren (vgl. [terrainmodels.com](http://www.terrainmodels.com)<sup>2</sup>).



Abb. 6: Relief von St.Gallen (CH) in Verbindung mit einer topographischen Karte des Gebietes.  
<http://www.terrainmodels.com/pictures/applications/schoell.jpg>

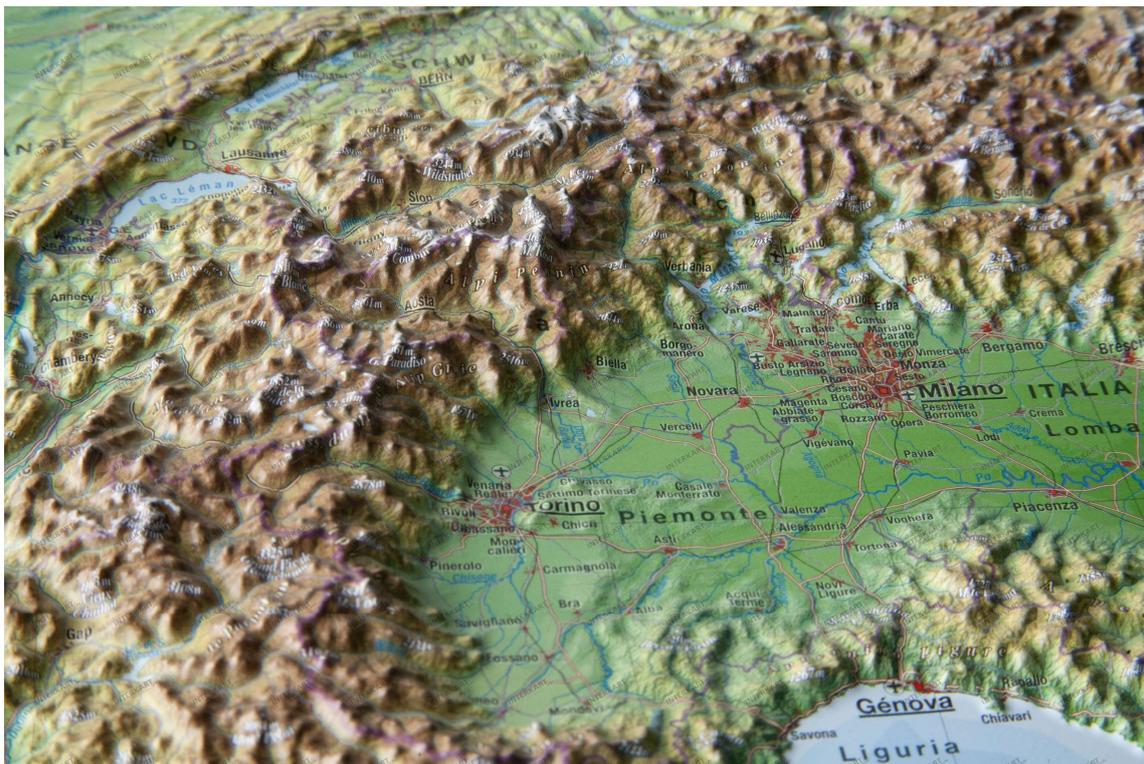


Abb. 7: Detailsicht aus einer 3D Reliefkarte der Alpen, Quelle:  
<https://www.interkart.de/landkarten/europa/westeuropa-landkarten/3d-reliefkarte-alpen-poster-klein.html>

Eine weitere sehr bekannte Form von physischen Modellen im Bereich der Geographie, vor allem der Kartographie und Geoinformation sind Reliefkarten. Diese Form der Karten unterscheidet sich vom klassischen Landschaftsmodell durch einige Einschränkungen im Vergleich zum klassischen Landschaftsmodellbau aufgrund von verfahrenstechnischen Eigenschaften. Für die Darstellung mittels Reliefkarten eignen sich besonders kleinmaßstäbige Erdräumauschnitte da hier auf detaillierte Oberflächendarstellung eine untergeordnete Rolle aufgrund des Maßstabs spielt (vgl. [terrainmodels.com](http://terrainmodels.com)<sup>3</sup>). Abbildung 7 auf der vorhergehenden Seite zeigt eine Reliefkarte. Abgebildet auf der Karte ist der gesamte Alpenraum. Durch die Erhöhung des Gebirges ist die Ausdehnung des Alpenraums besser zu erkennen. Zusätzlich zur Farbhypsometrie (grün-gelb-braun) welche alleine Aufschluss über Relief geben könnte wird durch die dritte Dimension in der Karte der Betrachter, die Betrachterin bei der Analyse der Karte unterstützt (S.17 - Zitat RASE).

Obwohl Stadtmodelle im Wissenschaftsbereich der Architektur sowie Stadt- und Raumplanung zentral verankert sind, sind sie, ähnlich wie Karten, auch dazu in der Lage, Information über die reale Welt in abstrahierter Form wiederzugeben. Aus diesem Grund kann man sie auch unter einer eher geowissenschaftlich zentrierten Perspektive in die Untersuchung mitaufnehmen und zum erweiterten Bereich der Geographie zählen.

Obwohl in den letzten Jahren die Entwicklungen im Bereich der digitalen Stadtmodelle immer weiter



Abb. 8: Ausschnitt des Stadtmodells von Hamburg. Quelle-Bild: <http://www.hamburg.de/contentblob/1441340/4d2ca156fa6f1bbb01d96b865ace221/data/stadtmodell-001.jpg>

voranschritten, haben physische Modelle laut STOCKER G. (Leiter einer Modellbau-Firma in Wien) noch immer eine sehr starke Berechtigung. Seine Begründung liegt in der Möglichkeit, das Objekt frei und von unendlich vielen Blickwinkeln in seiner Ganzheit betrachten zu können, etwas, das seiner Meinung nach in der digitalen Stadtmodellierung und Visualisierung nicht möglich ist. (Interview: für wien.at nach zu lesen auf wien.gv.at<sup>1</sup>). Was STOCKER G. mit dieser Aussage genau meint bleibt unbeantwortet. Vermutlich bezieht sich seine Aussage auch statische digitale Stadtmodelle als Visualisierungen in denen eine Änderung des Blickwinkels nicht mehr möglich ist. Man könnte diese Aussage aber auch mit dem Zitat von RASE auf Seite 17 in Verbindung bringen. Somit würden Stadtmodelle in der Wahrnehmung immer einen Vorteil gegenüber virtuellen Modellen haben das deren Erfassung in der Natur des Menschen eher verankert ist.

Die Einsatzbereiche von Stadtmodellen sind vielseitig und sehr unterschiedlich. Sie reichen von Modellen für Architektur oder stadtplanerische Wettbewerbe, Modelle zum Zweck der Bürger- und Bürgerinneninformation über geplante und/oder in der Umsetzung befindliche Bauprojekte, historische Stadtmodelle bis hin zu Stadtmodellen, die eher einen touristischen und prestigeträchtigen Hintergrund besitzen.

Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt des rund 111m<sup>2</sup> großen Stadtmodells von Hamburg im Maßstab 1:500. Öffentlich zugänglich ist das Modell im Gebäude der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt ausgestellt. Das Holzmodell (Lindenholz) wird laufend aktualisiert. Geplante und im Bau befindliche Projekte bleiben naturfarben (natürliche Holzfarbe – im Bsp. Die Elbphilharmonie>Pfeil). Alle existierenden Projekte sind in weißer Farbe dargestellt (vgl. hamburg.de).

Landschafts- und Stadtmodelle haben vielfach einen rein öffentlichkeitswirksamen Zweck. Da diese auch meist an öffentlich Zugänglichen Orten aufgestellt werden. (siehe Bsp. Hamburg). Sie können aber auch ausschließlich für planerische Zwecke erstellt werden. Ihr Nutzen beschränkt sich dabei auf die Präsentation geplanter Bauvorhaben und weniger dem Zeigen des Ist-Zustandes wie bei einem Stadtmodell am Beispiel Hamburg. In Abbildung 9 ist ein solches Exemplar zu sehen. Abgebildet ist ein Geländemodell mit aufgedruckten Luftbildern sowie einem geplanten Bauprojekt.

Stadtmodelle werden auch sehr oft dazu genutzt, über historische Entwicklung in Städten Auskunft zu geben. Abb. 10 zeigt ein historisches Stadtmodell von Linz, gefertigt aus Bronze. Solche Modelle findet man sehr oft in einem musealen Kontext, oder auch im Fall von Bronzemedellen häufig im öffentlichen Raum (11).



*Abb. 9: Geländemodell mit Luftfotos als Planungsgrundlage für ein Bauprojekt, (3D-Druck),  
Quelle-Bild: <http://www.fabrica3d.de/grid?lightbox=i135um>*



*Abb. 10: Historisches Stadtmodell von Linz (Bronze), Quelle Bild:  
[http://www.landesmuseum.at/files/project/userdata/Foerderer-Ankaeufe/16\\_2009\\_Bronzemodell.jpg](http://www.landesmuseum.at/files/project/userdata/Foerderer-Ankaeufe/16_2009_Bronzemodell.jpg)*

Im Bereich der Meteorologie und Geophysik wird die Suche nach physischen Modellen schon etwas schwieriger. Bei meteorologischen und geophysikalischen Visualisierungen handelt es sich meist um die Darstellung von Kontinua. Genaugenommen Modellkontinua. *„Kontinua sind räumlich oder flächenhaft unbegrenzt und dabei von lückenlosem, stetigen Verlauf. Ihre geometrische Information besteht in der Lageangabe für Zahlenwerte, die sich von Ort zu Ort kontinuierlich ändern“* (HAKE 2002: 16). Im Gegensatz zur Erdoberfläche, die in den Vorangegangenen Beispielen zentrales Objekt jeder Darstellung ist, sind diese Phänomene, vor allem in der Meteorologie schwieriger gegenüber anderen Elementen abzugrenzen. Ob dies Gründe für die wenigen physischen Visualisierungen in diesem Bereich sind kann dadurch nicht beantwortet werden aber die Vermutung liegt nahe das dies mitunter ein möglicher Grund sein könnte.

Alle Phänomene die neben einer X- und Y-Ausdehnung auch eine mögliche Z-Variable besitzen können im Grunde als physisches dreidimensionales Objekt erzeugt werden. Da dies auch der Fall bei meteorologischen Daten bzw. bei Geophysikalischen Objekten der Fall ist wären sie Grundsätzlich dazu geeignet als physisches Modell umgesetzt zu werden. Dies soll nun anhand zweier Beispiele verdeutlicht werden.

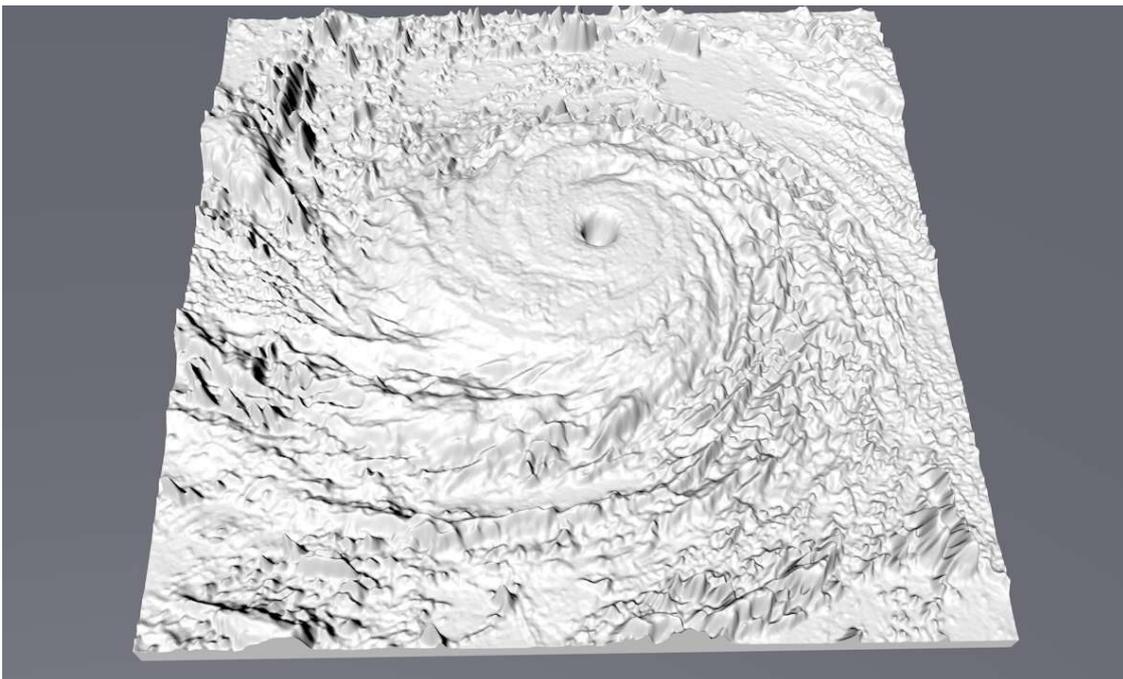


Abb: 11: Cinema4D Render der STL Datei von Hurricane Katrina 2005. Quelle-Datei: <https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/hurricane-katrina>, Quelle-Bild: C4D Render

Die oben gezeigte Abbildung der Visualisierung einer .STL<sup>5</sup> Datei des Hurricanes Katrina welcher 2005 im Golf von Mexiko für große Schäden gesorgt hatte zeigt eine solch mögliche Art der dreidimensionalen Visualisierung im Bereich der Meteorologie. Die Datei wird von der NASA als STL Datei zum Download angeboten und könnte direkt als Druckdatei an eine generative Fertigungsanlage

---

<sup>5</sup> STL – Standard Transformation Language / Stereolithographic Language. Standardformat für 3D-Druck. Eingehende Erläuterungen in Kapitel 5.4.2

gesendet werden. Zusätzlich zu einer reinen geometrischen Information, wie in der Abbildung, wäre denkbar mit der Variable Farbe einen zusätzlichen Träger von Informationen, wie z.B. Windgeschwindigkeiten einzusetzen.

Gleiches gilt für die Abbildung 12 und 13. Es handelt sich dabei um die Darstellungen eines Geoids, welcher der Disziplin der Geophysik zuzuordnen ist. Auch bei dieser Datei handelt es sich um eine Datei im .STL Format welche in diesem Format direkt in einem 3D-Drucker produziert werden könnte. Auch hier beschränkt sich die Darstellung auf die rein geometrische Wiedergabe des Objektes. Wie auch schon bei Beispiel des Hurricanes Katrina (Abb:11) erwähnt könnte auch hier eine Texturierung bzw. Farbgebung als zusätzlicher thematische Informationsträger eingesetzt werden.

An den beiden Beispielen wird deutlich das bereits vorhin erwähnt wurde worauf auch in späterer Folge

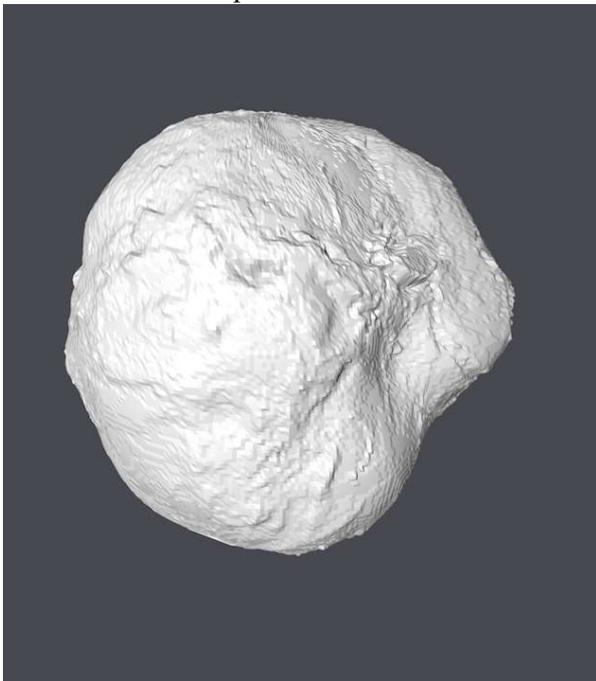


Abb: 12: Cinema4D Render der STL Datei eines Geoids.  
Quelle-Datei: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/geoid.html>,  
Quelle-Bild: C4D Render

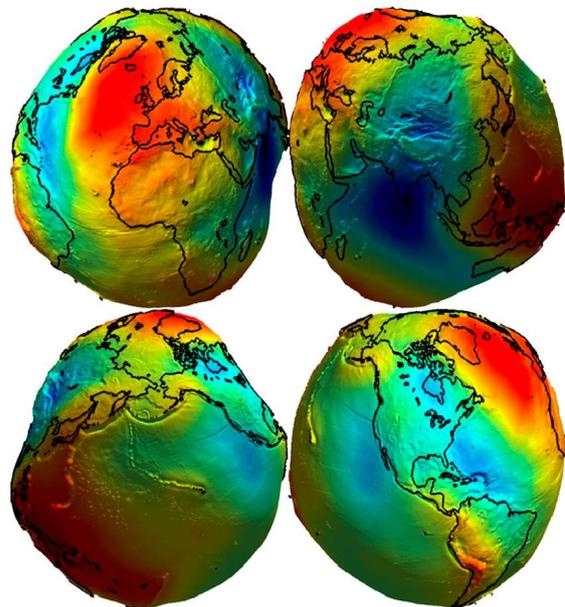


Abb: 13: Abbildung eines Geoids inkl. thematischem Overlay des  
Schwerefeldes der Erde. Quelle-Bild:  
<https://timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/geoid>

in Kapitel 5.4 sehr detailliert eingegangen wird, nämlich das es Grundsätzlich möglich ist 3D-Datensätze so aufzubereiten das diese für die Fertigung mittels 3D-Druck geeignet sind. Gleich wie bei pseudo-dreidimensionalen Visualisierungen ist man auch in diesem Wissenschaftsfeld, durch den Einsatz von physischen Modellen dazu in der Lage einen Mehrwert in der wissenschaftlichen Kommunikation zu generieren. Die Frage ob und wann physische Modelle in ihrem Einsatz gerechtfertigt werden bestimmt der Anwendungszweck und kann hier nicht pauschal beantwortet werden.

#### 4.1.1 Vorläufer des generativer Fertigungsverfahren am Beispiel der Landschaftsmodelle und Reliefkarten

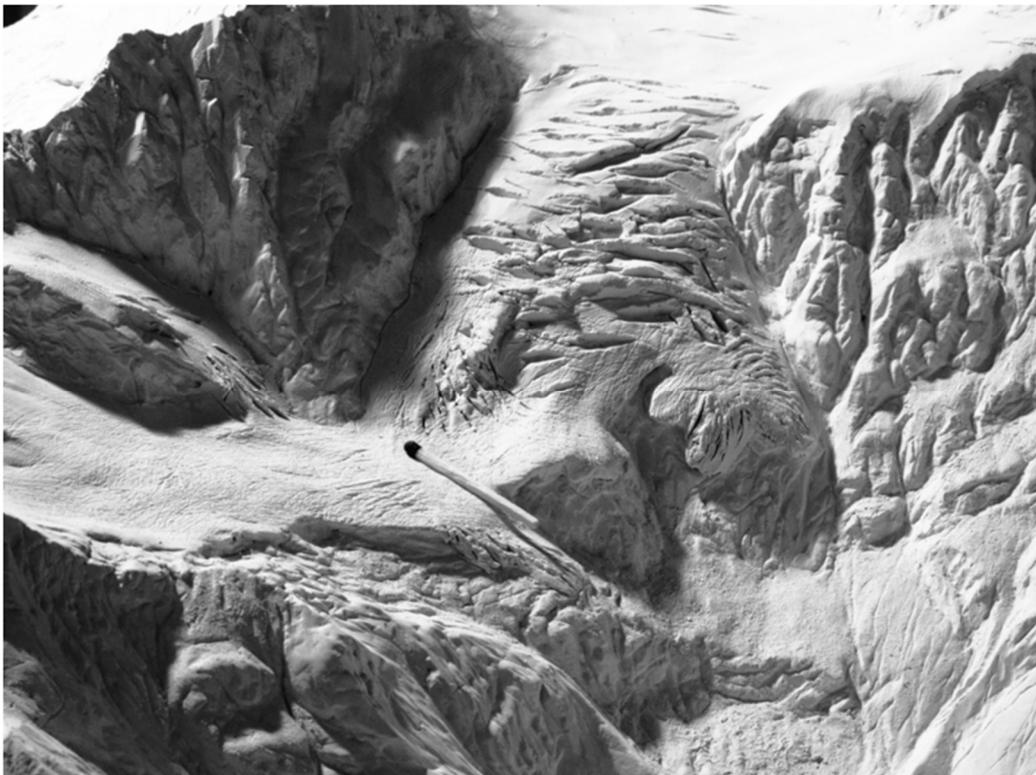
An dieser Stelle soll ein Exkurs einen kurzen Überblick die unterschiedlichen Herstellungsverfahren des klassischen Landschaftsmodellbaus und der Relieferzeugung geben.

##### ▪ **Gips Modelle (plaster models) für die Herstellung von Landschaftsmodellen**

Gipsmodelle sind wohl die berühmteste Form der Landschaftsmodelle. Bereits zu Beginn des Kapitel 4.1 zeigt die Abbildung 5 (S:24) ein Landschaftsmodell eines berühmten Vertreters aus diesem Bereich als Beispiel eines Gips-Modells Die detaillierte Vorgangsweisen bei der Herstellung sind sehr unterschiedlich, und können daher nicht m Detail dieser Arbeit aufgearbeitet werden da dies ansonst den Rahmend er Arbeit bei weitem überschreiten würde.

Der Prozess kann jedoch in drei große Schritte unterteilt werden, die das Prinzip des klassischen Landschaftsmodellbaus sehr gut umreißen.

- **Rohmodell:** Das Rohmodell hat den Zweck, die Topographie des Gebietes in ihren Grundzügen nachzubilden. Es gibt dabei unterschiedliche Herstellungsverfahren, die grundsätzlich alle zum selben Endergebnis kommen, nämlich einer Basis für die weitere Bearbeitung.



*Abb: 14: Detailaufnahme eines Landschaftsmodells in der Phase der Feinmodellausarbeitung. Das Streichholz dient zur Einschätzung der Größenverhältnisse. Quelle-Bild (C) Wolfgang Pusch (bergmodelle.de)*

- Hier spricht man dann vom **Feinmodell**. Ziel ist es, die Oberflächenformen des Modells herauszuarbeiten. Dies geschieht auf Basis von topographischen Karten und Fotografien in Handarbeit.
- Bei der **Bemalung/Finish** wird dem Modell abschließend das realistische Aussehen gegeben. Handelt es sich bei der Herstellung des Rohmodells noch um einen eher technischen Arbeitsschritt, so sind für das Feinmodell und die Bemalung Erfahrung und Übung notwendig, um so realistische Modelle wie möglich herzustellen. So beinhaltet dieser letzte Schritt auch eine große künstlerische Komponente (vgl. [bergmodelle.de](http://bergmodelle.de)<sup>1</sup>).

### **Reliefkartenherstellung**

#### ▪ **Wenschow Verfahren**

Karl Wenschow (1884 - 1947) unternahm den Versuch, die Produktion von Reliefmodellen zu beschleunigen, indem er eine Möglichkeit entwickelte, diese maschinell herzustellen. Das Verfahren nennt man Wenschow-Verfahren. Mittels Pantograph wurden die Höhenlinien von topographischen Karten auf einen Gipsblock übertragen (herausgefräst) und anschließend eine Negativform erstellt. Bereits gedruckte Karten wurden behandelt und mittels der Negativform gegen eine Stützmasse gedrückt, die die spätere Form unterstützt. So konnten einerseits Modelle maschinell in sehr kurzer Zeit erstellt werden, andererseits bleibt die sehr zeitintensive Bemalung wie bei Gipsmodellen aus, da bereits fertige gedruckte topographische Karten verwendet werden. (vgl. [terrainmodels.com](http://terrainmodels.com)<sup>2</sup>)

#### ▪ **Vakuumformen** (vacuum forming)

Das Vakuumverfahren ist eine Weiterentwicklung des Wenschow-Verfahrens. Beim Vakuum-Verfahren, auch unter dem Namen Thermoplastisches Verfahren bekannt, wird ein bedruckter, thermisch verformbarer Kunststoff erwärmt und anschließend mittels Vakuum über eine zuvor erzeugte Urform, „gezogen“. Nach dem Erkalten des Kunststoffes behält dieser die Form. Das Verfahren eignet sich für die serienmäßige Produktion von Reliefkarten.

(vgl. [terrainmodels.com](http://terrainmodels.com)<sup>4</sup>)

#### ▪ **Prägen** (terrain embossing)

Das Prägen kann als eine Vorgängerstufe des Vakuumformens betrachtet werden. Grundsätzlich dient es der Herstellung einer Urform, über die später bedruckte Materialien mittels Hitze und Druck abgeformt werden. Ausgangsmaterial ist eine Aluminiumplatte, auf der die topographische Karte abgebildet ist. Mittels der Informationen der Karte wird mit einer speziellen Maschine die Höheninformation herausgearbeitet. (vgl. [terrainmodels.com](http://terrainmodels.com)<sup>5</sup>)

## Neue Formen des Landschaftsmodellbaus und der Reliefherstellung

- **Computer basierend** (Computer based technologies)

Neben additiven Verfahren, die im Fokus der Arbeit stehen, gibt es noch zwei weitere Verfahren, die rechnergestützt Reliefs und Modelle erzeugen können.

- **Subtraktive Verfahren** arbeiten aus dem Ausgangspunkt des Grundmaterials in Blockform mittels subtraktiver, also abtragender, Verfahren (meist Fräsen) das gewünschte Modell heraus. Das Funktionsprinzip ist ähnlich dem des Pantographen. Ein Ursprungsmodell muss hier nicht mehr händisch abgetastet (Pantograph) werden, sondern der Prozess wird elektronisch gesteuert. (vgl. [terrainmodels.com](http://terrainmodels.com)<sup>6</sup>)

- **Dynamische Verfahren** Wie in den historischen Anfängen des Reliefbaus spielen militärische Interessen oder Firmen aus der Rüstungsindustrie eine bedeutende Rolle in neuen Entwicklungen.

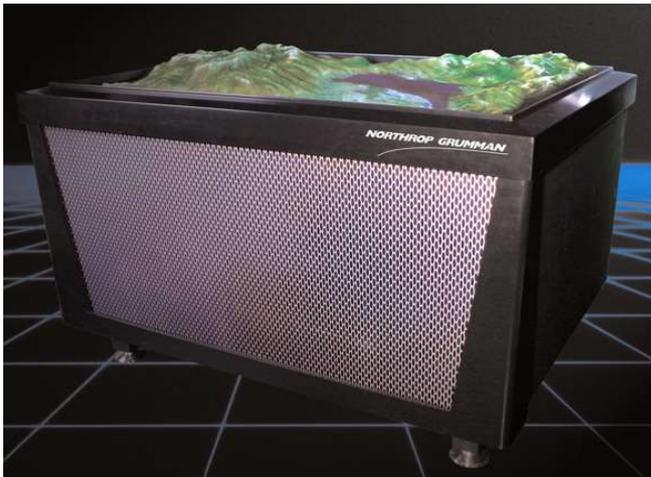


Abb. 15: TerrainTable der Firma Northrop Grumman. Quelle-Bild:  
<http://blogs.walkerart.org/newmedia/files/2006/05/terrain-table1.jpg>

Die amerikanische Firma Northrop Grumman hat bei der ESRI User's Conference 2005 einen „TerrainTable“ vorgestellt. Mittels Projektor und vertikal angeordneten Stäben unter einer Silikonoberfläche lassen sich so interaktive und dynamische dreidimensionale Landschaften nachbilden, die dabei auch interaktionsfähig sind. (vgl. [blogs.walkerart.org](http://blogs.walkerart.org))

## 4.2. Physische Modelle im Bereich der klassischen Erdwissenschaften

Auch im Bereich der klassischen Erdwissenschaften wie wir sie in dieser Arbeit verstehen (Erläuterung Kapitel 4) werden physische Modelle eingesetzt oder ist ihr Einsatz denkbar. Im folgenden Abschnitt werden zu den jeweiligen Unterdisziplinen mögliche Umsetzungen von physischen Modellen beschrieben und Anhand von Abbildungen visualisiert.

Ähnlich wie bereits im Bereich der Meteorologie und Geophysik sind auch im Feld der Geodynamik und Sedimentologie, Mineralogie und Kristallographie sowie im Gebiet der Lithosphärenforschung physische Modelle weniger verbreitet. Trotzdem, oder gerade wegen den Entwicklungen im Bereich der generativen Fertigung lassen sich physische Visualisierungen in diesem Bereich finden.

Im Feld der Geodynamik zeigen wir als Beispiel eine Arbeit von Doug McCune (Abb: 16). Doug McCune, Experte für Datenvisualisierung. Als Grundlage für diese Darstellung dienten Erderschütterungsdaten des U.S. Geological Survey (USGS). Farbwerte der Erschütterungsintensität wurden dabei in Höhenwerte umgewandelt. Je höher die Bereiche liegen desto größer war der Grad der Erschütterung in diesem Punkt/Gebiet (vgl. [creators.vice.com/de/](http://creators.vice.com/de/)).

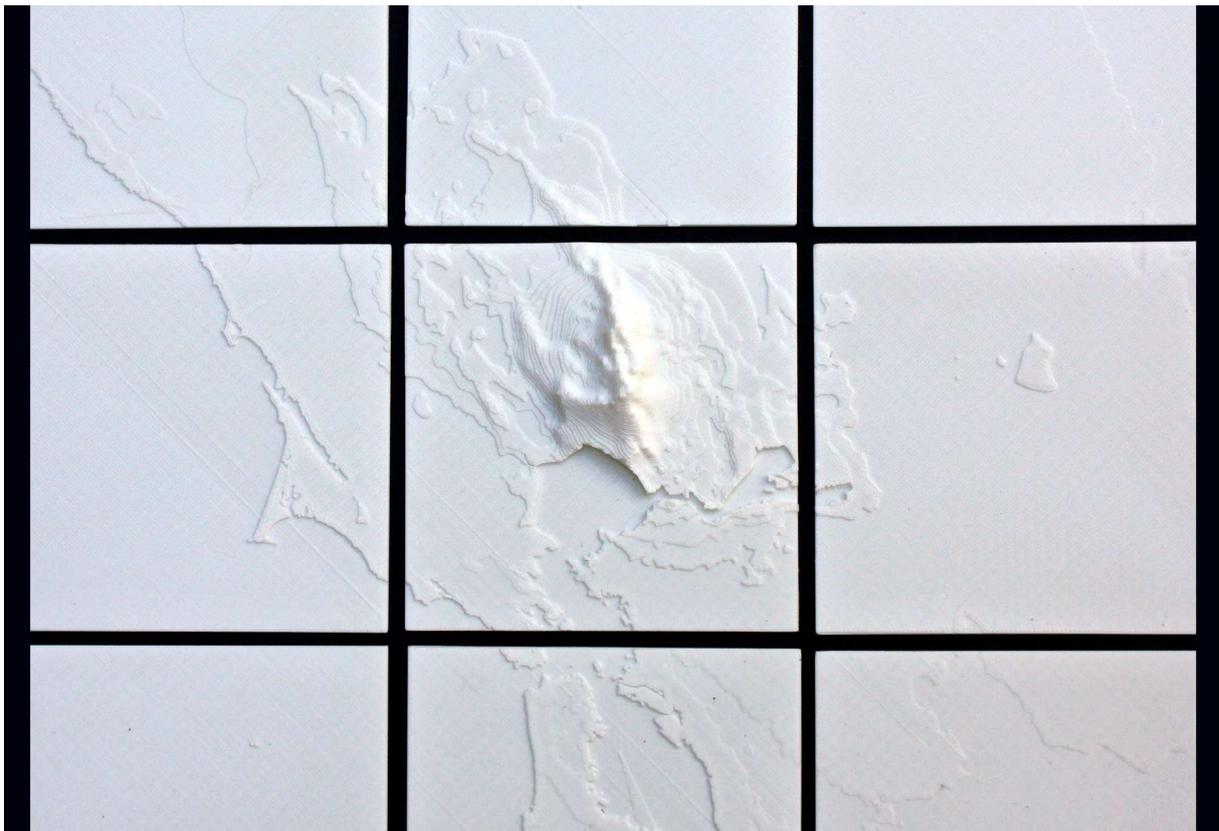
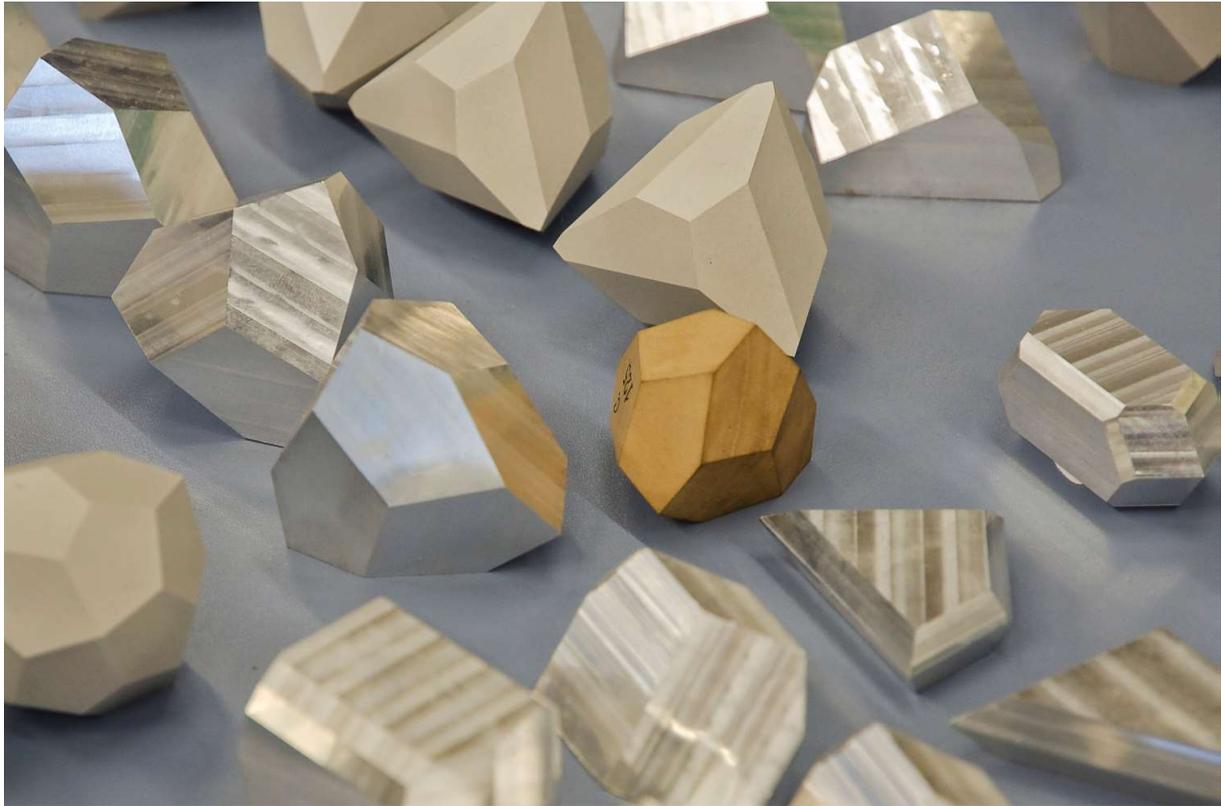


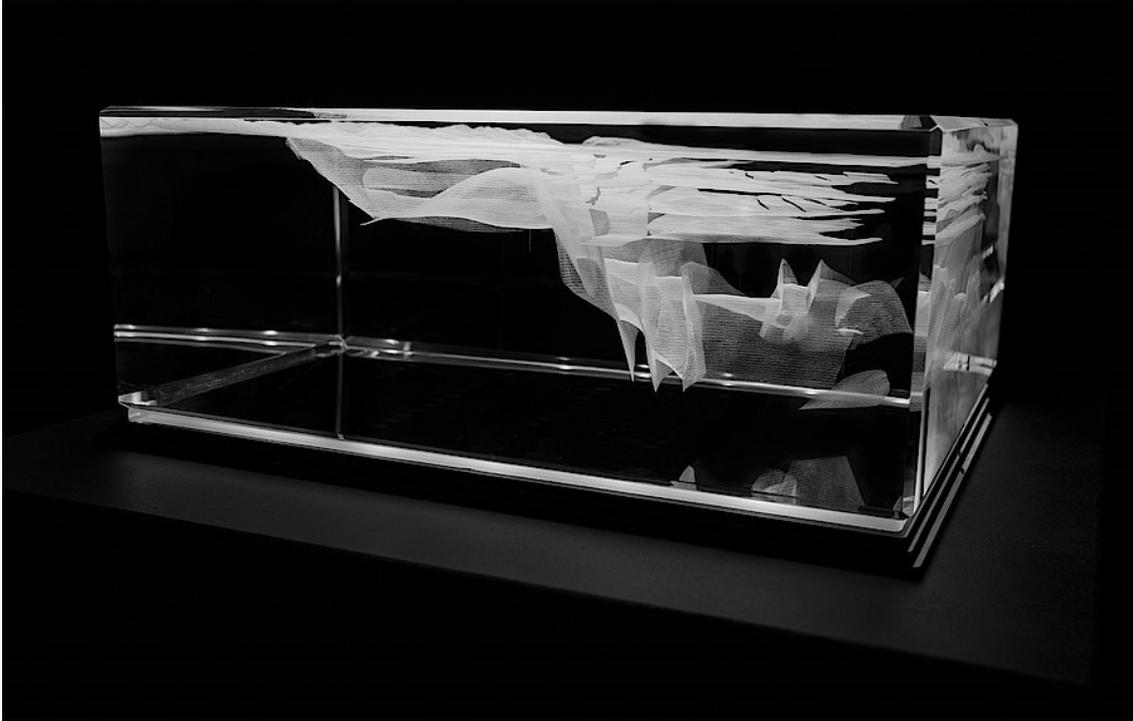
Abb: 16:3D-Modell der Visualisierungen der Erschütterungsintensität (Ground-Peak-Velocity) eines Erdbebens vom 24.08.2014 in San Francisco. Quelle-Bild: [http://dougmcune.com/blog/wp-content/uploads/2014/09/all\\_tiles\\_above1.jpg](http://dougmcune.com/blog/wp-content/uploads/2014/09/all_tiles_above1.jpg)

Kristallmodelle spielen im Bereich der Kristallographie und Mineralogie eine wichtige Rolle im Bildungsbereich auf universitärem Level. Abbildung 17 zeigt eine Reihe von Kristallmodellen aus Aluminium und Holz (Bild-mitte). Kristalle sind in der Natur selten mit freiem Auge sichtbar. Durch den Einsatz von Modellen ist man in der Lage komplexe Sachverhalte im Zusammenhang mit Kristallen besser und verständlicher zu vermitteln (vgl. [www.uibk.ac.at/](http://www.uibk.ac.at/)).



*Abb: 17: Kristallmodelle aus Aluminium und Holz, Quelle Bild: Eva Fessler [https://www.uibk.ac.at/public-relations/presse/archiv/2015/603/bilder/pic\\_20150218085603\\_42a37d114a.jpg](https://www.uibk.ac.at/public-relations/presse/archiv/2015/603/bilder/pic_20150218085603_42a37d114a.jpg)*

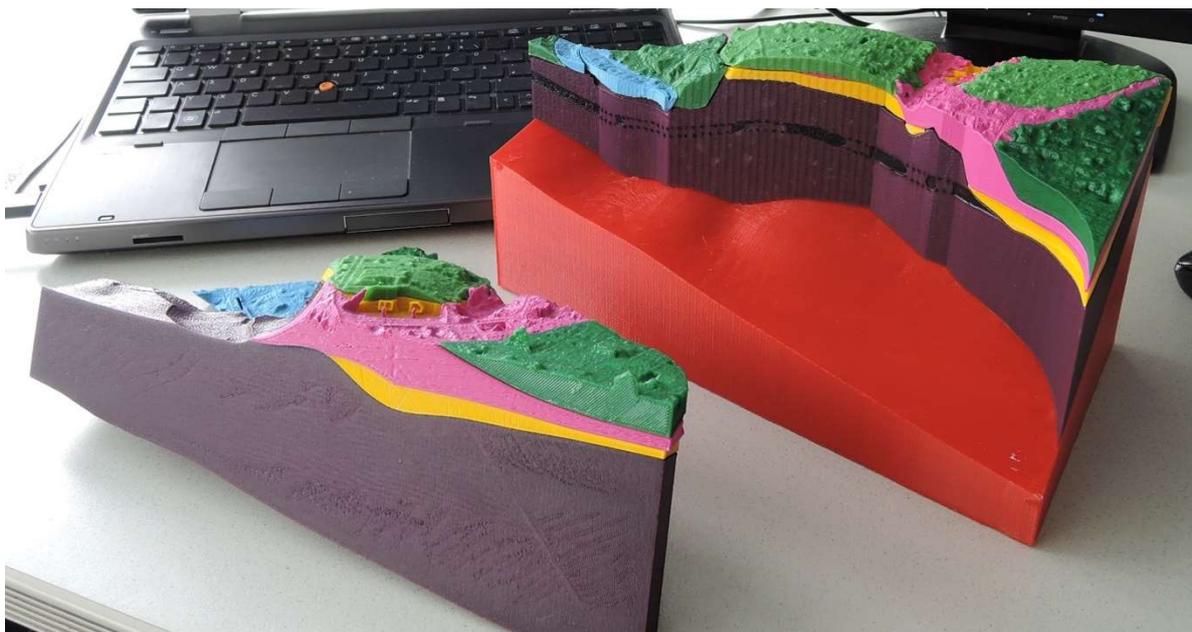
Die bereits genannten Beispiele sowie die Lithosphärenforschung, welche an der Universität Wien vertreten ist, stehen in einer sehr engen Verbindung mit der Geologie. Physische Modelle finden wir auch im Fachbereich der Geologie. Gerade hier sind die Möglichkeiten der Visualisierungen sehr interessant und oft unkonventionell. So müssen in der realen Welt nicht sichtbare Formen, die sich überlagern, verschneiden und gegenseitig verdecken, auf eine Art und Weise dargestellt werden, dass das eigentliche Erkenntnisobjekt noch verständlich und ausreichend visualisiert werden kann. Gerade im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit und in der Kommunikation sind dimensionale Visualisierungen für fachfremde Personen wichtig, damit diese in der Lage sind, die komplexen Sachverhalte der Geologie verständlicher zu kommunizieren. (Auskunft GBA: PORPACZY C.: am 10.10.2016)



*Abb. 18: Glas-Lasergravurmodell des Untergrundes von Wien in der Ausstellung Geologie3, Quelle-Bild: [https://www.geologie.ac.at/fileadmin/\\_processed\\_/csm\\_ansicht\\_1\\_sw\\_dcfa3bd245.jpg](https://www.geologie.ac.at/fileadmin/_processed_/csm_ansicht_1_sw_dcfa3bd245.jpg)*

In Abbildung 18 sehen wir ein maßstabsgetreues Abbild des geologischen Untergrundes von Wien. (Selbe Datengrundlage wie das Untersuchungsobjekt dieser Arbeit Kap. 7) Dargestellt sind die Schichtgrenzen der einzelnen geologischen Einheiten in einem Glas-Lasergravur-Modell.

Abbildung 19 zeigt ein Planungsmodell der U2/U5 Verlängerung im Wiener Stadtgebiet. Die einzelnen Farbbereiche spiegeln unterschiedliche geologische Einheiten wieder die wie Puzzlesteine zusammengesetzt und auseinandergenommen werden können.



*Abb. 19: 3D Druck des Planungsmodells der U2/U5 Verlängerung in Wien, Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt*

In der Geologie waren Landschaftsmodelle/Relieffkarten mit aufgemalten geologischen Informationen für lange Zeit üblich. Die 3-Dimensionalität blieb so natürlich enthalten, jedoch wurden die fachlich relevanten Informationen nicht 3-dimensional dargestellt. Neue Technologien und andere Ansätze, wie in den Beispielen in Abb. 18-19 zeigen, dass es möglich ist, auch im Bereich der Geologie Wege zu finden, das eingangs erwähnte Problem zu umgehen (vgl. [terrainmodels.com](http://terrainmodels.com)<sup>7</sup>).

Eine weitere Form des wissenschaftlichen Modellbaus finden wir im Umkreis der Paläontologie und. Hier liegt der Fokus des Modellbaus vor allem auf dem didaktischen Wert der Modelle, die in Museen oder anderen öffentlich zugänglichen Plätzen ausgestellt werden. Originaltreue und eine maßstabsgerechte oder sehr oft vergrößerte Darstellung bei gleichbleibender Qualität spielen in diesem Bereich eine sehr bedeutende Rolle (vgl. [nhm-wien.ac.at](http://nhm-wien.ac.at)). Durch die Existenz neuer Technologien wie der des 3D-Druckes entwickelten sich für diesen Wissenschaftsbereich ganz neue Möglichkeiten. Es können Fundstücke die z.B. radiologisch (CT-Scan) untersucht werden und anhand der gewonnen 3D-Daten in Verbindung mit Methoden der generativen Fertigung daraus Modelle erzeugt werden. Durch die so erzeugten Modelle ist es möglich, zerstörungsfrei Untersuchungen an den Objekten durchzuführen.



*Abb: 20: Die versteinerten Zähne eines fleischfressenden Nanotyrannus-Sauriers, Quelle-Bild: <http://www.handelsblatt.com/images/fossil-eines-nanotyrannus-sauriers/9101758/2-formatOriginal.jpg>*

Abbildung 20 zeigt ein versteinertes Fossil. Durch eine dreidimensionale Vermessung des Objektes kann ein anschließend erzeugtes 3D-Modell zur weiteren Zerstörungsfreien Untersuchung und Studium des Objektes erzeugt werden.

### 4.3. Taktile Modelle

Eine spezielle Form des Modellbaus, die nicht nur für wissenschaftliche Fragestellungen interessant ist, sind taktile Modelle, die speziell für die Zielgruppe der Menschen mit visuellen Beeinträchtigungen konzipiert sind. Die speziellen Anforderungen zum Beispiel im Bereich der Kartographie ergeben sich daraus, dass räumliche Zusammenhänge (spatial relationships) über andere als die normalerweise verwendeten visuellen Kanäle transportiert werden müssen.

Erhabene Punkte, Linien und Flächensymbole und die vereinfachte Darstellung des Reliefs (Abb. 21) stehen stellvertretend für „normalerweise“ graphische Elemente und sind für die Kommunikation verantwortlich. Daraus ergeben sich weitere Herausforderungen, wie zum Beispiel der Maßstab. KOCH beschreibt: Um denselben Informationsumfang zu transportieren, müssen taktile Karten doppelt so groß sein wie ihre normalen Pendanten. (vgl. KOCH: 2012: 138 u. 141)

In der Kartographie findet diese spezielle Form Anwendung im Bereich der klassischen Karten, Atlanten und auf Globen. Doch auch außerhalb der Kartographie sind taktile Modelle in Verwendung. Aber nicht nur in der Kartographie, sondern auch in allen anderen Disziplinen ist der Einsatz spezieller taktiler Modelle denkbar und möglich.



Abb. 21: Taktile Karte, Reliefkarte Europa, Quelle-Bild: [http://www.mediablis-bayern.de/images/karte2\\_640.jpg](http://www.mediablis-bayern.de/images/karte2_640.jpg)

#### 4.4. Generative Fertigungsverfahren im Bereich der Geowissenschaften

Stellvertretend für alle Möglichkeiten des physischen Modellbaus in geowissenschaftlichen Disziplinen haben wir nun einige prominente, weniger prominente, neuartige und exotischere Formen stellvertretend besprochen. Nun ist es an der Zeit, auf Basis dieser Beispiele einer der zentralen Fragen dieser Arbeit nachzugehen, nämlich der nach potentiellen Anwendungsbereichen von generativen Fertigungsverfahren in geowissenschaftlichen Disziplinen. Dabei geht es nicht um die Frage ob und wann generative Fertigungsverfahren bereits etablierte Verfahren ablösen und obsolet machen, sondern – in Anlehnung an die Aussagen von CALDWELL (Seite 21) – um die Frage, in welchen Bereichen und für welche Anwendungen generative Fertigungsverfahren sinnvoll eingesetzt werden könnten. Da es den Rahmen der Arbeit sprengen würde, alle denkbaren Formen von physischen Modellen im Bereich der Geowissenschaften im Zusammenhang mit 3D-Druck zu analysieren, beschränkt sich diese Auseinandersetzung und Analyse vorrangig auf jene Beispiele, die in Kapitel 4.1 besprochen wurden. Einige der bereits gezeigten physischen Modelle wurden bereits mittels generativer Fertigungsverfahren gefertigt beziehungsweise sind dafür ausgelegt da sie im Format STL vorliegen.

Wie zuletzt stellen wir den klassischen Landschaftsmodellbau an den Beginn der Analyse. Eigenschaften, die wir im klassischen Modellbau finden, sind die detailgetreue Nachbildung der Oberfläche strukturell wie in der abschließenden Bemalung und Überarbeitung des Objektes. Somit soll ein möglichst realistisches Abbild des Originals erzeugt werden.



Abb. 22: Ama Dablam 6.858m, Mahalagur Himal, Nepal. Relief M:1:7.500, Quelle-Bild (C) Wolfgang Pusch (bergmodelle.de)



*Abb. 23: Detailaufnahme Hohlichtgletscher, Relief Weisshorn M:1:10.000, Quelle-Bild (C) Wolfgang Pusch (bergmodelle.de)*



*Abb. 24: Sichtbarer Treppenstufeneffekt, Mount Everest Rohmodell aus dem 3D Drucker. M 1:1.000.000. Quelle-Bild: (C) Wolfgang Pusch (bergmodelle.de)*

Auf der Seite [bergmodelle.de](http://bergmodelle.de) finden wir ein Beispiel, das den Unterschied zwischen einem Rohmodell vor und nach der Bearbeitung durch den Modellbauer zeigt (Abb. 23 u. 24). Das Modell ist ein Abguss eines durch generative Fertigungsverfahren erstellten Modells. Sehr schön zu sehen ist der für generative Fertigungsverfahren typische Treppenstufeneffekt (Abb. 24). Die Wiedergabe der Topographie ist auf Grund der Auflösung des für die Erstellung verwendeten Höhenmodells sehr rund. Im Vergleich sehen wir in Abb. 23 u. 24 das teilweise von Hand überarbeitete Modell. Der Effekt der Überarbeitung wird sofort ersichtlich. Durch die Überarbeitung kann ein viel höherer Detailgrad erreicht werden als durch die SRTM<sup>6</sup> Daten, mit einer Auflösung von einer Bogensekunde, die verwendet wurden je erreicht werden könnte. (1 Bodensek. = ca. 30m Rastergröße) (vgl. POSCH 2017).

Die Erstellung von Landschaftsmodellen ist aus kartographischer Perspektive vermutlich gleichzusetzen mit der Erstellung eines Panoramabildes (Bsp.: H.C. Berann). Zentrale Punkte des Bildes werden überbetont, unwichtige und uninteressante Bereiche weggelassen oder minimiert (vgl. PATTERSON 2000). 3D-Drucker sind keine Künstler, sie sind computergesteuerte Maschinen deren Aufgabe darin liegt, definierte Aufgaben abzuarbeiten.

Die Bearbeitung eines Rohmodell, quasi der Übergang zum Feinmodell und das anschließende Finish, sind vergleichbar mit einem künstlerischen Gestaltungsprozess. Zwar verwenden Landschaftsmodellbauer Grundlagen wie Photographien, Karten und andere hochqualitative Hilfsmittel, um so exakt wie möglich arbeiten zu können. Der eigentliche Prozess der Gestaltung bleibt jedoch ein künstlerischer, der durch die Rückkoppelung von Gestaltung und Wirkung gesteuert ist.

Wo könnten generative Verfahren hier eingesetzt werden? Für die Erstellung von Rohmodellen wie in Abb. 24 sind diese Verfahren absolut geeignet. Durch die freie Verfügbarkeit von Datengrundlagen durch Services wie USGS (United States Geological Survey) könnten solche Rohmodelle sehr einfach und schnell erstellt werden. Durch Verfahren wie 3DP (Kap. 5.5.5) könnten Modelle sogar direkt aus Gips gedruckt werden. Ein zusätzlicher Abguss wie in den Beispielen aus Abb. 23 u. 24 wäre somit nicht mehr notwendig.

Ist die detaillierte Wiedergabe der Landschaft nicht wichtig, wie es z.B. bei Reliefkarten (Vakuumformen) der Fall ist, so ergeben sich mit generativen Fertigungsverfahren neue Möglichkeiten, vor allem durch die Möglichkeit, in Farbe zu drucken. Der Vorteil bei der Herstellung mittels generativer Verfahren liegt in der Möglichkeit des Anwenders, der Anwenderin die Auswahl des Gebietes selbst zu treffen, vorausgesetzt die Datengrundlagen (Höhenmodell und z.B. topographische Karte als Overlay)

---

<sup>6</sup> SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Globale Abdeckung zwischen 60.nördlichen und 58.südlichen Breitengrad frei verfügbar in einer Auflösung von 1-Bogensekunde. Quelle: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

sind vorhanden. Folgt man diesen Gedanken, so wären die in Kapitel 4.1 erwähnten Taschenreliefs sehr einfach herzustellen. Über den Nutzen solcher Taschenreliefs in Zeiten der ständigen Verfügbarkeit von elektronischen Karten durch Smartphones usw. kann man diskutieren. Als didaktisches Element zum Erlernen der Decodierung von Höheninformationen aus klassischen Karten wäre so ein Einsatz heute jedenfalls noch durchaus denkbar.



Abb. 25: 3D- Druck Geländemodell Quelle-Bild: <https://www.3d-activation.de/information/anwendungsgebiete/>

Ähnlich wie beim Landschaftsmodellbau verhält es sich bei der Frage, wie generative Fertigungsverfahren im Bereich des Stadt- und Planungsmodellbaus eingesetzt werden können.

Stützt man sich dabei auf die Aussagen von Gerhard STOCKER ([wien.gv.at](http://wien.gv.at)), steht für qualitativ hochwertige Modelle der 3D-Druck nicht in direkter Konkurrenz mit den klassischen Methoden. Jedoch besteht der Vorteil darin, dass „Freiformen“ (STOCKER meint hier geometrisch komplizierte Formen und führt als Beispiel das Kunsthaus Graz an (Abb. 26), die mit herkömmlichen Methoden des Modellbaus nur sehr aufwendig herzustellen sind, durch den Einsatz von generativen Fertigungsverfahren einfacher zu erstellen wären. Er sieht jedoch den Vorteil darin, dass für die Herstellung von Prototypen u. Designstudien generative Fertigungsverfahren von Vorteil sind. Durch diese Verfahren können Modelle schneller hergestellt werden als durch herkömmliche Methoden. STOCKER sieht in generativen Fertigungsverfahren keine Bedrohung, vor allem nicht in der Hinsicht, dass sie herkömmliche Methoden des Modellbaus verdrängen. Vorteile sieht er in der Kombination von unterschiedlichen Verfahren und Arbeitsweisen und somit den 3D-Druck als Bereicherung (vgl. [wien.gv.at](http://wien.gv.at)).

Sind die von STOCKER angesprochenen „Freiformen“ bei Stadtmodellen und ähnlichen Produkten eher als Sonderformen zu klassifizieren, so sind diese aber gerade bei geowissenschaftlichen



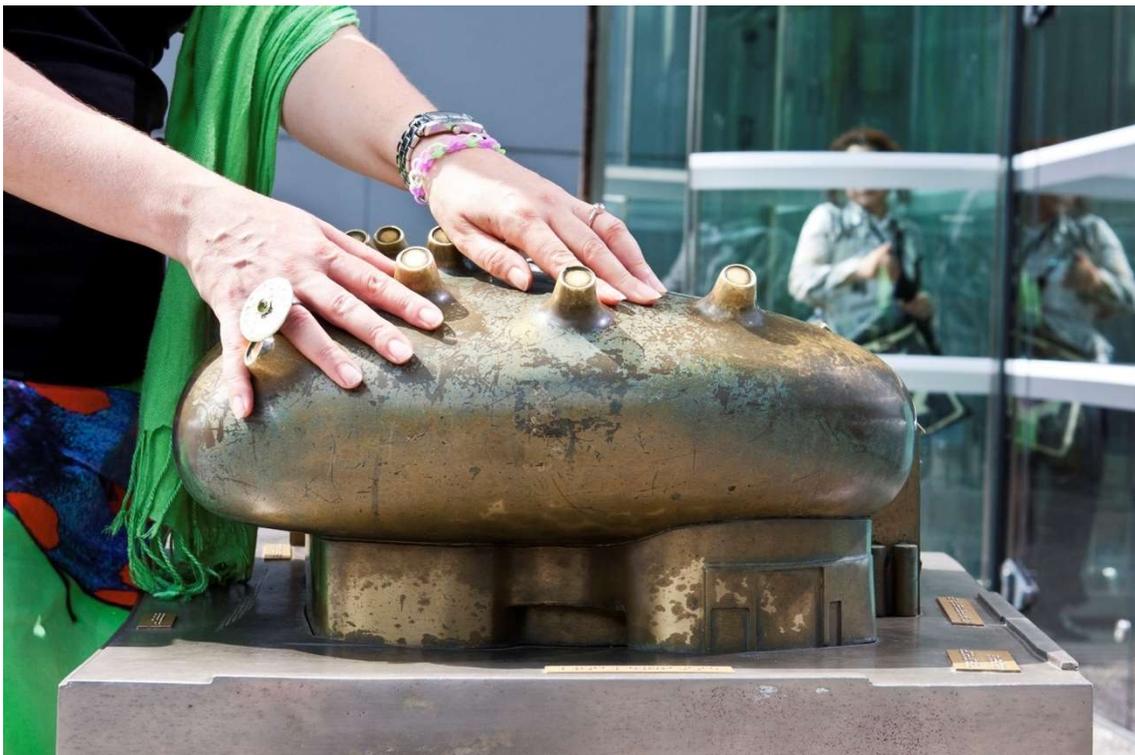
Abb. 26: Form des Kunsthauses Graz. Quelle-Bild: <http://openbuildings.com/buildings/kunsthau-graz-profile-38574#!buildings-media/0>

Fragestellungen vorwiegend die Regel. So sind geometrische Primitiva im Bereich des physischen Modellbaus in den Geowissenschaften nicht häufig präsent.

Wie schon im Bereich des Landschaftsmodellbaus, so finden wir auch im Bereich der Geologie und der klassischen erdwissenschaftlichen Disziplinen wie sie hier in der Arbeit zusammengefasst wurden, fast ausschließlich komplexe „Freiformen“. Als Beispiel für diese Kategorie kann gleich das Untersuchungsobjekt dieser Arbeit (Kapitel 7) herangezogen werden. Bis auf die äußere Begrenzung handelt es sich ausschließlich um „natürliche“ Formen. Das bereits vorgestellte Modell (Abb: 19 S.36) der Geologischen Bundesanstalt, das sich inhaltlich mit der U-Bahn Planung der Stadt Wien auseinandersetzt, macht deutlich, wie komplex geologische Formen sein können. Gerade bei zusammengesetzten Modellen würde der Aufwand an Arbeitsstunden bei der Herstellung mit herkömmlichen Mitteln ein Vielfaches im Vergleich zum 3D-Druck ausmachen. Die, farblich getrennten, Einzelteile repräsentieren geologische Schichte. Das Objekt kann durch Abnehmen der einzelnen Teile bzw. durch ein Auseinanderklappen im Querschnitt der geplanten Trasse „entdeckt“ und untersucht werden. Der verwendete Begriff „entdecken“ bezieht sich auf die Möglichkeit, das Modell auch taktil erfassen zu können – etwas, das bei hochwertigeren Modellen, aus weniger strapazierfähigen Materialien, wie z.B. Gips, weniger gut möglich ist.

Bereits vorweggenommen wurden die Möglichkeiten, die sich durch generative Verfahren im Bereich der Paläontologie ergeben. Durch 3D-Druck wird es möglich, Teile von Fundstücken zu untersuchen, die durch herkömmliche Methoden nicht zerstörungsfrei untersucht werden können. Gerade in diesen Wissenschaftsbereichen sind die Untersuchungsobjekte meist von bedeutenden Wert. Ein weiterer denkbarer Vorteil wäre, dass solche Modelle auch einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden könnten, gerade für den Bildungsbereich eine sehr spannende Möglichkeit. Die taktile Erfassung solch außergewöhnlicher Exponate würde hier einen Mehrwert bringen (vgl. RASE 2010: 41) – womit auch die Überleitung zum letzten zuvor behandelten Beispiel Teil gelegt ist.

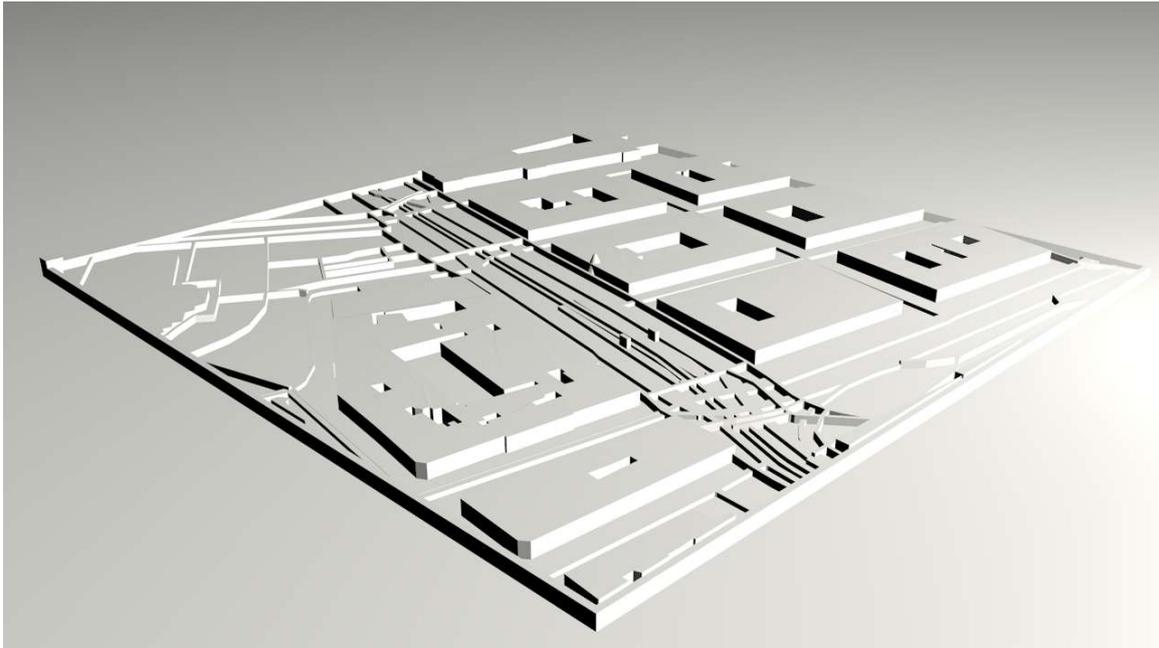
Auch in den Disziplinen in den der Modellbau von nicht so großer Relevanz ist wie die wenigen Beispiele zeigen so ergeben sich in Verbindung mit der Technologie des 3D-Drucks durchaus Möglichkeiten Objekte der zentralen Forschungsgebiete dieser Disziplinen als physische Modelle umzusetzen. Denn wie schon bereits erwähnt und zu einem späteren Zeitpunkt detaillierter erläutert, können 3-Dimensionale Daten sofern sie in Formate transformiert werden können die für die generative Fertigung verwendet werden können auch gedruckt werden



*Abb. 27: Tastmodell, Kunsthaus Graz, Foto: Universalmuseum Joanneum/M. Hal Quelle-Bild:  
<https://www.museum-joanneum.at/blog/am-2-juni-barrierefrei-durchs-kunsthhaus-graz/>*

Die Abbildung 27 zeigt kein Modell aus generativer Fertigung. Es handelt sich um ein Tastmodell aus Bronze. Abgebildet wurde des Kunsthaus Graz. Das Modell dient dem Zweck, dass Menschen mit einer visuellen Beeinträchtigung die sehr spezielle Form (STOCKER nennt eine solche Form eine „Freiform“) des Gebäudes taktile erfassen können.

Mittels geeigneter generativer Verfahren eröffnen sich auch im Bereich der taktilen Karten neue Möglichkeiten, wie z.B. die Webseite [touch-mapper.org](http://touch-mapper.org) zeigt. Auf der Seite können auf Basis von OSM<sup>7</sup> Daten für jeden beliebigen Bereich taktile Karten generiert werden. Die Anwendung legt eher einen Fokus auf topologisch richtige Karten, da die Topographie und andere Attribute (wie unterschiedliche Gebäudehöhen) nicht berücksichtigt werden. Das Beispiel zeigt aber sehr gut, welche Möglichkeiten diese Technologie bieten könnte. Abbildung 28 zeigt das gerenderte 3D-Modell einer aus [touch-mapper.org](http://touch-mapper.org) generierten Karte, die so gedruckt werden könnte.



*Abb. 28: Automatisch generierte taktile Karte der Seite [touch-mapper.org](http://touch-mapper.org), Bereich des Neuen Institutsgebäudes der Universität Wien, M 1:1800. Quelle-Bild: Hofer Florian C4D Render*

---

<sup>7</sup> Open Street Map (OSM) [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org) Einstellungen: Adresse: Neue Institutsgebäude der Universität Wien (Universitätsstrasse 7, M 1-1.800)

## 4.5. Zusammenfassung

Der Einsatz von physischen Modellen im Bereich der Geowissenschaften ist vielfältig. Das zeigt schon die Auswahl der vorgestellten Beispiele der vorangegangenen Seiten: von professionellen Modellen, die von Meistern ihres Fache wie MEIER, IMHOF und PUSCH hergestellt wurden, bis hin zu Produkten der Massenproduktion wie Reliefkarten; von Architekturmodellen und Modellen für die Raumplanung bis hin zu Großmodellen wie den Beispielen von Hamburg und Shanghai, aber auch sehr spezielle Anwendungen, wie die Beispiele aus der Geologie; allen voran aber die Beispiele des Wissenschaftsbereichs der Paläontologie / Archäologie zeigen, wie umfangreich die Auseinandersetzung mit diesem Thema werden kann.

Die Frage „Was gibt es alles?“ ist zwar interessant, aber gleichzeitig auch schwer zu beantworten. Die Frage „Welche Druckverfahren kommen auf Basis ihrer verfahrenstechnischen Eigenschaften für die Umsetzung von Modellen im Bereich der Geowissenschaften in Frage?“ ist schon weitaus relevanter. Um sie zu beantworten, müssen die Parameter, auf Basis deren dann die passenden Verfahren gewählt werden können, definiert werden.

Der Verwendungszweck von generativ gefertigten Modellen, von physischen Modellen generell, ist entscheidend für die Auswahl der Modelleigenschaften bzw. Materialeigenschaften. Modelle für Blinde und sehbehinderte Menschen, stellen andere Ansprüche an die verwendeten Materialien als beispielsweise Rohmodelle für den klassischen Landschaftsbau. Erstere müssen eine sehr hohe Oberflächenqualität (Treppenstufeneffekt) und mechanische Stabilität aufweisen.

Rohmodelle für den Landschaftsbau stellen in diesem Bereich wiederum entgegengesetzte Ansprüche. Hier sollten Materialien eingesetzt werden, die eine Weiterverarbeitung ermöglichen, wie zum Beispiel Gips u. dgl. Bei den gezeigten Beispielen von PUSCH (Abb. 14,22 - 23) diente das generativ gefertigte Modell lediglich als Urform für einen späteren Abguss des eigentlichen Rohmodells. Die Oberflächenqualität des Drucks ist hier z.B. absolut nebensächlich. Die Frage, welches Material für geowissenschaftliche Anwendungen verwendet werden sollte, kann nicht sehr leicht beantwortet werden. Hierzu müsste der Anwendungsbereich viel genauer definiert werden. Denn alleinig der Verwendungszweck des generativ gefertigten Modells bestimmt das eingesetzte Material.

Die graphische Variable Farbe hingegen ist in diesem Anwendungsbereich ein unverzichtbarer Bestandteil – egal ob auf einer mehr ästhetischen Ebene, wie bei den Modellen des klassischen Landschaftsbaus, oder auf einer rein thematischen Ebene wie in Abbildung 29 auf den folgenden Seite.

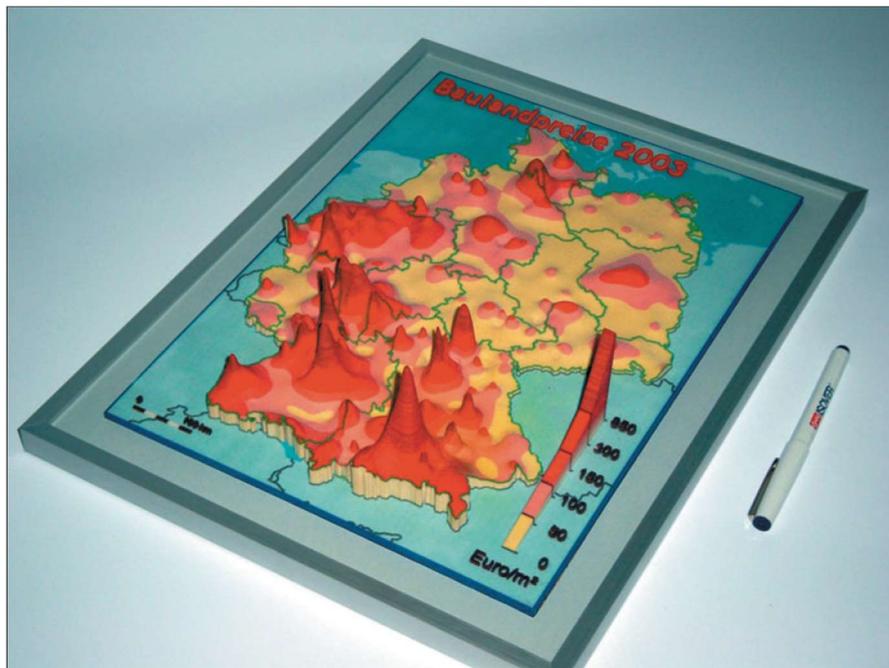


Abb. 29: Farbe als thematischer Layer eines physischen Modells. „physical model of a surface interpolated from polygon-based data (average prices of building lots in 2003)  
Quelle-Bild: RASE 2006: 289, Fig.2

Farbgebung in der generativen Fertigung kann auf zwei unterschiedliche Arten verwirklicht werden. Das Ausgangsmaterial und somit die einzelnen Bauteile können eingefärbt sein. Werden unterschiedliche Bauteile eines Modells mit unterschiedlichen Farben realisiert (Abb. 19), so würde das Modell zwar polychrom in seinem Gesamterscheinungsbild sein, monochrom aber die Bauteile betreffend. „Seit einigen Jahren gibt es jedoch computergesteuerte Geräte [Anm.: generative Fertigungsanlagen], die [...] gleichzeitig die Farbe auftragen können.“ (RASE 2010: 38). Was RASE damit meint, sind vorwiegend 3DP (Kap. 5.5.5) Verfahren die mit dem Bindemittel, welches das Ausgangsmaterial verbindet, gleich wie Tintenstrahldrucker (CMYK<sup>8</sup>) gleichzeitig Farben auftragen können

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, sind im 3D Druck zwei Richtungen zu erkennen. Die kommerzielle Nutzung generativer Fertigungstechniken entwickelt sich schon seit den Anfängen dieser Technologie 1986 stetig weiter (vgl. Kap: 5.4.1). Seit 2009 jedoch gewinnt die generative Fertigung mit der Entwicklung von einfacheren und vor allem günstigeren Fertigungsanlagen für den Endverbraucher immer mehr an Bedeutung (HOROWITZ et.al. 2014:139).

<sup>8</sup> CMYK = Cyan – Magenta – Yellow - Black

Die Aufteilung der Verfahren in der generativen Fertigung in einen kommerziellen und einen semiprofessionellen (Endverbraucher) Zweig könnte man auch im Bereich der Geowissenschaften vollziehen, hier jedoch auf einer anderen Ebene.

Nicht der Benutzer oder die Benutzerin definieren den Bereich, der für die Geowissenschaften von Interesse ist, sondern die Anwendung bzw. der Verwendungszweck selbst. Der potentielle Anwendungsbereich in den Geowissenschaften liegt in der Kommunikation; Kommunikation von wissenschaftlichen Inhalten auf Basis der Generierung eines Mehrwertes durch die Möglichkeit einer taktilen Erfassung und einer echten 3-dimensionalität.

Anwendungsbereiche wie die individuelle Erstellung von taktilen Karten ([touch.mapper.org](http://touch.mapper.org)) oder die Anfertigung von Urformen für die Herstellung des Rohmodells stellen weniger große Ansprüche an generative Fertigungsverfahren als etwa das Beispiel von RASE in Abbildung 29.

Es wurde bereits erwähnt, dass physische Modelle gerade im Bildungsbereich einen didaktischen Mehrwert besitzen. So können Modelle von selbst definierten oder selbst generierten Objekten erschaffen werden. Dazu ist es aber notwendig, dass das generative Fertigungsverfahren inklusive der benötigten Software die Bedienung durch Laien ermöglicht. Somit stellt die Bedienbarkeit einen Faktor dar, der im Zusammenhang mit dem Fachbereich der Arbeit von Bedeutung ist.

Wir kehren in Kapitel 6 bei der Analyse der Druckverfahren wieder zurück zu der Frage, welche Druckverfahren für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche am geeignetsten sind. Für die Frage nach geeigneten Druckverfahren ist ein Überblick über die zurzeit gebräuchlichsten Verfahren sowie eine Auseinandersetzung mit den grundlegenden Eigenschaften von generativen Fertigungsverfahren sinnvoll. Darum werden in Kapitel 5 alle wichtigen Bereiche der generativen Fertigung bearbeitet.

## 5. Generative Fertigungsverfahren

Um sich auf einer wissenschaftlichen Ebene dem Thema „3D-Druck“ zu nähern, muss der Platz, den diese Technologie im Feld der Fertigungsverfahren und -techniken einnimmt, näher erläutert werden. Als Fertigungstechnik versteht man jenen der Produktionstechnik untergeordneten Teil, in dem Produkte erzeugt werden, die gekennzeichnet sind durch stoffliche oder geometrische Merkmale (vgl. KÜHN 2015: 1). Eingeteilt werden die Verfahren in sechs Hauptgruppen (Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten, Stoffeigenschaft ändern) und weitere Untergruppen nach DIN 8580 (vgl. WESTKÄMPER und WARNECKE 2010: 6). Durch die sehr feine Gliederung ist eine Zuordnung der generativen Fertigung nicht einfach zu treffen. Andreas GEBHARDT (2013: 1, 91f.) orientiert sich für einen ersten gröberen Überblick an der angelsächsischen Einteilung. Diese richtet sich vorwiegend danach, wie die Geometrie des Produktes erzeugt wird. Diese Einteilung gliedert sich in folgende Verfahren:

- **Subtraktive** Fertigungsverfahren – Änderung der Geometrie durch Abtragen (Fräsen, Drehen, ...)
- **Formative** Fertigungsverfahren – Änderung der Geometrie durch Umformung (Schmieden, Pressen, ...).
- **Additive** Fertigungsverfahren – Aufbau der Geometrie durch Aneinanderfügen von Volumenelementen.

(Einteilung der Fertigungsverfahren nach GEBHARDT 2013: 1)

Die Verfahrensgruppe der generativen Fertigung wird nach dieser Einteilung zu den additiven Fertigungsverfahren gezählt. In einem computergesteuerten Schichtbauprinzip (genauere Erläuterung in Kap 5.2.) werden einzelne Schichten aneinandergefügt, sozusagen addiert (vgl. GEBHARDT 2013: 1f.). Ob additive od. generative Fertigungsverfahren, 3D Druck oder Rapid Prototyping, viele dieser Begriffe werden in der Literatur verwendet. Vor allem in der deutschen Literatur mischen sich immer wieder Begriffe ein, deren ursprüngliche Verwendung aus dem angelsächsischen Sprachraum stammt. Neben diesen Überbegriffen, die die Fertigungstechnologie in ihrer Grundstruktur beschreiben wollen, kann die generative Fertigung noch detaillierter klassifiziert werden. Vor allem in populärwissenschaftlichen Publikationen (vgl. FASTERMANN 2012; FASTERMANN 2014; HAGL 2015) geschieht die Einteilung der Verfahren fast ausschließlich auf Basis von Produktnamen und Herstellerbezeichnungen und nicht auf den generischen Bezeichnungen, die GEBHARDT (2013: 92) zu seiner Klassifikation heranzieht (vgl. GEBHARDT 2013: 3). Falls doch eine genauere Einordnung vorgenommen wird, wie z.B. in FASTERMANN (2012: 5), so geschieht dies (vergleicht man sie z.B. mit GEBHARDT (2013: 91), in einer sehr verkürzten und überblicksartigen Weise. Für fundierte wissenschaftliche Aussagen ist es aber unumgänglich, eine korrekte Zuordnung der Verfahren vorzulegen. Daher ist es für diesen Abschnitt der Arbeit notwendig, eine Klassifikation auf Basis der generischen Bezeichnungen

durchzuführen. Als Basis wird hierbei die von GEBHARDT (2013: 92) vorgenommene Einteilung verwendet bzw. darauf aufgebaut. Die Herstellerbezeichnungen und Produktnamen werden in Kapitel 5.5., in dem die unterschiedlichen Fertigungsverfahren detaillierter beschrieben werden, angefügt.

Im folgenden Kapitel nähern wir uns der Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren an. Dazu werden Begriffe definiert und eine nähere Einteilung getroffen, die das Grundprinzip der generativen Fertigung näher beleuchtet, auf den Stand der Entwicklung eingegangen sowie der Weg vom 3-dimensionalen Modell am Computer bis hin zur druckfähigen Datei beschrieben.

## **5.1. Begriffsbestimmung und systematische Einteilung**

Additive od. generative Fertigungsverfahren, Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, additive Manufacturing, 3D-Printing 3D-Druck – sind nur einige der Begriffe die in der Arbeit zum Teil schon verwendet wurden. Doch wovon sprechen wir denn genau, wenn wir den mittlerweile sehr weit verbreiteten Begriff des 3D Druckens verwenden? Auf diese Frage wollen wir in diesem Abschnitt näher eingehen.

Der Begriff „3D-Druck“ wird, wie GEBHARDT (2013: 3) beschreibt, „in wenigen Jahren als generische Bezeichnung für alle automatisierten Schichtbauverfahren (...) akzeptiert sein“, und somit den eher technischen Begriff „Generative Fertigungsverfahren“ ablösen. FASTERMANN (2014: 11) schreibt in ihrem Buch, dass der 3D-Druck als generatives Fertigungsverfahren bezeichnet wird und zu den additiven Herstellungsverfahren zählt. Bei FASTERMANN (2014: V) scheint es, als hätte sich der Begriff „3D-Druck“ bereits als übergeordnete Bezeichnung durchgesetzt. Verständlicherweise handelt es sich hierbei um Literatur für die Zielgruppe der privaten EndanwenderInnen.

Obwohl es sich hierbei lediglich um Feinheiten bei der Formulierung handelt, können sie jedoch sehr wohl zu Verwirrungen führen. Egal, welcher Begriff im Zusammenhang mit 3D-Druck verwendet wird, gemeint ist grundsätzlich dasselbe. Je wissenschaftlicher die Auseinandersetzung mit dem Thema, desto eher wird auf die technischen Begriffe wie „additive od. generative Fertigungsverfahren“ zurückgegriffen.

Wenn man sich auf die Aussage von GEBHARDT (2013) bezieht, dass die generische Bezeichnung „Generative Fertigungsverfahren“ vom Begriff 3D-Druck abgelöst werden wird, dann trifft dies vor allem auf den deutschsprachigen Raum zu. Im englischen Sprachraum verhält es sich ähnlich. Hier ist der Begriff „Additive Manufacturing“ gleichzusetzen mit dem Begriff der generativen Fertigungsverfahren. Auch hier ist der Begriff „3D-Printing“ dabei, seine generische Bezeichnung abzulösen. Der Begriff der „Additiven Fertigung“ kommt zwar in der deutschen Literatur durchaus vor, ist aber bei weitem nicht so gebräuchlich (vgl. GEBHARDT 2013: 3).

Eine Unterscheidung der Generativen Fertigungsverfahren nach ihrem Anwendungszweck, den Endprodukten, wie sie sehr oft getroffen wird, sieht wie folgt aus:

- **Rapid Prototyping** (Herstellung von Konzept- oder Design-, Geometrie- und Funktionsmodellen, die hinsichtlich des Materials und der Oberflächenqualität nicht einem Endprodukt entsprechen).
- **Rapid Tooling** (Herstellung von Vorrichtungen, Werkzeugen und Formen)
- **Rapid Manufacturing** (Herstellung von kundenspezifischen Endprodukten in einzel- oder Kleinserie)
- **Additive Manufacturing** (Herstellung von Serienprodukten)  
(FRITZ et al. 2015: 114)

Einige dieser Begriffe werden umgangssprachlich fälschlicherweise mit 3D-Druck / generativer Fertigung gleichgesetzt. Sie stellen grundsätzlich nur die feinere Untergliederung des Überbegriffs auf Basis des Anwendungszweckes dar.

Basis für eine feinere Gliederung der unterschiedlichen Verfahren in Verfahrensfamilien (Abb. 30 Ebene 4) und die Zuordnung von bestehenden generativen Fertigungsanlagen zu diesen geschieht auf Basis der grundlegenden physikalischen Prozesse (Abb. 30 Ebene 1). Als Kriterium zur Unterscheidung wird der Aggregatzustand (Abb. 30 Ebene 3), des Ausgangsmaterials (Abb. 30. Ebene 2) bei der Erzeugung der Schicht herangezogen.

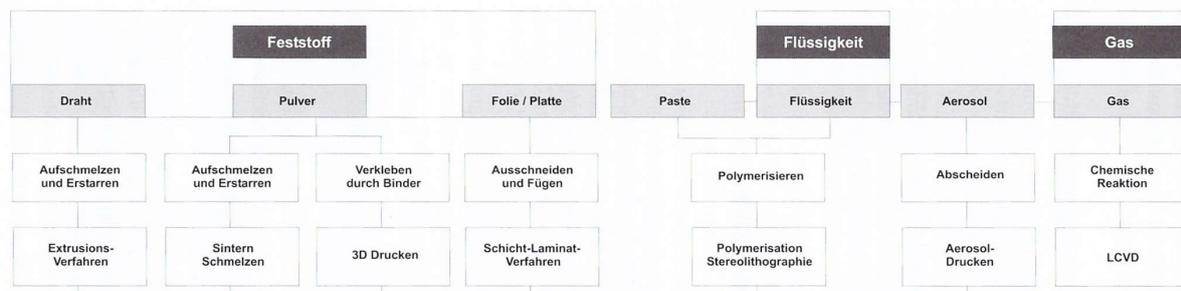


Abb. 30: Klassifizierung der generativen Fertigungsverfahren nach den Aggregatzuständen des Ausgangsmaterials in Anlehnung an die DIN 8580. – Quelle: GEBHARDT 2013:92

- Generieren aus der flüssigen Phase (Flüssigkeit)
  - Verfestigung, vorzugsweise durch Polymerisation flüssiger oder teigiger Materialien.
- Generieren aus der festen Phase (Feststoff)
  - An- oder Aufschmelzen und Verfestigen von Pulvern, Pulvermischungen oder Granulaten,
  - Ausschneiden oder Ausfräsen aus Folien, Bändern oder Platten,
  - An- oder Aufschmelzen und Verfestigen von festen Materialien,
  - Verkleben von Granulaten oder Pulvern durch Binder

- Generieren aus der Gasphase (Gas)
  - Physikalisches Abscheiden aus Aerosolen,
  - Chemisches Abschneiden aus der Gasphase

(GEBHARDT 2013: 47, vgl. WESTKÄMPER et.al. 2010: 264, AWISZUS et.al. 2016: 327)

*„Auf der Basis der grundlegenden physikalischen Prozesse sind seit etwa 1987 weit über hundert industriell einsetzbare Maschinen zur direkten computergestützten Fertigung physischer Bauteile entwickelt und auf den Markt gebracht worden. Im Folgenden werden aus der Menge der weltweit verfügbaren generativen Anlagen die Vertreter der zurzeit wichtigsten, weil industriell bedeutsamsten, Generativen Verfahrensfamilien näher betrachtet. Diese sind:“*

(GEBHARDT 2013 101).

<b>Polymerisation</b> (Laser-)Stereolithographie Polymerdrucken	(Laser-) Stereolithography Polymer-Printing	(SL)
<b>Sintern/Schmelzen</b> (Selektives) Lasersintern Selektives Laserschmelzen Selective Mask Sintering Elektronenstrahlschmelzen	(Selective) Lasersintering Selective Laser Melting Selective Mask Sintering Electron Beam Melting	((S)LS) (SLM) (SMS) (EBM)
<b>Schicht-Laminat-Verfahren</b>	Layer Lamine Manufacturing	(LLM)
<b>Extrusionsverfahren</b>	Fused Layer Modeling	(FLM)
<b>3D-Drucken<sup>9</sup></b>	Three-Dimensional Printing	(3DP)
<b>Aerosoldrucken</b>	Aerosol-Printing	

*Tabelle 1: Einteilung der wichtigsten generativen Verfahren in Verfahrensfamilien inkl. englischer Bezeichnung und gebräuchlicher Abkürzung (GEBHARDT 2013: 101).*

Tabelle 1 listet die sechs Gattungen der generativen Fertigungsverfahren auf. Gemeinsam mit den englischen Übersetzungen und den dazugehörigen Abkürzungen stellen sie die generischen Namen der einzelnen Verfahren dar. Bei dieser Auflistung wird ersichtlich, warum der Begriff des 3D-Drucks als Überbegriff für generative Verfahren bedenklich ist. 3D-Drucken<sup>1</sup> (Three-Dimensional Printing / 3DP) ist in dieser Auflistung eine eigene Gattung unter den Verfahrensfamilien der generativen Fertigung. HAGL (2015), FASTERMANN (2012, 2014) folgen in Grundsätzen bei Ihren Einteilungen der dreiteiligen Klassifikation von GEBHARDT. Auf eine klare Zuordnung der beschriebenen Verfahren zu einer klar definierten Verfahrensfamilie, wie sie GEBHARDT vornimmt, wird aber verzichtet. Vorwiegend werden Verfahren vorgestellt, die vermutlich zum Zeitpunkt der Publikation als weit verbreitet galten. Es erfolgt keine klare Abgrenzung von Gattungsbegriffen wie in Tabelle 1 zu Produktbezeichnungen (meist in Form von Abkürzungen, bestehend aus 3 Buchstaben) wie sie von

<sup>9</sup> Der Begriff „3D-Drucken“ wird in der Arbeit als Pendant zum Begriff „generative Fertigung“ verwendet. Für den Begriff „3D-Drucken“ als Verfahrensart wird in der Arbeit der englische Begriff „Three Dimensional Printing“ od. „3DP“ herangezogen.

Herstellern zum Teil als Markenzeichen für die von Ihnen entwickelten Spezialverfahren vergeben werden (vgl. GEBHARDT 2013: 102).

Möchte man nun einen generellen Überblick über den Stand der Technik betreffend der generativen Fertigungsverfahren geben sowie die Grundprinzipien der einzelnen Verfahrensarten erklären, so eignet sich von den genannten AutorInnen nur GEBHARDT. Seine Klassifikation basiert auf einer normierten Einteilung auf Basis nachvollziehbarer Kriterien. Nicht die speziellen Eigenschaften neu entwickelter Verfahren, sondern die grundsätzlichen Unterschiede der Verfahrensklassen sind Hauptaugenmerk seines Werkes. Diese objektive Herangehensweise steht auch im Zeichen dieser Arbeit, weshalb in Kapitel 5.5 bei der Vorstellung der unterschiedlichen Verfahren auf GEBHARDT zurückgegriffen wird. Grund für diese Divergenz zwischen unterschiedlichen AutorInnen ist vermutlich auch das Entwicklungstempo, dem die generativen Fertigungsanlagen unterliegen. Verfahren, die jetzt in marktführenden Positionen sind, können in sehr kurzer Zeit nicht mehr aktuell sein. Eine Klassifizierung nach länger gültigen physikalisch-technologischen Gesichtspunkten ist daher einer Klassifizierung nach kommerziellen Gesichtspunkten vorzuziehen (vgl. ebd.: 21).

Zusätzlich zu der Unterscheidung von Verfahrensfamilien und der Unterteilung in unterschiedliche Anwendungsbereiche (siehe Tabelle 6) werden generative Fertigungsanlagen entsprechend ihrer Anwendungsbereiche wie folgt in Maschinenklassen zu Produktion unterteilt:

- Ansichts- und Konzeptmodelle
- Funktionsbauteile (oder Komponenten davon)
- Endprodukte (oder Komponenten davon)

Und werden bezeichnet als:

- Fabber, Personal 3D Drucker oder Personal 3D Printer
- Office Printer, Professional 3d Drucker oder Professional 3D Printer
- Produktionsmaschinen, Production 3D Drucker oder Production 3D Printer

(ebd. 2013: 17)

Unterteilt werden die Maschinen in zwei Klassen:

Die Klasse der **Prototyper** (en) werden vor allem im privaten Bereich eingesetzt und gemein hin als Fabber (von Fabrikator) bezeichnet. Dabei handelt es sich um leicht zu bedienende, preiswerte und nicht sehr komplexe Maschinen, die vornehmlich aus der Familie der Extrusionsverfahren kommen.

Die Klasse der **Fabrikator**<sup>10</sup> (en) reicht von kompakten Office Printern, die im semi-professionellen Bereich angesiedelt sind bis hin zu großen Produktionsmaschinen, in denen hochqualitative Produkte von speziell geschultem Personal erzeugt werden. (vgl. ebd.: 17ff.)

---

<sup>10</sup> Die Klasse der **Fabrikator** (en) darf nicht mit der Übersetzung der Kurzbezeichnung **Fabber** aus dem deutschen verwechselt werden.

## 5.2. Grundprinzip der generativen Fertigung

„Bei allen Generativen Fertigungsverfahren entstehen die Bauteile durch das Fügen von Schichten gleicher Dicke. Die Konturierung (Formgebung) jeder Schicht erfolgt in der x/y-Ebene, der sogenannten Bauebene und damit flächig (2D). Die dritte Dimension entsteht nicht als kontinuierliche z-Koordinate, sondern durch das Aufeinanderfügen der Einzelschichten. Generative Verfahren sind deshalb streng genommen  $2^{1/2}D$  Verfahren“ (ebd.: 21).

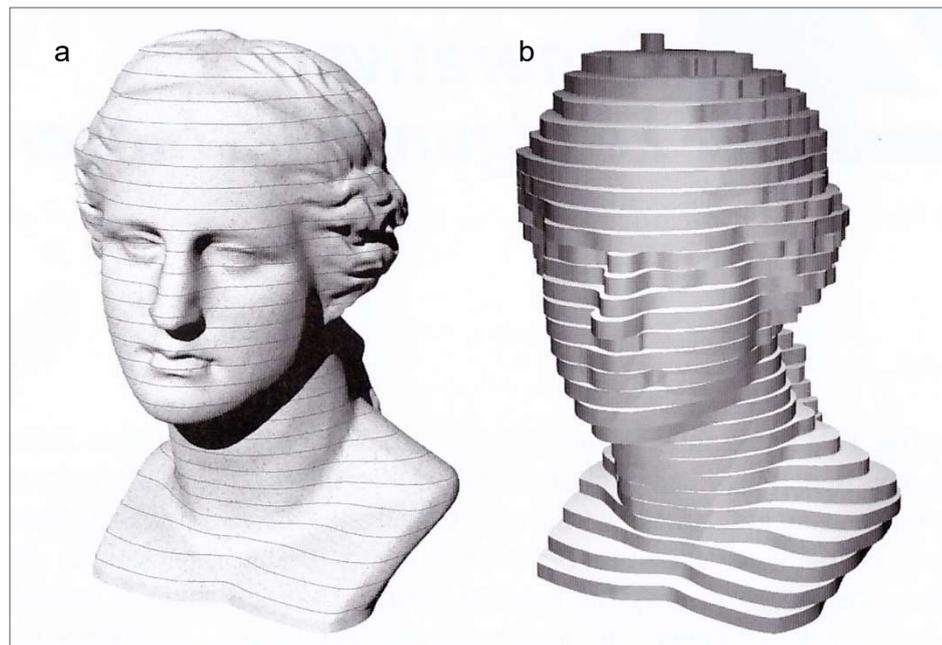


Abb. 31: Stufige Oberfläche als Folge des Schichtbauverfahrens, Prinzip. Dreidimensionales Volumenmodell (links) mit angezeichneten äquidistanten Schichten und das daraus entwickelte Schichtmodell (rechts) Quelle: FH Aachen. (GEBHARDT 2013: 22 Bild 2.1)

Ausgangsbasis jedes Druckes ist ein 3-dimensionales Modell (Volumenmodell) wie in Abb. 31 a. Um dieses Modell druckfähig zu machen, muss es computergestützt in äquidistante Schichten zerteilt werden (Abb. 31 b). Jede Schicht wird in einem einzelnen Arbeitsschritt durch die Maschine auf der X/Y-Bauebene erzeugt. Dabei bewegt sich entweder der Druckkopf oder der Bauraum selbst, auf dem das Modell erzeugt wird. Ist eine Schicht fertiggestellt, erfolgt eine Anpassung in der Z-Ebene um eine vorher definierte Schichtdicke. Hierbei wird wiederum entweder der Druckkopf oder der Bauraum selbst angehoben oder abgesenkt.

Kann auf der X/Y-Ebene aus Verfahrensgründen eine kontinuierliche Struktur erzeugt werden, so tritt in der Z-Ebene der Treppenstufeneffekt auf. Eine kontinuierliche Veränderung um die Z-Ebene im Schichtbauverfahren ist nicht möglich. Daraus resultiert eine relativ hohe Genauigkeit der Druckverfahren in der X/Y-Ebene und eine schichtdickenabhängige Genauigkeit in der Z-Ebene. Die Wahl der Schichtdicke hat somit Einfluss auf die Genauigkeit des produzierten Elementes (Abb. 32).

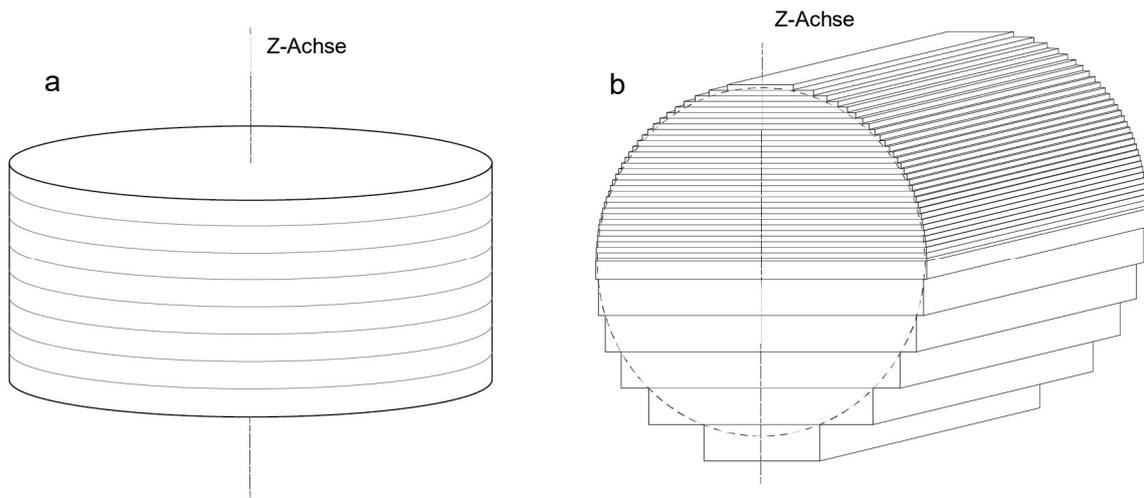


Abb. 32: Prinzipbedingte Stufung bei schichtorientierten Verfahren am Beispiel eines Zylinders. a) Zylinder parallel (quer) zur Schichtebene; b) Zylinder normal zur Schichtebene sowie Auswirkung der Schichtäquidistanz auf die Genauigkeit des Objektes – EIGENE DARSTELLUNG (nach GEBHARDT 2013: 22f Bild 21. u. 2.3).

Es besteht auch ein direkter Zusammenhang mit der Bauzeit. Je größer die Zahl der zu erzeugenden Schichten, desto länger die Bauzeit und desto detaillierter das Endprodukt und umgekehrt (vgl. FRITZ et al. 2015: 115).

Grundsätzlich ist es möglich, das Modell, das generiert werden soll, in einer beliebigen Ausrichtung im Bauraum erzeugen zu lassen. Das eröffnet die Möglichkeit, den Treppeneffekt zu reduzieren bzw. unter Umständen ganz zu beseitigen. Je komplexer das Modell ist, desto schwieriger wird eine solche Optimierung der Genauigkeit durch die Ausrichtung im Bauraum. Abbildung 33 zeigt anhand eines Zylinders, einer sehr einfachen geometrischen Figur, wie sich unterschiedliche Lagerungen im Bauraum positiv oder negativ auf die Genauigkeit auswirken können.

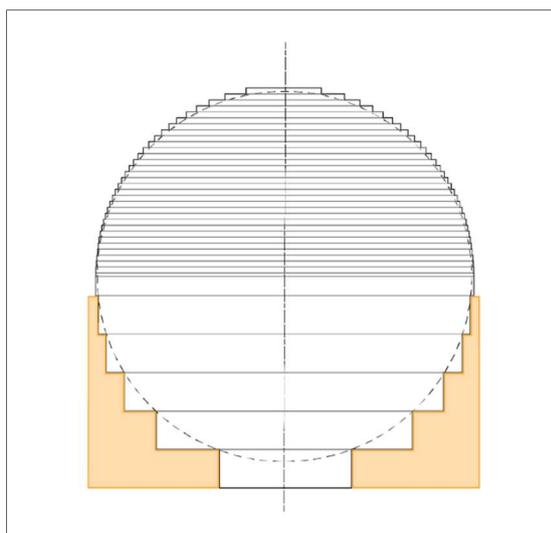


Abb. 33: Schematische Darstellung einer Stützkonstruktion (orange) eines parallel zur Schichtrichtung liegenden Zylinders (Aufriss-Ansicht). EIGENE DARSTELLUNG (nach GEBHARDT 2013: 22f Bild 21. u. 2.3)

Auch der Einfluss der Schichtdickenäquidistanz auf die Genauigkeit des Objektes wird in Abbildung 32 b schematisch dargestellt (vgl. GEBHARDT: 22ff.). Liegt der Zylinder normal zur z-Achse (Abb. 32 a), so obliegt die Formgebung des Objektes der X/Y-Achse, welche wie vorhin erwähnt die Eigenschaft hat, kontinuierliche Formen zu erzeugen. Würde man den Zylinder quer zur z-Achse legen (Abb. 32 b, u. 33), so obliegt die Formgebung des Objektes der Z-Achse, welche dazu nicht geeignet ist. Das Ergebnis wäre ein Zylinder, der je nach gewählter Schichtdicke einen mehr oder weniger ausgeprägten Treppeneffekt aufweisen würde. Der schichtbedingte Aufbau

komplexerer Objekte steht vor einer weiteren Herausforderung. Jede Schicht benötigt für ihren Aufbau eine Grundlage, sprich Basis, auf der sie aufgebaut werden kann.

Ist die aktuell zu produzierende Schicht in ihrer X/Y-Ausdehnung größer als die vorhergehende, würde es keine Basis für diese Schicht im überstehenden Bereich dieser zur vorhergehenden geben, auf die sie aufgebaut werden kann. Um dieses Problem zu umgehen, sind generative Fertigungsanlagen sowie die Steuerungssoftware in der Lage, Stützkonstruktionen zu bauen, die überhängende Bereiche während des Bauprozesses stützen. Am Beispiel des Zylinders wird in Abbildung 33 schematisch angedeutet, für welche Bereiche des Objektes eine Stützkonstruktion notwendig wäre (vgl. FASTERMANN 2012: 14ff.).

Stützkonstruktionen können (halb-)automatisch von der Drucksoftware (Kap 5.4) generiert werden und müssen nicht zwingend in die Erstellung des Objektes miteingeplant werden (vgl. FRITZ 2015: 115). Je nach Druckverfahren gibt es Unterschiede in der Art der Konzipierung der Stützkonstruktion; in manchen Verfahren kann überhaupt auf eine Stützkonstruktion verzichtet werden, da verfahrenstechnische Eigenschaften diese Aufgabe übernehmen.

Neben der externen Stützkonstruktion, die auch als solche beschrieben wird, kommt bei der generativen Fertigung auch eine interne Stützkonstruktion zur Anwendung. Diese wird als Modellfüllung oder Füllung bezeichnet. Technisch gesehen ist es möglich, das Innere des Modells vollständig mit Material auszufüllen. Wirtschaftlich und ökonomisch ist dies nicht immer zielführend, da dies in einem größeren Materialverbrauch und einer längeren Bauzeit resultiert. Die Festigkeit des Bauteils kann dadurch jedoch gesteigert werden.

Wie die Stützkonstruktion müssen Füllungen bei der Erstellung des Modells nicht berücksichtigt werden. Diese werden von der Drucksoftware automatisch generiert. Die sogenannten „Hatches“, eine an Waben erinnernde Struktur, dienen dabei zur Stabilisierung des Bauteils. Bei speziellen Fertigungsverfahren (Polymerisation, Sintern, Schicht-Laminat-Verfahren usw.) muss bei einigen Verfahren darauf geachtet werden, dass das nicht verfestigte Material in den Zwischenräumen der „Hatches“ nach dem Bauprozess aus dem Inneren des Modells entfernt werden kann (Drainageöffnungen).

Bei den meisten Softwarelösungen und Steuerungsprogrammen für generative Fertigungsanlagen können Einstellungen wie die Dichte der Füllung (Hohlraumvolumenanteil) eingestellt werden. Auch hier besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Bauzeit, Bauteil-Preis und Dichte der Füllung (vgl. GEBHARDT 2013: 125).

### 5.3. Faktoren der Genauigkeit

Eine Kernfrage der Arbeit dreht sich um den Begriff der Genauigkeit von generativen Fertigungsverfahren und den damit produzierten Modellen od. Bauteilen. Der Genauigkeitsbegriff wird in der Fachliteratur unterteilt und beinhaltet einerseits den Begriff der *Prozessgenauigkeit* und den der *Maschinengenauigkeit*. In den Begriff der Prozessgenauigkeit fallen alle Schritte, die zur Erzeugung eines generativ gefertigten Bauteiles zählen, von der Datenaufnahme und Datenmodellierung über die Erstellung der druckfähigen Datei bis hin zum Druck und etwaige Schritte der Nachbearbeitung. Der Begriff der Maschinengenauigkeit bezieht sich, wie der Name schon erahnen lässt, lediglich auf die generative Fertigungsanlage selbst. (vgl. ebd.: 295).

- *„Maschinengenauigkeit ist die unter Idealbedingungen erzielbare Genauigkeit, wie sie üblicherweise den Herstellerangaben zu entnehmen ist.“*
  - *„Prozessgenauigkeit ist die unter Einbeziehung der gesamten Prozesskette resultierende Genauigkeit“*
- (GEBHARDT 2013: 295)

Bezüglich der Maschinengenauigkeit unterscheidet GEBHARDT vier Faktoren, die die Genauigkeit des Endproduktes maßgeblich beeinflussen können (vgl. GEBHARDT 2013: 296).

- Maschine und deren konstruktive Besonderheiten
  - Prinzip der Schichtgenerierung
  - Material
  - Erfahrung des Anwenders, z. B. bei der Positionierung des Bauteils im Bauraum
- (GEBHARDT 2013: 296)

Der letzte Punkt wird mittlerweile von vielen Steuerungsprogrammen, sogenannten Drucker-Treibern, übernommen. Die Software platziert und orientiert, wenn gewünscht, das Bauteil automatisch, um so effizient wie möglich drucken zu können (vgl. FASTERMANN 2012: 140). Die spezielle Orientierung des Bauteils zur Vermeidung von Treppenstufeneffekten, etwas, das zu einer Qualitätssteigerung (Oberfläche, Genauigkeit) führen könnte, kann soweit dem Autor bekannt, noch nicht automatisch realisiert werden.

## 5.4. Verfahrensablauf: Data - Digital Model - Touchable Model

Zu Beginn des generativen Fertigungsprozesses steht ein 3-dimensionales digitales Modell. Es ist dabei nicht entscheidend, aus welcher Grundlage der 3D Datensatz hervorgeht. Entscheidend ist dabei ausschließlich, dass aus den Daten, durch Zwischenoperationen ein 3D Volumenmodell erzeugt werden kann (Kap 5.4.1). Weit verbreitet ist dabei die Konstruktion von 3-dimensionalen Modellen durch 3D CAD Programme wie zum Beispiel *AutoCAD* oder die Freeware Option *SketchUp*, um nur einige der vermutlich bekanntesten Optionen zu nennen. Aber auch 2D-Zeichnungen, 3-dimensionale Messdaten wie zum Beispiel Punktwolken aus Laserscanmessungen oder Rasterdaten wie die von digitalen Höhenmodellen (DEM) sind für die Weiterverarbeitung geeignet. Die Daten müssen dazu nur über Zwischenschritte in 3D-Volumeninformationen umgewandelt werden (vgl. GEBHARDT 2013: 32f u. 539).

Ein 3-dimensionales Volumenmodell, unabhängig aus welchen Originär-Daten erstellt, muss für die Weiterverarbeitung in ein neutrales Format umgewandelt werden (Abb. 34), welches in der Lage ist, die notwendigen Informationen für die generative Fertigung bereitzustellen, nämlich die Schichtinformationen. *„Für die generative Fertigung 3-dimensionaler Bauteile muss das 3D CAD Volumenmodell mathematisch in gleiche Schichten zerlegt werden. Für jede dieser Schichten muss die Kontur definiert vorliegen, um in der Maschine physisch umgesetzt werden zu können. Den Vorgang der Erzeugung der Schichten nennt man slicen. Dazu gibt es im Wesentlichen zwei Verfahren: Die Triangulation und das direkte Schneiden im CAD. Die Triangulation führt auf das STL-Format, das direkte Schneiden auf das CLI- (SLI-) Format (Kap. 5.4.2)“* (GEBHARDT 2013: 34).

Die für den Verfahrensablauf wesentlichen Bestandteile sind also ein 3D Volumenmodell und die Konvertierung dieser Modelle in plattformunabhängige Datenformate, welche für die Kommunikation mit generativen Fertigungsanlagen verwendet werden können und die dafür notwendige Schichtinformationen besitzen. Dabei wird eine für die Arbeit sehr wichtige Frage aufgeworfen. Gängige CAD Programme oder 3D Grafiksoftware wie *AutoCAD*, *Cinema 4D* oder *Blender* sind in der Lage, aus 3D Volumenmodellen das benötigte STL Dateiformat zu exportieren oder diese gegebenenfalls umzuwandeln. Die Frage, die sich nun stellt, ist: Welche 3D Datenformate und Softwareanwendungen werden in den geowissenschaftlichen Disziplinen verwendet? Grundsätzlich kann dazu gesagt werden: Falls fachspezifische Programme in der Lage sind, direkt druckfähige Dateien zu exportieren, ist dies natürlich ein Vorteil. Es wird aber auch immer möglich sein, über eine andere Software diese Daten für den Druck aufzubereiten.

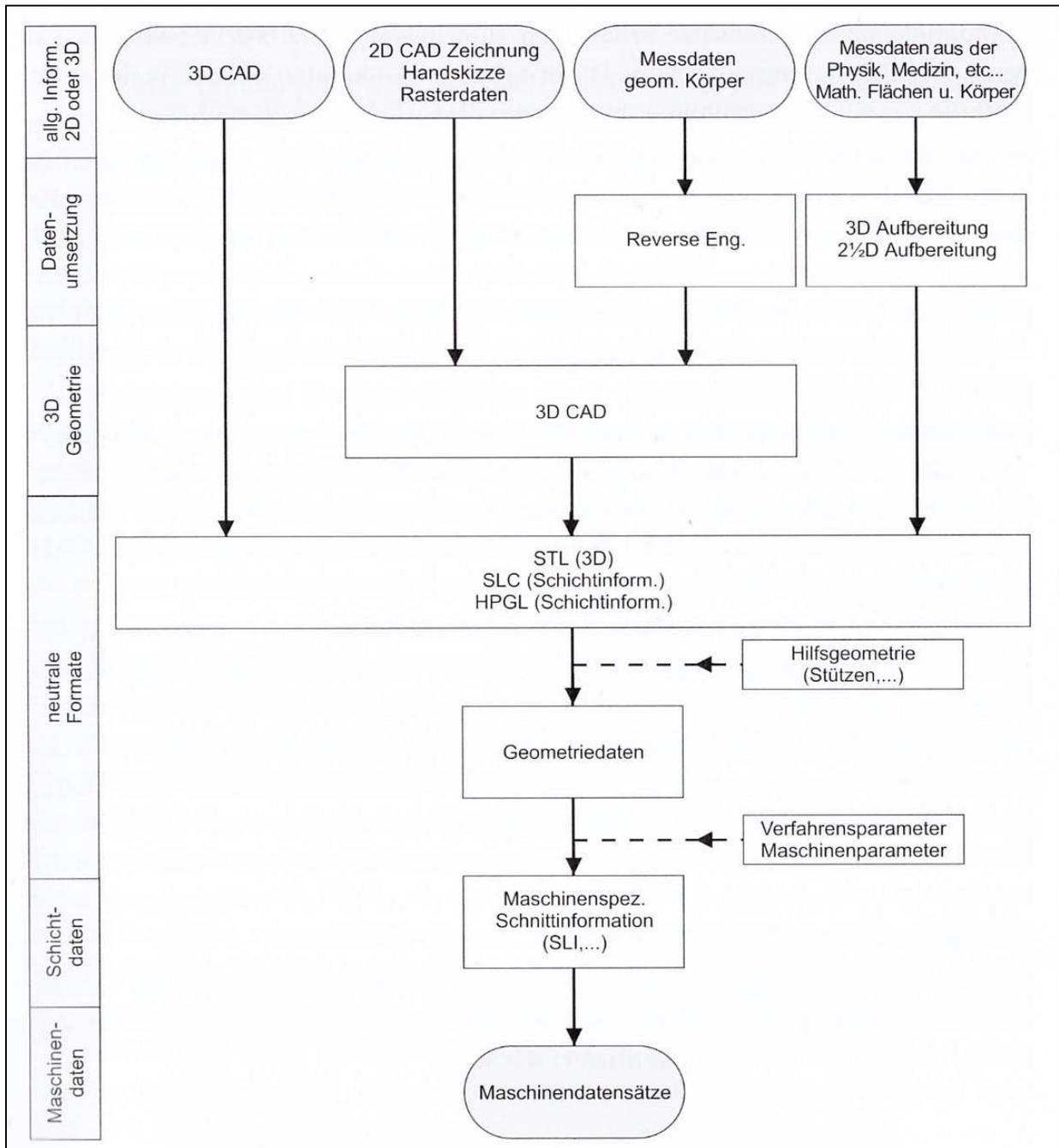


Abb. 34: Verallgemeinerte Darstellung der Datenwege für die Generative Fertigung (GEBHARDT 2013: 33 Bild 2.8)

### 5.4.1. 3D Modelle

Bei 3-dimensionalen Modellierungen gibt es wesentliche Unterschiede, wie die Modelle aufgebaut bzw. konstruiert sind. Nicht jedes Modell eignet sich dazu, als physisches 3-dimensionales Modell gedruckt zu werden. In der Tabelle sind die einzelnen Modelltypen und ihre Eigenschaften überblicksartig erklärt.

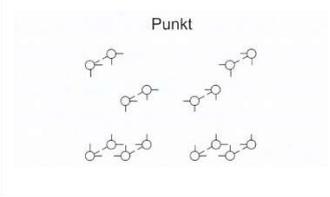
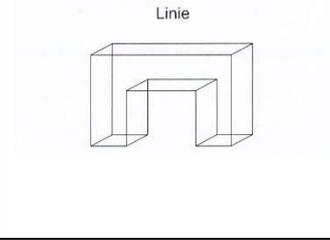
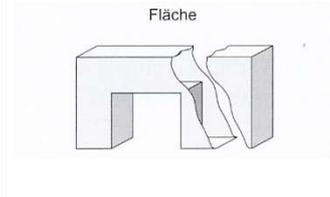
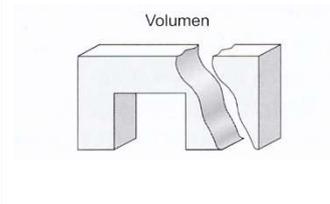
Dimension der Elemente	Element	Modelltyp	Beschreibung
0D	 <p>Punkt</p>	Eckenmodell	Modell wird nur durch die Eckpunkte beschrieben. Keine Bedeutung für die GF. (Bedeutung Zwischenmodell)
1D	 <p>Linie</p>	Kantenmodell	Modell wird durch Kanten beschrieben. Geringe Datenmenge. Keine Flächen-Lage Informationen und Volumeninformationen. Keine Bedeutung für die GF (Bedeutung Zwischenmodell)
2D	 <p>Fläche</p>	Flächenmodell	Beschreibung durch äußere und innere Begrenzungsflächen. Geeignet für die GF. Orientierung des Bauteilvolumens muss bekannt sein.
3D	 <p>Volumen</p>	Volumenmodell (Körpermodell)	Orientierung des Volumens und der es definierenden Flächen vorgegeben, müssen somit nicht definiert werden. Geeignet für die GF.

Tabelle 2: Auflistung und Beschreibung der CAD-Elemente und Modelltypen inkl. Kurzbeschreibung der Eigenschaften und Eignung für die Generative Fertigung [GF] (nach GEBHARDT 2013: 30 Bild 2.)

Bei Volumenmodellen unterscheidet man noch zwischen:

**Grundkörpermodellen**, die aus Verknüpfungen von geometrischen Primitiven (Quadern, Kugeln, usw.) bestehen.

**Flächenbegrenzungsmodellen**, die nur aus Einzelflächen und der Lage des Volumens bestehen. Darstellung von sehr komplexen Modellen möglich.

**Hybridmodellen**, die die Vorteile von Grundkörper- und Flächenbegrenzungsmodellen vereinigen und für die generative Fertigung sehr gut geeignet sind.

### 5.4.2. Datenformate

Wie schon zuvor angesprochen, kommen bei der generativen Fertigung spezielle Dateiformate zur Anwendung, in welche die ursprünglichen 3D-Volumenmodelle konvertiert werden müssen, um weiterverarbeitet werden zu können. Als Standard hat sich hierbei das Format .STL durchgesetzt (vgl. AWISZUS et.al. 2016: 324; FRITZ et al. 2015: 114 und GEBHARDT 2013: 34)

#### STL-Format (Standard Transformation Language/ Stereolithografie Language)

„Bei diesem Format wird die gesamte Körperoberfläche des geometrischen Modells durch Dreiecke beschrieben. Diese Beschreibung hat den Vorteil, dass durch die Dreiecke jeder Punkt der Randkontur mathematisch eindeutig berechenbar ist, wenn durch den Körper beim Slicen ein Schnitt gelegt wird. Nachteilig wirkt sich aus, dass damit nur Annäherung an die mathematisch exakte Kontur erreicht wird. Ein Maß für diese (Un-)Genauigkeit ist die gewählte Anzahl der Dreiecke, mit der die Randkontur dargestellt wird.“ (AWISZUS et al: 2016: 324)

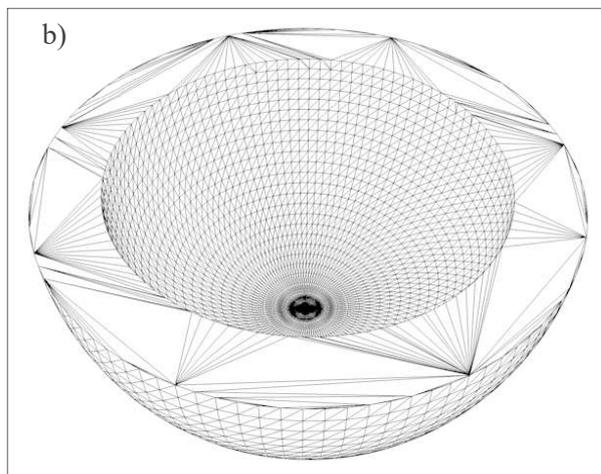
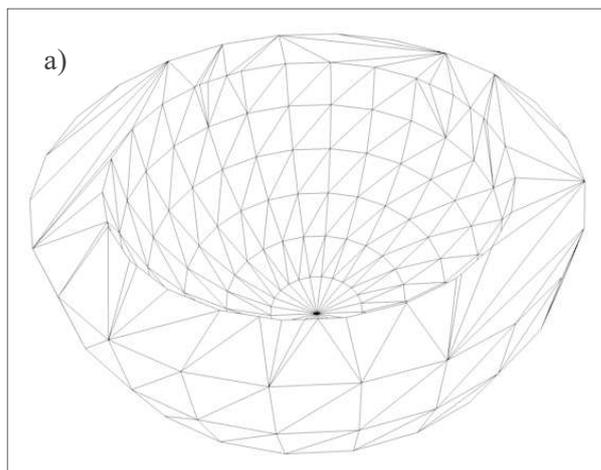


Abb. 35: Unterschiedliche Auflösung desselben Körpers im STL Format. EIGENE DARSTELLUNG

Am Beispiel in Abbildung 35 wird dieses Phänomen verdeutlicht. Der selbe geometrische Körper wurde in unterschiedlichen Qualitätsstufen als .STL Datei exportiert.

Die Abbildung a) benötigt zur Darstellung des Körpers 600 Dreiecke (Faces), wohingegen der darunter abgebildete Körper b) aus 10028 Dreiecken (Faces) konstruiert wurde. Je höher die Anzahl der Dreiecke, desto exakter die Annäherung an die mathematisch korrekte Form. Mit der Anzahl der Dreiecke steigt jedoch auch die Dateigröße. Während die .STL Datei für Körper a) 30KB besitzt, benötigt der Körper b) 501KB Speicherplatz. Je komplexer und genauer die Körper ausgegeben werden, desto höher ist also der Speicherplatzbedarf, aber auch die erzielte Druckqualität in der X-Y-Ebene (Konturebene). Abb. 35 wäre somit ein Beispiel für den Begriff der Prozessgenauigkeit in Kapitel 5.3 genannt wurde.

Flächennormale Dreiecksfacette 1	facet normal 0.187368 0.011788 -0.982219
Beginn der Eckpunktdaten	outer loop
Dreiecksfacette 1, Endpunkt 1	vertex 0.664840 0.416330 -0.257754
Dreiecksfacette 1, Endpunkt 2	vertex 1.878796 0.728021 -0.022439
Dreiecksfacette 1, Endpunkt 3	vertex 1.898406 0.416330 -0.022439
Ende der Eckpunktdaten	endloop
Ender der Facettenbeschreibung Facette 1	endfacet

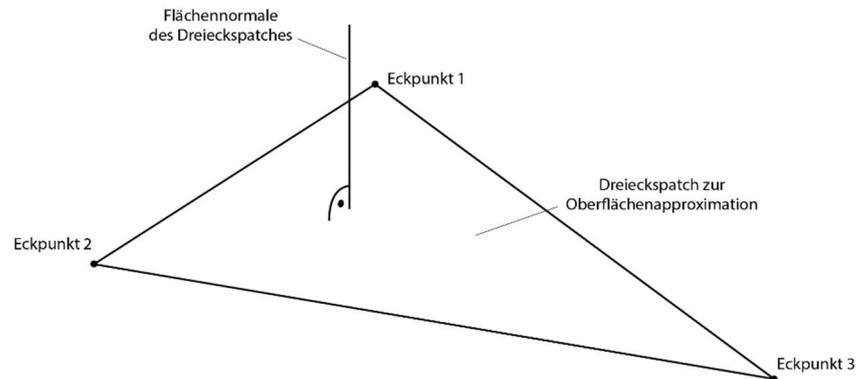


Abb. 36: Definition eines Dreieckspatches im STL-Format und zugehöriger ASCII Datensatz oben (nach Hoffmann 95 und BRITE/EuRAM94 in GEBHARDT 2013: 36)

„Der STL Datensatz enthält den Normalvektor (positive Richtung nach außen, vom Volumen weg) und die Koordinaten der drei Eckpunkte eines jeden Dreiecks (...). Abbildung 35 zeigt ein solches Dreieckspatch und den zugehörigen ASCII Datensatz, der pro Dreieck von den Befehlen *FACET* und *ENDFACET* eingeschlossen wird“ (GEBHARDT 2013: 35).

Ähnlich wie bei fast allen Dateiformaten kommt es auch beim STL-Format zur Ausbildung von Vorteilen und Nachteilen.

Vorteile sind:

- Einfache mathematische Beschreibung ermöglicht problemloses Slicen
- Einfache Beschreibung der Daten (ASCII<sup>11</sup>),
- dadurch leichte Reparatur von Fehlern an der Datei

Nachteile sind:

- Große Datenmengen bei Verfeinerungen des Netzes (siehe Abb. 35)  
(durch Redundanz der Eckpunkte: Jeder Eckpunkt eines Dreiecks ist auch ein Eckpunkt eines anderen Dreiecks)
- Enthalten nur Geometrieinformationen und keine weiteren Bauteileigenschaften  
(vgl. GEBHARDT 2013: 35ff.)

<sup>11</sup> Abk. für *engl.* American Standard Code for Information Interchange: Ein Standard-Zeichensatz, der alphanumerische Zeichen repräsentiert, die durch ein einziges Byte (8Bit) dargestellt werden. (BILL et.al. 2001:14)

Neben dem üblicherweise verwendeten STL-Format kommen in der generativen Fertigung auch andere Dateiformate zur Anwendung. Die größten Unterschiede zum STL-Format liegen im Bereich der Zusatzinformationen, die in der Dateistruktur gespeichert werden können. Das STL-Format ist jedoch noch immer jenes Format, das den Standard in der generativen Fertigung markiert.

### **CLI-/SLI-Format (Common Layer Interface / Slice-File)**

Wird auch als konturorientierte Schnittstelle bezeichnet. Die Schichterzeugung wird direkt im CAD-Programm vorgenommen und somit die Kontur des geometrischen Objektes vollständig beschrieben, da diese nicht in Dreiecksfacetten wie beim STL-Format geteilt werden muss. Nachteil des Formates liegt darin, dass die Datensätze außer im Original CAD-Programm nicht mehr nachbearbeitet werden können (vgl. GEBHARDT 2013: 40f.).

*„Das Slicen würde direkt im CAD-Prozess vorgenommen und eine exakte Berandung eines beliebigen Schnittes liefern. Dieser Vorteil würde allerdings die durchaus gewünschte Trennung der CAD-Konstruktion vom Rapid Prototyping Prozess aufheben.“* (AWISZUS et al. 324)

### **PLY- und VRML-Format (Polygon File Format/ Virtual Reality Modeling Language)**

Diese Schnittstellen eignen sich besonders für die Herstellung von farbigen Bauteilen und Bauteilen mit unterschiedlichen Materialien. *„Die STL-Datenstruktur bietet zwar durchaus Platz für zusätzliche Informationen, diese würden aber in jedem Fall immer das ganze Dreieck betreffen“* (GEBHARDT 2013: 43).

### **AMF-Format (Additive Manufacturing File Format)**

Ähnlich wie beim PLY/VRML Format kann das AMF-Format neben der Geometrie auch noch andere Informationen beinhalten. Das XML<sup>12</sup>-basierte Format hat auch einen sehr großen Vorteil gegenüber dem STL-Format: Es kann gebogene Dreieckskanten darstellen. So kann eine Reduktion der Datenmenge bei erhöhter Geometrieauflösung erzielt werden (vgl. GEBHARDT 2013: 46).

*„AMF ist frei verfügbar und trägt dazu bei, die Anzahl von proprietären Lösungen nicht weiter ansteigen zu lassen und einen der größten Vorteile der STL-Formatierung zu bewahren, den maschinenunabhängigen Einsatz.“* (GEBHARDT 2013: 46).

Somit die gegenteilige Entwicklung im Vergleich zum CLI-/SLI-Format, die auch schon AWISZUS kritisiert. Das AMF-Format kann als eine Weiterentwicklung des STL-Formates gesehen werden.

---

<sup>12</sup> Extensible Markup Language

## 5.5. Fertigungsverfahren

Nach der Diskussion der Grundlagen werden im folgenden Abschnitt die bedeutendsten generativen Fertigungsverfahren bzw. Verfahrensfamilien kurz vorgestellt. Wie in Abbildung 30 beschränkt sich die Auswahl der Verfahren auf die derzeit bedeutsamsten Verfahrensfamilien (vgl. GEBHARDT 2013: 101). Die Unterschiede in der Schichtgenerierung von 3-dimensionalen Bauteilen der einzelnen Verfahren und die verfahrensspezifischen Eigenschaften stehen dabei im Fokus.

### 5.5.1. Polymerisieren (SL)

*„Die Lokale Polymerisation als Prinzip der selektiven Verfestigung flüssiger oder pastöser monomerer Ausgangsstoffe trat in den ersten 10 Jahren nach Vorstellung der generativen Verfahren ausschließlich als Laser-Stereolithographie auf“* (GEBHARDT 2013: 105). Alle weiteren Verfahren, die unter dem Überbegriff der Polymerisation zusammengefasst sind, basieren auf demselben Prinzip und sind nur in verfahrensspezifischen Details unterschiedlich.

Dass die Laser-Stereolithographie bzw. das Polymerisieren an erste Stelle der vorgestellten Verfahren stehen, hat einen einfachen Grund. Das Verfahren ist, wie GEBHARDT in seinem Buch beschreibt, der Urvater aller folgenden Verfahren im Bereich der generativen Fertigung. (vgl. GEBHARDT 2013: 105). Das Verfahren wurde 1986 vom Amerikaner Chuck Hull entwickelt und patentiert. Seither spielen generative Fertigungsverfahren in immer mehr Bereichen eine immer wichtigere Rolle.

#### 5.5.1.1. Verfahrensgrundlagen Polymerisation / Laser- Stereolithographie

*„Die industrielle Umsetzung des Prinzips der Verfestigung flüssiger oder pastöser Monomere durch Polymerisation wird als Stereolithographie bezeichnet. Sie umfasst die Laser-Scanner-Stereolithographie, die Lampen-Masken-Stereolithographie, die Polymerdruckverfahren und die Polymerisation von Pasten.“* (GEBHARDT 2013: 105). Unterscheidungsmerkmale zwischen den einzelnen Verfahrensarten dieser Gruppe liegen in unterschiedlichen Varianten der Formgebung in der X-, und Y-Achse sowie in den unterschiedlichen Prozessen, die für die Verfestigung der Monomere verantwortlich sind. Wie eingangs schon erwähnt, sind die meisten dieser Verfahren nur durch ihre eingetragenen Markennamen bekannt, wie z.B.: **SLA** – Stereolithographie, **MJM** – Multi-Jet-Modeling, **DLP** – Digital Light Processing oder **FTI** – Film Transfer Imaging.

#### **Prinzip der Schichtgenerierung:**

Die beiden wichtigsten Prozesse bei der Polymerisation / Laser-Stereolithographie (Abb. 37), die für die Verfestigung der Schicht verantwortlich sind, sind zum einen die Verfahren nach dem Laser-Scanner-Prinzip, in denen ein Laserstrahl für die Verfestigung verantwortlich ist, oder Verfahren nach dem Lampen-Masken-Prinzip, bei denen UV-Lampen die aufgetragenen Schichten erhärten.

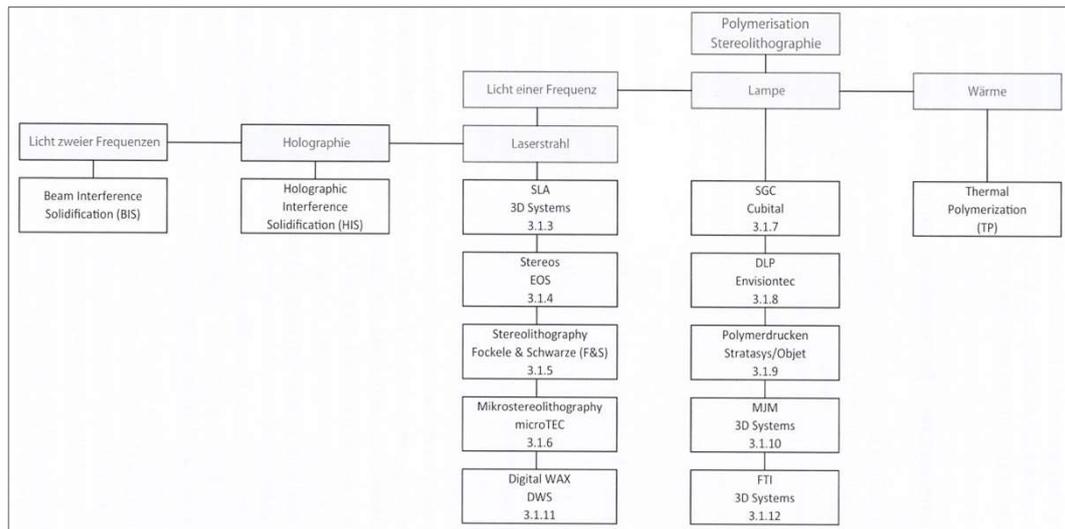


Abb. 37: Feingliederung der Polymerisations- und Stereolithographieverfahren. Übersicht und Fortführung von Abb. 30. – Quelle: GEBHARDT 2013:117.

### Laser-Scanner-Stereolithographie

„Die Laser-Stereolithographie beruht auf der punkweisen Verfestigung von photosensitiven Monomeren mithilfe eines Laser-Scanner-Belichters. Die Stereolithographiemaschinen nach der Laser-Scanner Methode bestehen aus einem Behälter mit flüssigem Monomer, der Bauraum und meist auch der Vorratsbehälter (für das Polymer) ist, einer in Z-Richtung in diesem Behälter verschiebbaren Bauplattform und einer Laser-Scanner-Einheit, die die aktuellen Schichtinformationen auf die Oberfläche des Harzbades schreibt.“ (GEBHARDT 2013: 106). Der Strahl des Lasers wirkt nicht direkt auf die Oberfläche der Flüssigkeit ein, sondern wird durch eine „Optik gebündelt und über die Scannerspiegel (welche in X-, und Y-Richtung bewegbar sind) auf die Arbeitsfläche des Behälters (...) gelenkt“ (FRTIZ 2015: 116). Die erste Schicht wird auf einer maschinenspezifischen Bauplattform ausgehärtet und das zu generierende Modell anschließend auf diese erste Grundschicht aufgetragen. Diese erste Schicht soll das spätere Ablösen des Objektes von der Plattform erleichtern. Wurde eine Schicht vom Laser ausgehärtet, wird die Bauplattform im Vorratsbehälter in der Z-Achse um eine vorher definierte Schichtdicke abgesenkt. Nach dem Absenkprozess wird durch eine mechanische Vorrichtung die neue Schicht gleichmäßig über die alte Schicht verteilt. „Das Absenken geschieht unter den Flüssigkeitsspiegel, für ein vollständiges Benetzen sorgt ein Wischer“ (AWISZUS et al. 2016: 328). Damit wird sichergestellt, dass über die gesamte Baufläche hinweg das Monomer in derselben Schichtdicke aufgetragen wird (vgl. GEBHARDT 2013: 106). Nach diesem Prozess kann die nächste Schicht ausgehärtet werden. Prinzipiell wird bei diesem Verfahren zu Beginn einer neuen Schicht die Kontur des Objektes, sprich die Berandung jeder einzelnen Schicht, zuerst ausgehärtet. Anschließend folgt der innere Bereich. Dabei werden die Parameter Laserleistung, Strahlparameter, Scangeschwindigkeit und die Eigenschaften von Monomeren verändert bzw. aufeinander abgestimmt, um den Druckvorgang zu optimieren (vgl. GEBHARDT 2013: 107 u. 123).

„Um die nötige Bauteilsteifigkeit zu erzielen, durchdringen sich sowohl die Voxel<sup>13</sup> in einer Schicht als auch die von zwei benachbarten Schichten, sodass die tatsächliche Eindringtiefe des Lasers größer ist als die Schichtdicke und die Generierung einer Schicht und die Verzahnung mit der darunterliegenden vorangegangenen Schicht simultan erfolgt“ (Abb. 38) (GEBHARDT 2013: 107).

### Lampen-Masken-Stereolithographie

Die Verfahrensart ist auch unter dem Namen **DLP** - Digital Light Processing bekannt. Der Name ist zurückzuführen auf die verwendeten Projektoren, die für die Belichtung und somit die Aushärtung der Schicht verantwortlich sind. Da nicht alle Verfahren dieser Gruppe mittels DLP Projektoren die aktuell

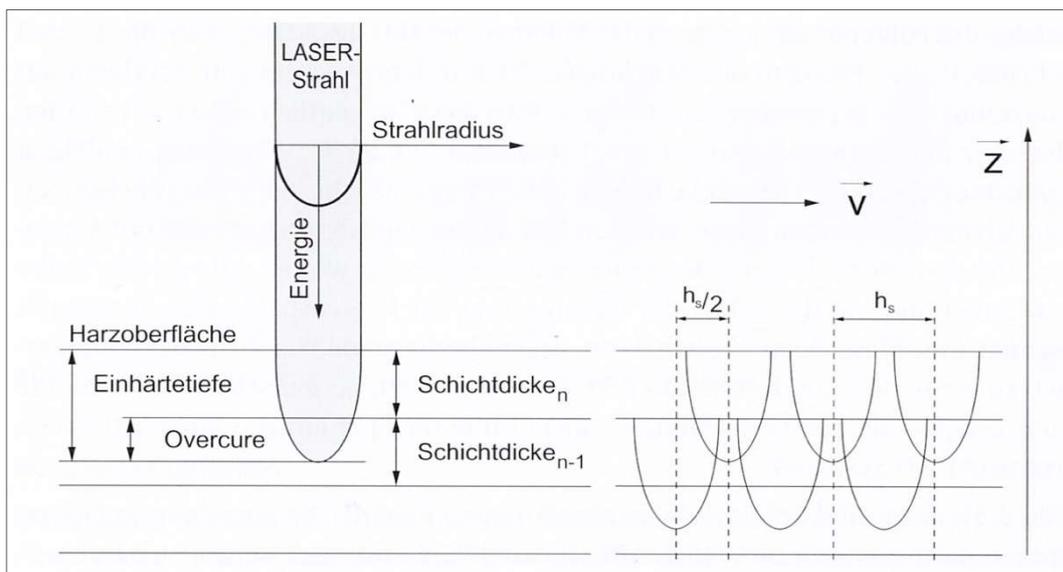


Abb. 38: Einwirkung des Laserstrahls auf die Harzoberfläche: (li) Verhältnisse am Einzelstrahl (re) Voxelstruktur. - Quelle: GEBHARDT 2013: 107.

aufgetragene Schicht aushärten, sollte mit dem Begriff sorgsam umgegangen werden. Auch in der Literatur kommt es sehr oft zu ungenauen Aussagen. AWISZUS beschränkt sich in seiner Definition von Lampen-Masken-Verfahren nur auf einen Teil der Verfahren. „Im Gegensatz zu Laser-Scanner-Verfahren erfolgt die Belichtung einer Schicht in der Gesamtheit (Rand und Füllung) mit UV-Licht durch eine Maske hindurch.“ (AWISZUS 2016: 328). Aber auch GEBHARDT ist in seinen Ausführungen nicht konsistent, da er schreibt: „Der wichtigste Unterschied [zur Stereolithographie] besteht in der Belichtung, die mittels eines Digital Light Processing Projektors, also mittels Lampe erfolgt. Mit dem Projektor wird immer ein ganzer Querschnitt auf einmal belichtet.“ (GEBHARDT 2013: 115). In Abbildung 37 zählt GEBHARDT das Polymerdrucken jedoch zu den Lampen-Masken-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird jedoch das Monomer, welches durch Düsenelemente aufgetragen wird, sofort durch UV-Lampen ausgehärtet, die seitlich an den Düsen positioniert sind (vgl. GEBHARDT 2013: 143). Der Name Lampen-Masken-Stereolithographie sollte daher bei diesem

<sup>13</sup> VOXEL: Ein Voxel ist gleichzusetzen mit einem Pixel (Bildpunkt). Ein Voxel hat im Unterschied zu einem Pixel neben der X u. Y Ausdehnung auch noch eine Ausdehnung in der Z-Achse.

Verfahren vorgezogen werden, da es sonst zu Verwirrungen kommen kann. Der kleinste gemeinsame Nenner aller Verfahren in dieser Gruppe ist der Umstand, dass das Monomer mittels einer UV-Lampe ausgehärtet wird. Masken kommen bei den Verfahren Solid-Ground-Curing **SGC**, Digital-Light-Processing **DLP** und dem Film-Transfer-Imaging **FTI** zum Einsatz (vgl. Abb. 37). Dabei wird aus den generierten Schichten pro Schicht eine Maske angefertigt. Jene Bereiche, die verfestigt werden sollen (Bauteilquerschnitt), sind lichtdurchlässig, die anderen Bereiche nicht. Bei den anderen Verfahren, die zu dieser Gruppe gezählt werden, wie Polymerdrucken und Multi-Jet-Modelling **MJM**, kommen keine Masken zum Einsatz. Bei diesen Verfahren wird das Polymer mittels Düsen Schicht für Schicht aufgetragen und entweder gleich ausgehärtet (Polymerdrucken) oder das gesamte Bauteil nach erfolgtem Schichtauftrag unter einer UV-Lampe ausgehärtet (**MJM**).

Vom Grundprinzip unterscheiden sich die unterschiedlichen Verfahren in dieser Gruppe wenig, doch kommen bei einigen Verfahren Techniken zum Einsatz, die das Lampen-Masken Verfahren sehr divers machen.

- **„Über Kopf“-Bauarten**

*„Die Bauplattform taucht von oben so tief in ein nach unten mit einem Glasboden abgeschlossenes Harzbad ein, dass zwischen Bauplattform und Glasboden genau eine Schichtdicke Baumaterial eingeschlossen wird. Ein DLP-Projektor projiziert den aktuellen Bauteilquerschnitt von unten durch die Glasplatte auf diese Schicht und verfestigt sie so. Die Bauplattform und die [sic]Schicht Modell werden um eine Schichtdicke aus dem Harzbad gefahren, neues Harz strömt nach und die nächste Schicht wird belichtet.“ (GEBHARDT 2013: 115)*

Verfahren: FTI / DLP / Digital WAX

- **Film Transfer Imaging FTI**

*„Im Unterschied zu den aus dem Harzbad arbeitenden Maschinen wird beim FTI das Baumaterial als Monumerschicht [sic] auf einem transparenten Film vorkonfektioniert und in Kartuschen angeliefert. Zur Beschichtung wird die glasklare Trägerfolie mit der darauf aufgetragenen photosensitiven Schicht zwischen die kopfüber montierte Bauplattform und einer Glasplatte positioniert und von unten belichtet.“ (GEBHARDT 2013 115f.)*

- **Kombinierte Verfahren**

Hybride Verfahren wie Digital Wax oder die Mikrostereolithographie verbinden Elemente der Laser-Scanner-Stereolithographie und der Lampen-Masken-Verfahren. Sie sind somit nicht klar der einen oder anderen Verfahrensart zu untergliedern.

### 5.5.2. Sinter- und Schmelzverfahren ((L)S)

„Bei Sinter- und Schmelzverfahren bilden in einem Pulverbett angeordnete Pulver oder Granulate die Ausgangsstoffe für die Herstellung einer definierten konturierten festen Schicht. Sie werden in der jeweiligen Schichtebene durch eine Energiequelle an- oder aufgeschmolzen und erstarren nach der Abkühlung zu einem festen Körper. Energiequellen können energiereiche Einzelstrahlen wie Laserstrahlen oder Elektronenstrahlen oder auch Infrarot Flächenstrahler sein.“ (GEBHARDT 2013: 59).

Sintern ist ein Prozess der nicht nur in Verbindung mit generativen Fertigungsverfahren steht, sondern im Bereich der Fertigungsverfahren ein Folgeverfahren bei der Herstellung von Körpern aus festen, körnigen oder pulverigen Ausgangsmaterialien sein kann. Im Gegensatz zu den Sintervorgängen im Bereich der generativen Fertigung sind Sintervorgänge Prozesse, bei denen zuvor verdichtete Teilchen (Metalle, Kunststoffe, ...) in einem Nachbearbeitungsschritt durch hohen Druck und hohe Temperaturen über längere Zeiträume hinweg ineinander diffundieren, sich also homogen über den zur Verfügung stehenden Raum verbinden (vgl. FRITZ et al. 2015: 7 u.116).

Sinterverfahren in der generativen Fertigung werden ähnlich zu anderen Verfahren wie der Polymerisation in Untergruppen unterteilt. Je nach verwendeter Technologie, die für die Erzeugung der Verfestigung des Ausgangsmaterials zum Einsatz kommt, wird zwischen *Selektivem Lasersintern* (Verfestigung erfolgt gezielt und Punktgenau), *Elektronenstrahlsintern* (Einsatz eines Elektronenstrahls anstelle eines Lasers) und Maschinen, die Infrarotstrahler zur Schichtgenerierung verwenden, unterschieden. (siehe Abb. 39)

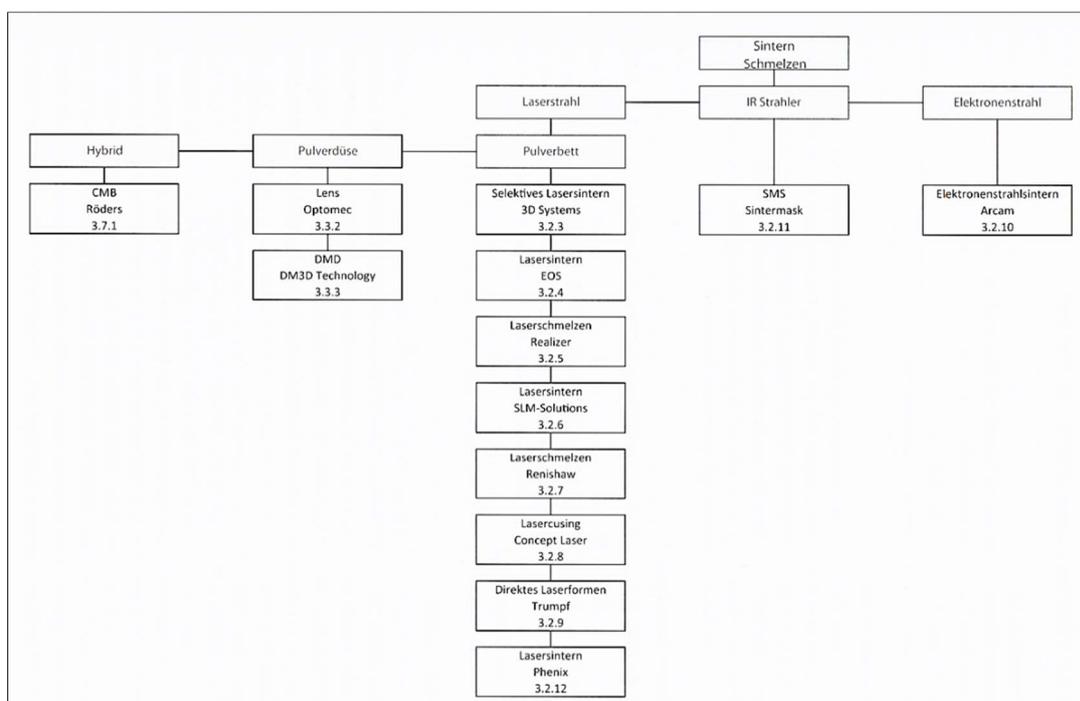


Abb. 39: Sinter- und Schmelzverfahren; Übersicht in Fortführung von Bild 30 Quelle: GEBHARDT 2013: 163

### **5.5.2.1. Verfahrensgrundlagen Sintern**

*„Das als Generatives Fertigungsverfahren eingesetzte Sintern verzichtet auf die beiden wesentlichen Komponenten des klassischen Sinterprozesses: hoher Druck und lange Reaktionszeit. Daher muss davon ausgegangen werden, dass der generative Sintervorgang nicht oder nicht dominant diffusionsgesteuert abläuft. Es erfolgt lediglich eine kurzzeitige thermische Aktivierung der lose nebeneinander im Pulverbett liegenden Partikel. Wenn diese selektiv an der Oberfläche angeschmolzen werden, resultiert nach Abkühlung ein mehr oder weniger poröses Bauteil, wenn die Partikel vollständig aufgeschmolzen werden, entsteht ein dichtes Bauteil.“ (GEBHARDT 2013: 59f.)*

#### **Prinzip der Schichtgenerierung**

*„Beim Sintern werden zu einem Pulverbett dicht nebeneinander gepackte und je nach Prozess leicht vorverdichtete Körnchen [...] mithilfe einer Laser-Scanner-Einheit, eines direkt abgelenkten Elektronenstrahls oder einer Infrarot-Heizung mit einer die Geometrie abbildenden Maske örtlich leicht an- oder aufgeschmolzen. Sie erstarren durch Abkühlung infolge von Wärmeleitung und verbinden sich so zu einer festen Schicht. Die nicht angeschmolzenen Pulverkörnchen verbleiben als Stützmaterial im Bauteil und werden nach Beendigung des Bauprozesses entfernt. Durch Absenken der Schicht und erneutes Beschichten mit Pulver wird die Analogie zur ersten die zweite Schicht verfestigt und mit der ersten verbunden.“ (GEBHARDT 2013: 157)*

### 5.5.3. Schicht-Laminat-Verfahren (LLM)

Die Abbildung unten (Abb. 40) zeigt die detaillierte Untergliederung der Schicht-Laminat-Verfahren in Fortführung zu Abb. 30. Die Verfahrensfamilie kann in drei Untergruppen gegliedert werden. Basis dafür ist die Technik zur Konturierung der Schicht in der X- und Y-Achse, die zur Anwendung kommt.

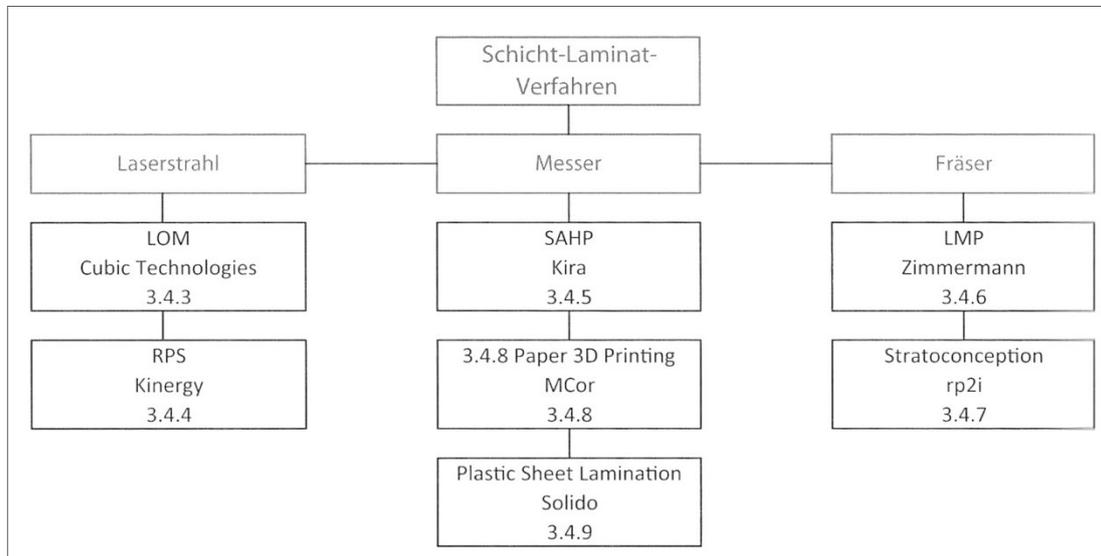


Abb. 40: Schicht-Laminat-Verfahren; Übersicht in Fortführung von Bild 30 Quelle: GEBHARDT 2013: 228

#### 5.5.3.1. Verfahrensgrundlagen Schicht-Laminat-Verfahren

„Schicht-Laminat-Verfahren oder „Layer Laminate Manufacturing (LLM) bezeichnet eine Verfahrensfamilie, die der die Schichten einzeln aus vorgefertigten Folien oder Platten mittels Laser, Messer oder Fräser konturiert und, simultan oder anschließend, durch Fügen (meist in Form des Klebers) verbunden werden.“ (GEBHARDT 2013: 228). Somit eine Kombination zwischen den eingangs erwähnten (Kap. 5) generativen, also aufbauenden-, und subtraktiven, also abtragenden Fertigungsverfahren. In der Literatur wird dieses Verfahren auch gerne mit dem Akronym LOM, kurz für Laminated Object Manufacturing, in Verbindung gebracht. Dabei handelt es sich (wie schon öfters erwähnt) nicht um die generische Bezeichnung, sondern eine Produktbezeichnung und eingetragenes Warenzeichen (vgl. GEBHARDT 2013: 228).

#### Prinzip der Schichtgenerierung

Das Verfahren ist in seiner Art nicht an die Verwendung einiger weniger oder speziell für das Verfahren adaptierter Materialien beschränkt. Voraussetzung ist, dass die Materialien in Form von Folien zur Verfügung stehen. Verwendet werden können Papiere, Kunststoffe, Metalle und Keramiken. Die Generierung der Schicht in der Z-Achse erfolgt durch Aneinanderfügen und Verbinden der als Folien zur Verfügung stehenden Materialien. Dieser Vorgang repräsentiert den generativen Teil. Das Verbinden der Schicht erfolgt je nach Material auf unterschiedliche Weise, entweder durch Verkleben der Schichten oder bei metallischen Ausgangsstoffen durch Schweißen.

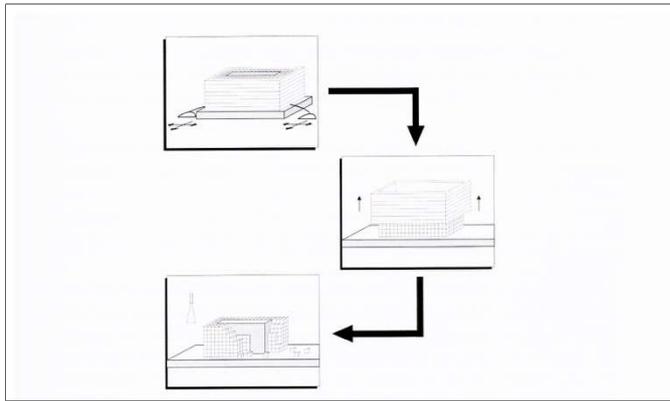


Abb. 41: Post-Processing beim LL. Quelle GEBHARDT 2013: 231

In der X- und Y-Achse kommen zur Konturierung der einzelnen Schichten und auf Basis der Materialien Laser, Messer oder Fräswerkzeuge zum Einsatz, die den Bauteilquerschnitt der jeweiligen Schicht konturieren (vgl. GEBHARDT 2013: 228). „Da aufgrund des Bauprinzips die einzelnen Schichten nur konturiert (ausgeschnitten), aber nicht ausgefüllt werden müssen, ist das LLM-Verfahren gegenüber Raster-

Scanner-Verfahren umso mehr im Vorteil, je größer die Fläche einer Schicht im Verhältnis zu ihrem Umfang ist.“ (GEBHARDT 2013: 229).

„Das additive Prinzip wird häufig auch auf manuell kombinierte Teilprozesse, z. B. aus Laserschneiden und Fügen angewendet. Es ist dann unabhängig von einer Maschine. Da es sich hierbei nicht um die direkte automatisierte Umsetzung eines 3D Datensatzes in ein physisches Bauteil handelt, ist es streng genommen auch kein Generatives Fertigungsverfahren.“ (GEBHARDT 2013: 68f.).

Ähnlich wie bei 3DP oder Sinterverfahren verbleibt das Bauteil während und auch nach dem fertigen Druck in einem das Bauteil umschließenden Kubus. Der äußere Teil des Kubus besteht aus einem Rahmen, der die nicht zum Bauteil gehörenden gehatcheten Bereiche zusammenhält. Wird der Rahmen abgezogen, kann das eigentliche Bauteil freigelegt werden. (Abb. 41)

### Stützkonstruktion und Post-Processing

„Stützen werden nicht benötigt, weil das durch die Konturierung abgetrennte, nicht zum Bauteil gehörende Material meist im Modell verbleibt und das Bauteil stützt. Sie werden in diesem Fall zur späteren und besseren Entnahme in kleine Quadrate geschnitten (gehatched), sodass sich daraus im Bauteil verbleibende Kuben ergeben, die nach dessen Entnahme aus der Maschine entfernt werden müssen.“ (GEBHARDT 2013: 229). Daraus ergibt sich auch einer der größten Nachteile des Verfahrens: Das innen liegende Material von z. B. Hohlräumen, Ausschnitten und Bohrungen muss nach der Konturierung sofort entfernt werden (nicht bei allen Verfahren möglich) oder muss im Körper verbleiben. Je nach Bauteilgeometrie kann dieses anschließend aus dem Körper manuell entfernt werden oder verbleibt im Körper (vgl. GEBHARDT 2013: 70).

„Nach dem Bauprozess werden bei den Papier- und Kunststoffverfahren der gesamte Block mit dem darin liegenden Modell aus der Maschine entnommen. Der Rahmen und die nicht zum Modell gehörigen Teile werden entfernt. Zum Finishing gehört vor allem bei Papiermodellen die sofortige Fixierung des Modells mit Lacken, damit sich die stark hygroskopischen Bauteile an freistehenden Ecken und Kanten nicht blätterteigartig auffächern. Die Oberfläche können beispielsweise wie bei Holz vor allem durch Schleifen nachbearbeitet werden“ (GEBHARDT 2013: 231).

#### 5.5.4. Extrusionsverfahren (FLM)

„Die extrudierenden Verfahren sind unter der Bezeichnung *Fused Deposition Modeling (FDM)* bekannt geworden. Dies ist aber die geschützte Bezeichnung des Herstellers *Stratasys*. Der generische Name lautet *Extrusionsverfahren* oder Englisch *Fused Layer Modeling FLM*“ (GEBHARDT 2013: 70).

Grundsätzlich gibt es bei Extrusionsverfahren zwei Unterscheidungsmerkmale, nach denen die Verfahren in Untergruppen gegliedert werden können (siehe Abb. 42): Verfahren, bei denen die Materialzufuhr und der Materialauftrag durch eine einzelne Düse vorgenommen wird (Einzeldüsen)<sup>14</sup> und Verfahren, die für diese Aufgabe mehrere Düsen verwenden. (Mehrfachdüsen). Dieser Kategorisierung übergeordnet kann man Extrusionsverfahren auch, wie bereits erwähnt, nach der Art ihres Materialauftrages untergliedern. Hier spricht man dann von *extrudierenden Verfahren*, wenn der Materialauftrag (Aufschmelzen – Auftragen – Abkühlen) kontinuierlich erfolgt, oder *ballistischen Verfahren*, wenn der Materialauftrag (Aufschmelzen – Auftragen – Abkühlen) diskontinuierlich, in Form von Tröpfchen, erfolgt (vgl. GEBHARDT 2013: 72f.).

„Verfahren, die nicht kontinuierlich extrudieren, sondern das aufgeschmolzene Material diskontinuierlich (*Drop on Demand*) auftragen oder auf das Bauteil schießen werden den Extrusionsverfahren zugerechnet, obwohl man sie ebenfalls als Druckverfahren ansehen könnte, was gelegentlich in der Literatur auch geschieht.“ (GEBHARDT 2013:248)

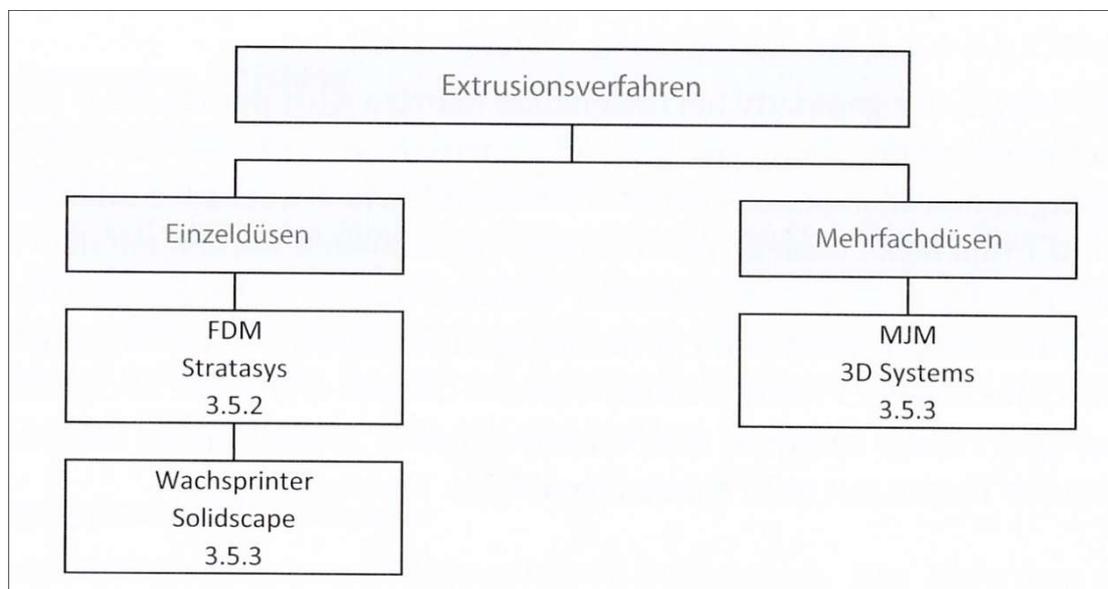


Abb. 42: Extrusionsverfahren FLM; Übersicht in Fortführung von Bild 30 Quelle: GEBHARDT 2013: 248

<sup>14</sup> Die Kategorisierung bezieht sich auf die Anzahl der Düsen, die das eigentliche Baumaterial zuführen. Anlagen, die unter Einzeldüsen kategorisiert sind, verfügen jedoch meist über mehrere Düsen für Baumaterial unterschiedlicher Farben oder Stützmaterial. Namensgebend ist der Umstand, dass immer nur eine Düse Material an das zu fertigende Bauteil zuführt (vgl. HAGL 2015: 26 und GEBHARDT 2013: 256).

#### **5.5.4.1. Verfahrensgrundlagen Extrusionsverfahren**

Ausgangsstoffe beim FLM sind, wie schon erwähnt, vorzüglich thermoplastische Kunststoffe, die als Drähte auf Rollen oder in abgeschlossenen Kassetten (Cartridges) in der Maschine vorgehalten werden. Neben diesen sehr gebräuchlichen Formen können die Ausgangsmaterialien auch in anderen Urformen zur Verfügung stehen (Tabletten, Granulat, usw....).

#### **Prinzip der Schichtgenerierung**

Durch einen Extruder wird das Filament (Bezeichnung für das Ausgangsmaterial) einer in der X- und Y-Achse beweglichen Düse zugeführt, die beheizbar ist und so das Ausgangsmaterial bis knapp unterhalb des Verflüssigungspunktes erhitzt. Das Material wird anschließend auf die Bauplattform oder die vorhergehende Schicht „aufgepresst“. Diese wird durch das verflüssigte Material teilweise aufgeschmolzen, was notwendig ist, um eine dauerhafte Verbindung zwischen den einzelnen Schichten zu gewährleisten. Durch den leicht ellipsenförmigen Querschnitt, den das Material durch das Aufpressen auf die vorhergehende Schicht erhält, wird das Wärmeleitverhalten beim Kontakt der beiden Schichten erhöht und dadurch ein effizienteres Abkühlen, also Aushärten des Bauteils gefördert, bevor die nächste Schicht aufgetragen wird (vgl. FASTERMANN 2014: 31 u. GEBHARDT 2013: 251,71)

*„Das Auftragen teigiger Volumen durch Extrusion beinhaltet grundsätzlich das Problem, dass der extrudierte Strang einen Anfang und ein Ende hat. Das Zusammentreffen beim Schließen der Kontur ist als Ansatz sichtbar und hinterlässt sogenannte Bindenähte. Diese fallen besonders auf, wenn sie bei jeder Schicht an der gleichen Stelle liegen.“ (GEBHARDT 2013: 71)*

Wie bei den meisten Verfahren, sind auch FLM-Anlagen so aufgebaut, dass sich nach dem erfolgreichen Auftrag einer Schicht die Bauplattform in der Z-Achse absenkt. Anders als bei ähnlichen Verfahren wird die Bauplattform dabei nicht um den Wert der Schichtdicke bewegt, sondern weniger. Dadurch wird erreicht, dass das Material mit einem leicht ovalen Querschnitt auf die vorhergehende Schicht gepresst wird.

### 5.5.5. Three-Dimensional Printing (3DP)

Grundlage dieser Verfahren ist die Erzeugung einer festen Schicht durch ein Verkleben eines Ausgangsmaterials, vorzüglich von feinen Granulaten mit einem Binder in flüssiger Form (vgl. GEBHARDT 2013: 73). Die Verfahrensgruppe wird deshalb im deutschen Sprachraum auch als *Pulver-Binder-Verfahren* angesprochen.

Wie bereits erwähnt, kann der Trend festgestellt werden, dass generative Verfahren kurzum unter dem Begriff 3D-Drucken od. 3D-Printing zusammengefasst werden. Dies steigert die Anwenderfreundlichkeit aus marketingtechnischer Sicht, jedoch wird es der Variabilität der unterschiedlichen Verfahren nicht gerecht, speziell in diesem Fall. Dabei kann die generische Bezeichnung des deutschen Sprachraumes, nämlich „Pulver-Binder-Verfahren“, einen ersten Anhaltspunkt liefern, welche technischen Grundlagen diesem Verfahren zu Grunde liegen.

Gleich wie bei den Extrusionsverfahren unterteilt GEBHARDT in seiner detaillierten Klassifikation 3DP-Verfahren in zwei Untergruppen auf. Jene 3DP-Verfahren, deren Beschichtungs- und Printermechanismen aus einer Düse (Einzeldüsen) bestehen, und jene, in denen mehrere Düsen (Mehrfachdüsen) im Bauraum angeordnet sind. Ansonsten haben die beiden Druckverfahren nichts weiter gemeinsam.

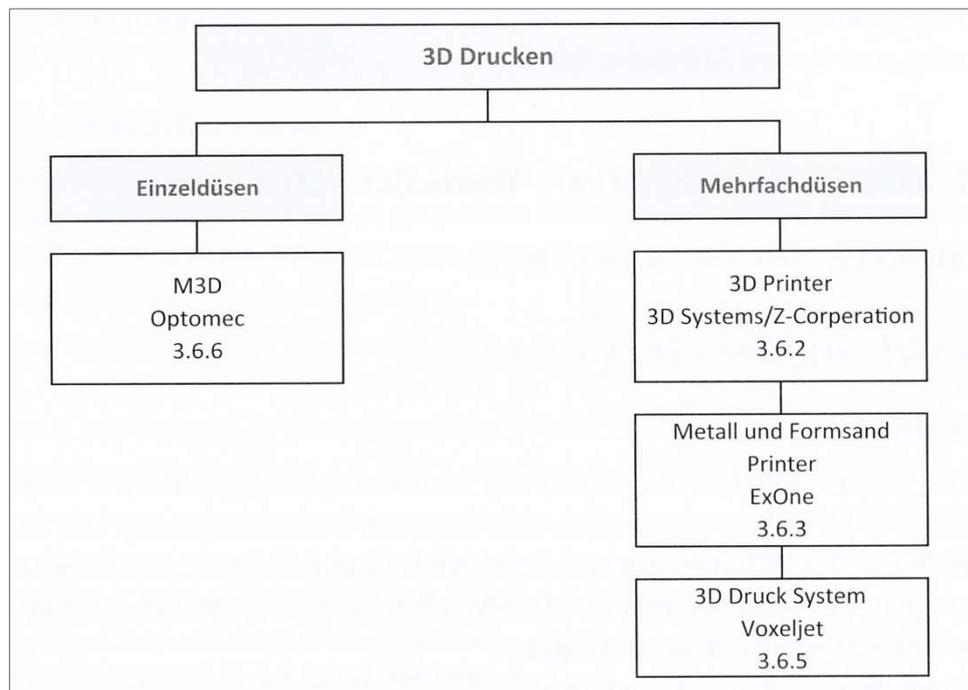


Abb. 43: 3D Printing-Verfahren; Übersicht in Fortführung von Bild 30 Quelle: GEBHARDT 2013: 264

### 5.5.5.1. Verfahrensgrundlagen Three-Dimensional Printing

#### Prinzip der Schichtgenerierung

*„Ausgangspunkt der Generierung ist eine aus Pulvern oder Granulaten bestehende Pulverschicht. Mit einem Druckkopf wird Binder direkt auf und in die Pulverschicht gedruckt (Drop on Powder), sodass die Pulverteilchen entsprechend der gewünschten Kontur miteinander verkleben. So entsteht Schicht für Schicht ein Pulverbett mit dem darin befindlichen Bauteil. Das lose Pulver stützt das Bauteil und wird nach Beendigung des Bauprozesses einfach abgeblasen.“ (GEBHARDT 2013: 74). „Das Verfahren ist Grundsätzlich mit dem Selective Lasersintering (SLS) (und auch den Polymerisationsverfahren) verwandt, unterscheidet sich jedoch bei der Werkstoffzuführung dadurch, dass hier nicht mit einem Laserstrahl gebrannt wird, sondern mittels eines Inkjet-Druckzylinders ein flüssiges Bindemittel in den Fertigungsprozess eingespeist wird.“ (HAGL 2015: 29).*

Möglichkeiten, in Farbe zu drucken, bieten auch andere Verfahren. Diese beschränken sich jedoch meist auf ein gefärbtes Ausgangsmaterial oder auf verschieden gefärbte Filamente, die in ein und demselben Bauteil verwendet werden können, ja sogar in einer Schicht abwechselnd verbaut werden. Da 3DP Verfahren und die verwendeten Druckköpfe grundsätzlich 2D-Tintenstrahldruckern ähneln, können statt einfarbige Bindemitteln hier auch Bindemittel oder Zusätze zur Anwendung kommen, die auf Basis des Vierfarbendruckes (Cyan, Magenta, Yellow, K-black) arbeiten und so einen stufenlosen Mehrfarbendruck ermöglichen (vgl. FASTERMANN 2014: 26f.).

## 6. Analyse der Druckverfahren

Welche Verfahren eignen sich für den 3D-Druck in den Geowissenschaften? Diese zentrale Frage soll in den folgenden Abschnitten aufbereitet werden. In Kapitel 4.3 wurden schon mögliche Anwendungsbereiche vorgestellt. Eine Einteilung nur auf Basis dieser Auswahl wäre aber zu wenig, um eine wissenschaftlich fundierte Aussage zu treffen. Dazu greifen wir auf GEBHART zurück. In seinem Buch stellt er unter anderem eine Einteilung von unterschiedlichen Modellklassen vor, Modellklassen die vom **VDID** (Verband Deutscher Industrie Designer) sowie vom **VDI** (Verband Deutscher Ingenieure) definiert wurden und sich wie folgt untergliedern lassen.

Modellklassen	
VDID	VDI 3404
Proportionsmodell	<i>Konzeptmodell</i> (Solid Images)
Ergonomiemodell	Designprototyp
Designmodell	<i>Geometrieprototyp</i> Datenkontrollmodelle
Funktionsmodell	<i>Funktionsprototyp</i>
Prototyp Muster	Technischer Prototyp
Endprodukt	Produkt

*Tabelle 3: Modelldefinitionen nach VDID und VDI.*

*Aus: GEBHARDT 2013: 323*

Die Modellfunktionen in Tabelle 4 sind gleich den Entwicklungsschritten in der Produktentwicklung (von oben nach unten). Sie spiegeln die einzelnen Phasen, die ein Produkt in seiner Entwicklung durchläuft, wieder (vgl. GEBHARDT 2013: 320). Produktentwicklung und Serienfertigung sind aber nicht vorrangig Ziel von geowissenschaftlichen Anwendungen im Sinne dieser Arbeit. Die Aufstellung ist jedoch deshalb von Interesse, weil GEBHARDT in einem weiteren Schritt die Modellklassen mit den Verfahrensfamilien in Verbindung bringt. Es lassen sich somit Aussagen treffen, welche Verfahren zur Generierung unterschiedlicher Modelltypen geeignet sind.

Ziel ist es, die in Kapitel 4 vorgestellten Modelle mit den Modelltypen aus Tabelle 4 in Verbindung zu bringen und so Aussagen über geeignete Fertigungsverfahren zu treffen. Dazu bedarf es einer genaueren Erläuterung der einzelnen Modelltypen. Da sich die Modelltypen aus der Einteilung des **VDID** und **VDI** direkt vergleichen lassen, hat GEBHARDT nur jene Klassen der Richtlinie **VDI** [3404] genauer erläutert. Die Ergebnisse beziehen sich auch immer auf das Pendant in der Aufstellung des **VDID** (vgl. GEBHARDT: 321).

Konzeptmodell	Beim Konzeptmodell handelt es sich um die frühestmögliche physische Realisierung eines Produktdesigns oder Produktkonzeptes (Solid Image). Material, Funktion und Maße entsprechen nicht den Produktanforderungen. Wichtigste Zielgröße ist die Anmutung. Es können skalierte, generativ gefertigte Bauteile (Proportionsmodelle) zum Einsatz kommen. Anwendung: Überprüfen des ästhetischen Eindrucks im Anwendungsumfeld.
Geometrieprototyp	Bei Geometrieprototypen handelt es sich um generativ gefertigte Bauteile, bei denen die Beurteilung von Maß, Form und Lage von Bedeutung ist. Die Materialeigenschaften sind dabei sekundär. Anwendung: Überprüfen der Geometrie (z. B. Einbauuntersuchungen).
Funktionsprototyp	Bei Funktionsprototypen handelt es sich um generativ gefertigte Bauteile, die bereits definierte Produktfunktionen des späteren Serienteils erfüllen. Eine Überprüfung einiger oder aller Funktionalitäten ist möglich. Form und Gestalt können vom späteren Produkt abweichen. Anwendung: Überprüfen von (Teil-) Funktionen.
Technischer Prototyp	Technische Prototypen unterscheiden sich in den geforderten Eigenschaften nicht wesentlich vom späteren Serienteil. Sie können jedoch auf einem anderen Wege als dem Serienverfahren gefertigt worden sein. Anwendung: Überprüfen des Bauteils in Versuch und Vorserie
Produkt (Serienteil)	Bestimmungsgemäß eingesetztes, marktfähiges Produkt. Anwendung: Kleinserie, Rapid Manufacturing, individuelle Produkte

Tabelle 4: Modelldefinitionen nach VDI 3404. Aus: GEBHARDT 2013: 323

Da die Funktion bei Modellen im Bereich der Geowissenschaften nicht im Vordergrund steht, bzw. nicht bei denen, die als Beispiele in Kapitel 4 vorgestellt wurden, konzentriert sich das Interesse auf die beiden Modellklassen der Konzeptmodelle und der Geometrieprototypen. In der erweiterten textlichen Erläuterung wird klar, warum.

**Konzeptmodelle** „Die Anwendung erfolgt vorzugsweise im Bereich der **Ästhetik** oder der **Anmutung**<sup>15</sup> im Sinne der **äußeren Erscheinung**, der **Optik** und der **Haptik**. Konzeptmodelle assoziieren die Vorstellung von einem **dreidimensionalen Bild (Solid Image)**. Sie dienen der **Kommunikation (Show and Tell-Modelle)**. Sie erlauben die Visualisierung von Proportionen und des grundsätzlichen **Erscheinungsbildes**. [...] Ziel ist die Herstellung von möglichst einfachen, mechanisch-technologisch wenig belastbaren, aber die äußere Form und Anmutung des späteren Bauteils gut widerspiegelndem Modelle“ (GEBHARDT 2013: 324)

Die Schlagwörter in der textlichen Erläuterung stehen im direkten Zusammenhang mit der Kernthematik, nämlich der des geowissenschaftlichen Modellbaus. Eigenschaften wie *Optik*, *Haptik* und *Kommunikation*. Vor allem der Begriff des „Solid Image“ ist in diesem Zusammenhang sehr

<sup>15</sup> Anmutung = Das Erscheinungsbild von etwas

interessant. Der Begriff verbindet in zwei Worten das, was in Kapitel 3 und 4 diskutiert wurde, das Bild od. „Image“ als Medium der Informationsdarstellung und Kommunikation – der Begriff „solid“ als Brücke und Verbindung zum Themenbereich des Modellbaus und der Haptik, der, wie bereits erwähnt, eine bedeutende Rolle zukommt (vgl. Abb. 3).

**Geometrieprototypen** werden in den Erläuterungen GEBHARDTs lediglich als ein nächster Schritt im Produktentwicklungszyklus gesehen. Inhaltlich liefert eine weitere textliche Erläuterung keine neuen Anhaltspunkte. GEBHARDTs Aussagen stellen die exakte Geometrie des Modells gegenüber dem Konzeptmodell in den Vordergrund. Für wissenschaftliche Anwendungen sollte grundsätzlich ein relativ hoher Grad an Genauigkeit und Validität angestrebt werden, weswegen auch dieser Modelltyp für geowissenschaftliche Anwendungen in Frage kommt.

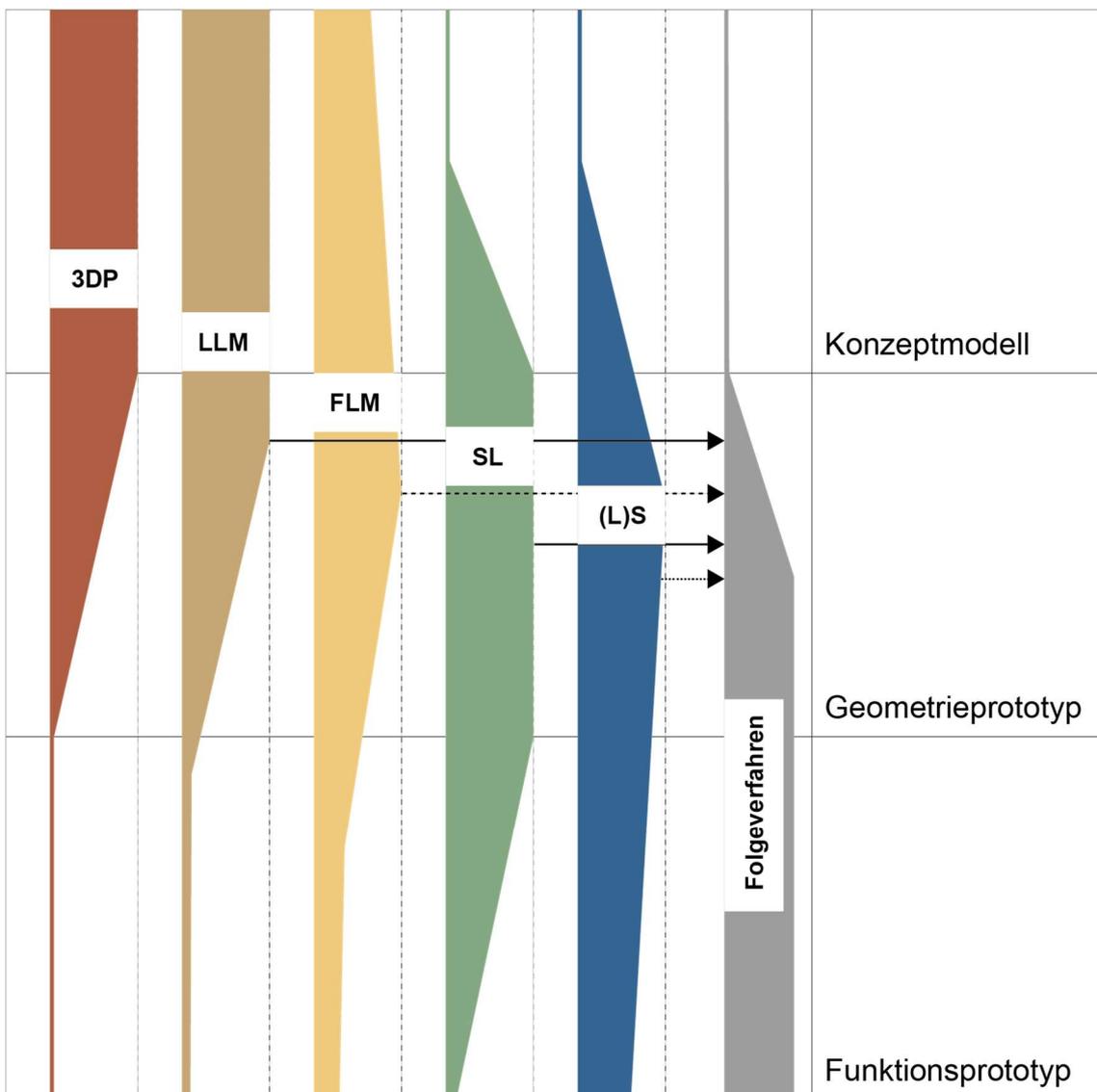


Abb. 44: Zuordnung der generativen Verfahrensfamilien zu den unterschiedlichen Modelltypen nach VDI 3404 (Gültig nur für Modelle aus Kunststoff od. Modellmaterialien) Quelle-Bild: Eigene Darstellung nach GEBHARDT 2013: 330

Bei Funktionsprototypen steht laut der Definition in Tabelle 5 die Funktionalität im Vordergrund. Alle vorgestellten Modelle in Kapitel 4 weisen bis auf die Funktion eines „Solid Image“ keinerlei Modellfunktionen auf.

Das Hauptaugenmerk liegt deshalb auf den beiden Modelltypen **Konzeptmodell** und **Geometrieprototyp** und den „dazugehörigen Verfahren“, wie sie aus Abb. 44 abgelesen werden können. Der Modelltyp „Produkt“ steht bei GEBHARDT im Zusammenhang mit einer Serienfertigung (vgl. Tab: 4) von generativ gefertigten Bauteilen, was im Zusammenhang mit diesem Thema von geringerer Bedeutung ist – vor allem deswegen, weil die beiden näher beschriebenen Modelltypen des Geometriemodells und des Konzeptmodells die Anforderungen in diesem Bereich schon erfüllen.

Bei der Analyse von Abb. 44 wird ersichtlich, dass sich drei Verfahren fast ausschließlich zu den beiden für geowissenschaftliche Fragestellungen interessanten Verfahren zuordnen lassen, Three-Dimensional Printing (**3DP**), Schicht-Laminat-Verfahren (**LLM**) und Extrusionsverfahren (**FLM**). Die beiden weiteren Verfahren Stereo-Lithographie (**SL**) und Sinter- und Schmelzverfahren (**(L)S**) bewegen sich auch in diesem Bereich, werden aber schon verstärkt in Verbindung mit Geometrieprototypen und Funktionsprototypen gebracht.

Alle Verfahren in Abb. 44 haben die Möglichkeit, monochrom oder polychrom zu drucken. Als monochrome werden in dieser Arbeit Verfahren bezeichnet, die einfarbige Bauteile erzeugen können, wie zum Beispiel das Untersuchungsobjekt in Abbildung 45. Die einzelnen Bauteile werden dabei mit farblich unterschiedlichen Ausgangsmaterialien gefertigt. Farbliche Unterschiede sind so nur zwischen einzelnen Bauteilen möglich und nicht innerhalb eines Bauteils. Als polychrome werden hingegen Verfahren bezeichnet, die innerhalb eines Bauteils unterschiedliche Farbgebung realisieren können (Bsp. Abb. 29). Wie schon herausgestrichen wurde, ist die variable „Farbe“ als Informationsträger und Form der Kommunikation essentiell; somit sind auch jene Verfahren, die in der Lage sind, Polychrome od. zumindest Monochrome zu drucken, von besonderem Interesse für geowissenschaftliche Anwendungen. Dabei sind einige Faktoren zu berücksichtigen:

Monochrome	Polychrome
Kein Übergang druckbar	Nahezu unbegrenzte Farbvielfalt möglich
Hoher Folgeaufwand – ein Objekt einzeln in mehreren Farben zu drucken, zieht anschließende Arbeitsprozesse nach sich	Übergänge sind in einem Schritt mit dem gleichen Material Möglich
Sehr kostenintensiv – Ein 10-farbiges Modell zu drucken bedeutet das Druckmaterial in diesen 10 Farben zu besitzen	Kosteneinsparung beim 3D Farbdruk, da sich die Ausgangsfarben mischen lassen.

Tabelle 5: Unterschiede zwischen monochromem und polychromem 3D Druck. Quelle: <http://3d-druckercheck.de/wissen/3d-farbdrucker/> (Stand 31.03.2017)

Bei der Frage der Bedienbarkeit muss vorerst geklärt werden, wie der Begriff in diesem Zusammenhang verstanden wird. Grundsätzlich lassen sich die im Bereich der generativen Fertigung eingesetzten Maschinen in Maschinenklassen einteilen. Bei der Einteilung spielen Faktoren wie das Preisniveau der Anlagen, das eingesetzte Material sowie der vorwiegende Anwendungsbereich eine Rolle. Dies geschieht auch unter Einbeziehung von unterschiedlichen Anwendungsebenen (Modellklassen). Bei der Analyse der Bezeichnungen fällt auf, dass schon durch die spezielle Namensgebung Rückschlüsse auf die Bedienbarkeit gezogen werden können (vgl. GEBHARDT 2013: 17f.).

Maschinenklasse				
Bezeichnungen	Prototyper		Fabrikator	
	Personal 3D Printer		Professional 3D Printer	Produktionsmaschinen Production 3D Printer
	Fabber	Personal Printer	Office Printer	Production Printer (Shop Floor Maschine)
Anwendung	Privat zu Hause	Semi-professionell Büro	Professionell Büro oder Werkstatt	Professionell, Produktion oder Jop Shop
Anwendungsebenen				
Prototypen Ansichtsmodelle	<b>X</b>			
Konzeptmodelle		<b>X</b>		
Funktionsbauteile			<b>X</b>	
Endprodukte				<b>X</b>
Baumaterial	Kunststoff	Kunststoff	Kunststoff	Kunststoff, Metall, Keramik
Preisniveau	500 bis 4.000€	1.000 bis 10.000€	20.000 bis 70.000€	130.000 bis > 800.00€

Tabelle 6: Einteilung der Maschinen für die Generative Fertigung. Tabelle nach GEBHARDT 2013: 18

	SL	((L)S)	FLM	LLM	3DP
<b>Konturierendes Element</b>	Laser/Inkjet/Lampe	Laser / Elektronenstrahl	Extruder	Laser / Schneidemesser	Druckkopf / Piezodruckknopf
<b>Konturgenauigkeit (mm)</b>	0,00177 - ±0,1	0,2 - 0,02	0,0025	0,01 - 0,05	K.A.
<b>X, Y Konturgenauigkeit</b>					
<b>DPI (inkjet) mm</b>	328 -656 ±0,02 -0,084	0,02 - 0,1	0,011	0,01 - 0,025	300 - 600
<b>Schichtdicke (mm)</b>	0,01 - 0,152	0,02 - 0,2	0,04 - 0,33	0,05 - 0,2	0,08 0,28
<b>Bauraum X/Y/Z (mm)</b>	40/30/100 - 1000/800/500	125/125/125 - 700/380/580	12/127/127 - 914/610/914	160/210/135 - 1180/730/550	40/60/35 - 2000/4000/1000
<b>Schnittstellenformat</b>	STL (SLC/CTI)	STL (SLC) / CLI / AMF	STL (GCODE) /	STL / (3DS)	STL / CLI / VRML / PLY / (3DS, ...)

Tabelle 7: Technische Daten und Information generativer Fertigungsanlagen. Zusammengefasst nach Verfahrensfamilien in Anlehnung an GEBHARD 2013: 535 – 601

In Tabelle 7 sind die wichtigsten Parameter der einzelnen Verfahrensfamilien zusammengefasst. Die Angaben der Tabelle sind nicht vollständig. Bei einzelnen Druckverfahren fehlten technische Angaben komplett.

In Kapitel 5.1 wurde bereits die grundsätzliche Aufteilung der generativen Fertigungsanlagen in zwei übergeordnete Maschinenklassen vorgestellt. In der feineren Untergliederung gibt die Namensgebung Aufschlüsse über die Komplexität der Verfahrensanlagen. Die Bezeichnungen wie *Personal (3D) Printer*, *Privat* oder *Semi-professionell* sowie das im Vergleich niedrige Preisniveau lassen jedenfalls vermuten, dass auch die Bedienung solcher Fertigungsanlagen von geringerer Komplexität ist.

Etwas verwirrend sind die verschiedenen Anwendungsebenen, die gleichbedeutend mit den unterschiedlichen Modellklassen stehen, und nicht ident sind mit jener Unterteilung, die GEBHARDT im Buch später anhand der **VDI** und **VDID** Klassifizierung vornimmt (vgl. Abb. 44 u. Tab. 7). Es kann aber davon ausgegangen werden, dass unter den Begriffen „Prototypen – Ansichtsmodelle“ sowie dem des „Konzeptmodelles“ Parallelen gezogen werden können zu den in Abb. 44 genannten „Konzeptmodellen“ einerseits und den „Funktionsprototypen“ andererseits.

Eine klare Abgrenzung, welche Maschinenklassen letztendlich für geowissenschaftliche Fragestellungen in Frage kommen, ist trotz aller Klassifizierungen nicht möglich und auch nicht zielführend. Es können lediglich die Grenzbereiche definiert werden, wo die generative Fertigung noch sinnvollerweise mit den Geowissenschaften in Verbindung gebracht werden kann. Wie bereits erwähnt, ist geowissenschaftlicher 3D-Druck nicht direkt in Verbindung zu bringen mit den Prozessen und Anforderungen der Produktentwicklung. Grundsätzlich kann daher davon ausgegangen werden, dass die im Bereich der Fabrikatoren angesiedelten Produktionsmaschinen für geowissenschaftliche Anwendung von geringerer Bedeutung sind als die Klasse der Prototyper. Der Grenzbereich für eine sinnvolle Anwendung wird vermutlich im Übergangsbereich zwischen der Maschinenklasse der Prototyper und der der Fabrikator liegen.

Aus den Aufstellungen in Tabelle 6 erfolgt folgende Schlussfolgerung bzw. Annahme in Bezug auf die Bedienbarkeit der generativen Fertigungsanlagen: Je höher die Maschinenklassen im Bezug zu ihrer Anwendung eingestuft werden, sprich je höher der Grad der Professionalität der Anlage, desto höher sind auch die Voraussetzungen an die Personen, die die Fertigungsanlagen bedienen. Was heißt das für die Arbeit?

Des Öfteren wurde schon von der Möglichkeit gesprochen, generativ gefertigte Bauteile für didaktische Zwecke zu nutzen. An einem Beispiel lässt sich verdeutlichen, was damit im Speziellen gemeint ist. Im Bereich der Ausbildung und des Unterrichtes an z.B. Schulen, Hochschulen oder anderen Bildungseinrichtungen wäre man mit generativen Fertigungsanlagen in der Lage, physische Modelle

sehr individuell, dem Zweck angepasst und direkt vor Ort produzieren zu können. Man müsste somit nicht mehr auf vorgefertigte physische Modelle wie z.B. Reliefkarten zurückgreifen (wie in Abb. 7 S: 25), sondern könnte wie am Beispiel in Abbildung 25 (Seite 42) den gewünschten Erdraumausschnitt selbst wählen.

*„In the past, 3D topographic models have been expensive and thus not widely used. Even when they are used, their cost usually means that educational model makers tend to focus on well-known places (...). While these places provide archetypal examples of certain geomorphic features, students and decision-makers are often more familiar and more interested in examples that are more local” (HASIUK et al. 2016: 16)*

Der Gedanke, der hier anhand eines Beispiels verfolgt wurde, bezieht sich auf eine Eigenschaft des 3D-Druckes, die ihn von fast allen anderen Fertigungsverfahren abhebt, nämlich den Vorteil, dass die Produktion von den ProduzentInnen zu den EndanwenderInnen hin verlagert wird und so die Entscheidung, was produziert wird, alleine durch die EndanwenderInnen getroffen wird (vgl. FASTERMANN 2014: 1).

## 7. Modellanalyse

Nach der Ausarbeitung der theoretischen Basis im Bereich der generativen Fertigung, der Diskussion über die Bedeutung von Visualisierungen im speziellen und echten 3-dimensionalen Bereich und einer einleitenden Klärung des Begriffes der Geowissenschaften wird der letzte Baustein untersucht, bevor wir die Ergebnisse in einer abschließenden Diskussion zusammenführen.

Ziel der Analyse ist es, Aussagen über die Genauigkeit des gedruckten Modells in Relation zum Ursprungsmodell zu treffen. Dabei stehen zwei Aspekte im Vordergrund: Merkmale, die im Untersuchungsobjekt zu erkennen bzw. zu messen sind und die Frage, ob diese auf das gewählte Druckverfahren zurückzuführen sind oder nicht.

Die weitere Vorgehensweise lässt sich daher wie folgt aufgliedern:

- **Analyse:**
  - Analyse des Ursprungsmodells (Druckdatei)
  - Analyse des Untersuchungsobjektes (gedrucktes Modell)
  - Digitalisierung des Untersuchungsobjektes (3D-Scanner)
  - Deviationsanalyse zwischen Ursprungsmodell und Untersuchungsobjekt

### **Untersuchungsobjekt**

Das Untersuchungsobjekt ist ein Modell des geologischen Untergrundes von Wien, zur Verfügung gestellt von der Geologischen Bundesanstalt (GBA). Es zeigt in überhöhter und vereinfachter Form den geologischen Unterbau der Stadt Wien im Ausschnitt der administrativen Grenzen. Abgesehen von der Form des Ausschnittes, beschränkt sich die Darstellung rein auf geologisch relevante Sachverhalte. Das Modell wurde im Zuge der Ausstellung „*Geologie<sup>3</sup> – Geologie in drei Dimensionen*“ (11.10 – 13.12.2017) von der Geologischen Bundesanstalt entwickelt und in Auftrag gegeben. Zentraler Inhalt der Ausstellung war, wie im Namen schon zu erahnen ist, die unterschiedlichen Formen von echten und unechten 3-dimensionalen Visualisierungen im Forschungsfeld der Geologie sowie deren Potential, sehr komplexe 3-dimensionalen Sachverhalte der Geologie, einem breiten, auch nicht fachkundigem, Publikum näher zu bringen. Das Modell dient als Beispiel dafür, wozu die Technologie des 3D-Druckes im Bereich der Geologie eingesetzt werden kann bzw. könnte.

Für die Auswahl des Untersuchungsobjektes war wichtig, dass dieses aus dem Bereich der Geowissenschaften kommt. Ein weiteres Kriterium war, dass sich das Modell in die Klasse der Konzeptmodelle einordnen lässt, sich also von „klassischen“ 3D-gedruckten Modellen durch eine dezidierte Farbgebung, also Träger von zusätzlichen Objektinformation, abhebt. In Folge der Recherche

kam eine Kooperation mit der GBA zustande. Zusätzlich zu den Eigenschaften eines Konzeptmodells kann das Modell aufgrund der vier Teile, aus denen es besteht, auch als Funktionsmodell, angesprochen werden.

Wie in Abbildung 45 gut zu sehen ist, besteht das Modell aus insgesamt vier Teilen. Diese Elemente repräsentieren zu größeren Einheiten zusammengefasste geologische Schichten. Die einzelnen Elemente wurden in unterschiedlich gefärbten Ausgangsmaterialien hergestellt. Somit sind die einzelnen geologischen Elemente sehr gut voneinander zu unterscheiden. Das Modell ist somit in seiner Gesamtheit polychrom, obwohl die einzelnen Elemente als Monochrome angesprochen werden müssen. Die gewählte Schichtäquidistanz der Bauteile ist gleich und beträgt 0,2 mm. Die gewählte Fertigungsanlage (Tabelle 8) wäre in der Lage, in einer höheren Auflösung zu drucken (- 0,02 mm). Die gewählte Auflösung kann somit als grob bezeichnet werden.

Die Anlage kann nach der Klassifikation von GEBHARDT als Personal 3D-Drucker (Tab. 7) bezeichnet werden. Sie zählt zu den Extrusionsverfahren (FLM) in der Kategorie der Einzeldüsen-Verfahren. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich in Tabelle 8.



Hersteller:	bq (Spanien)
Technologie	FLM
Druckgröße	297/210/200mm
Auflösung (Schichtdicke)	0,02 – 0,3mm
Druckmaterial	PLA, Woodfill, Filaflex, usw.
Druckbett	Temperiertes Glas
Kalibrierung	Halbautomatisch
Druckkopf	DDE mit 2x Antrieb
Hotend	Stahl mit PTFE-Inlay
Bedienung	LCD-Bildschirm
Software	Cura, Simplify, usw.
Kommunikation	4GB SD, USB
Preis	1690€

Tabelle 8: Datenblatt Witbox 2: Quelle-Datenblatt: 3DEE Store Wien, Bild: <https://i.otto.de/i/otto/18014557/bq-3d-drucker-witbox-2-weiss.jpg?formatz> (10.02.2017)

Alle Elemente wurden mit der gleichen generativen Fertigungsanlage mit denselben Eigenschaften gefertigt. Das Modell selbst kann als Konzeptmodell mit rudimentären Funktionen bezeichnet werden. Als Modellfunktion ist die Möglichkeit gemeint, die einzelnen Elemente wie bei einem 3-dimensionalen Puzzle zusammensetzen bzw. auseinanderzunehmen. In Abb. 45 wurde diese Funktion in einer Fotomontage verdeutlicht. Die Farbgebung steht in keiner Verbindung zur geologischen Schicht und

hat daher keine fachliche Bedeutung. Die Namensgebung in der Arbeit bezieht sich auf die Namensgebung der Dateien, die von der GBA zur Verfügung gestellt wurden.

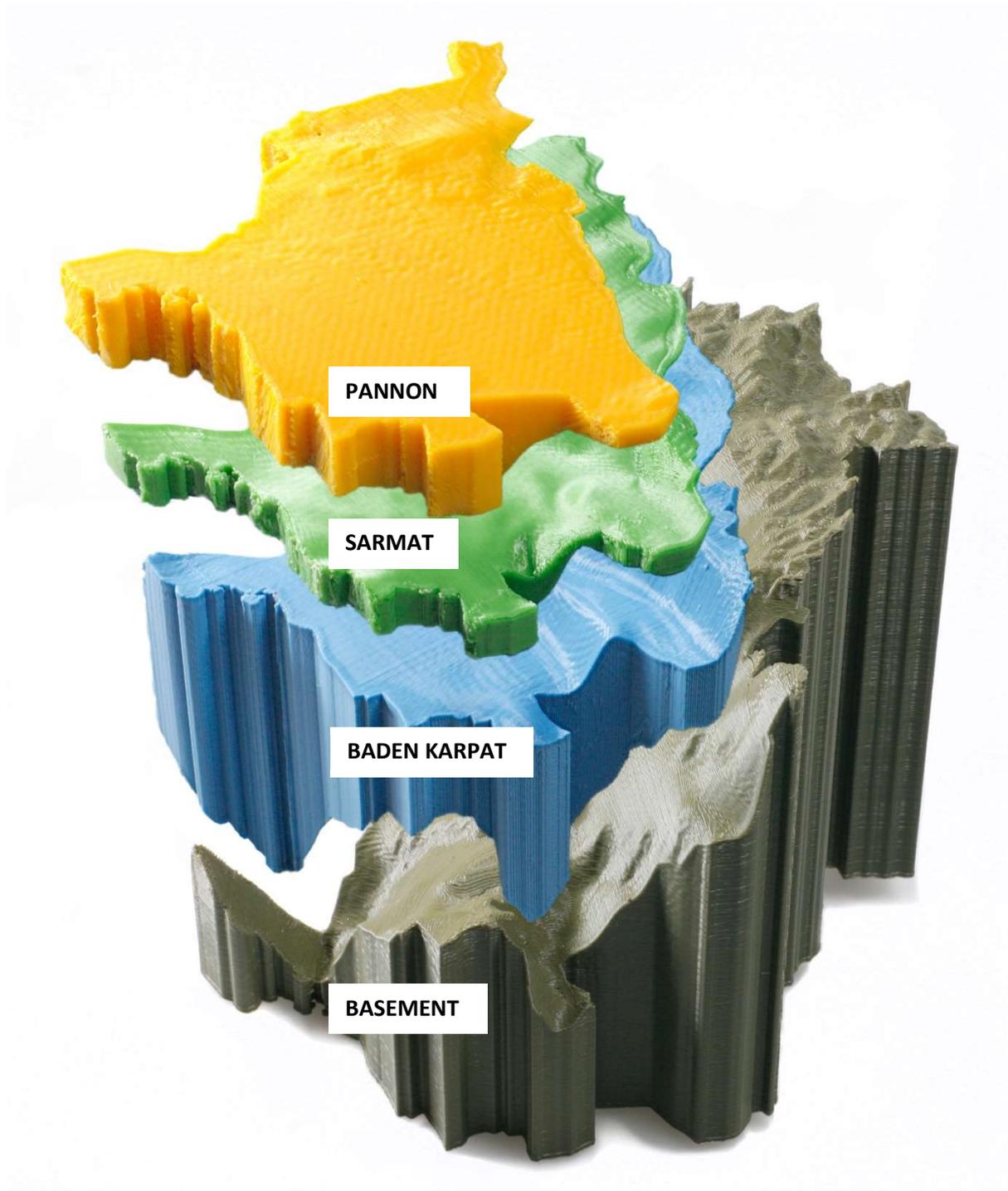


Abb. 45: Vereinfachte Schichten des Wiener Untergrundes inklusive der Bezeichnung der Schichten.  
Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt

## 7.1. Analyse Ursprungsmodell (STL-Mesh Model)

Einen ersten Ansatz für die Analyse des Ursprungsmodells liefern die Untersuchungen von VALENTAN et al. 2008. Aus STL-Dateien lassen sich sehr einfach drei Maßzahlen eruieren, die erste Aufschlüsse über die Formkomplexität der zu druckenden STL-Datei geben. Basis dafür bilden drei sehr einfache mathematische Gleichungen.

Bewertung der Formkomplexität durch die Anzahl der Dreiecke ( $n$ = Anzahl der Dreiecke)

$$C_1 = n$$

Bewertung der Formkomplexität auf Basis des Verhältnisses zwischen Volumen und Anzahl der Dreiecke ( $v$  = Volumen)

$$C_2 = \frac{v}{n}$$

Bewertung der Formkomplexität auf Basis des Verhältnisses zwischen Volumen und Oberfläche des Objektes ( $a$  = Oberfläche)

$$C_3 = \frac{v}{a}$$

	Datei <sup>16</sup>	a mm <sup>2</sup>	v mm <sup>3</sup>	C1/Faces	C2	C3
Pannon	2,597	19362,1	71850,5	53178	1,35	3,71
Sarmat	2,689	20644,4	44940,6	55044	0,82	2,18
Baden-Karpat	4,507	38094,2	206804	92288	2,24	5,43
Basement	10,960	82616,7	859673	224436	3,83	10,40

*Tabelle 9: Analyse der Druckdaten inkl. Kennzahlen der Formkomplexität (Namensgebung der Schichten wurde übernommen von der GBA – Reihenfolge der Schichten in der Tabelle ist gleich der Reihenfolge am Objekt.)*

<sup>16</sup> Dateigröße: MB / Dateiformat: BINARY STL. Neben dem lesbaren STL Format auf ASCII Basis liegen die Vorteile beim Speichern im Binary STL Format in einer geringeren Dateigröße (vgl. VALENTAN 2008: 74f.)

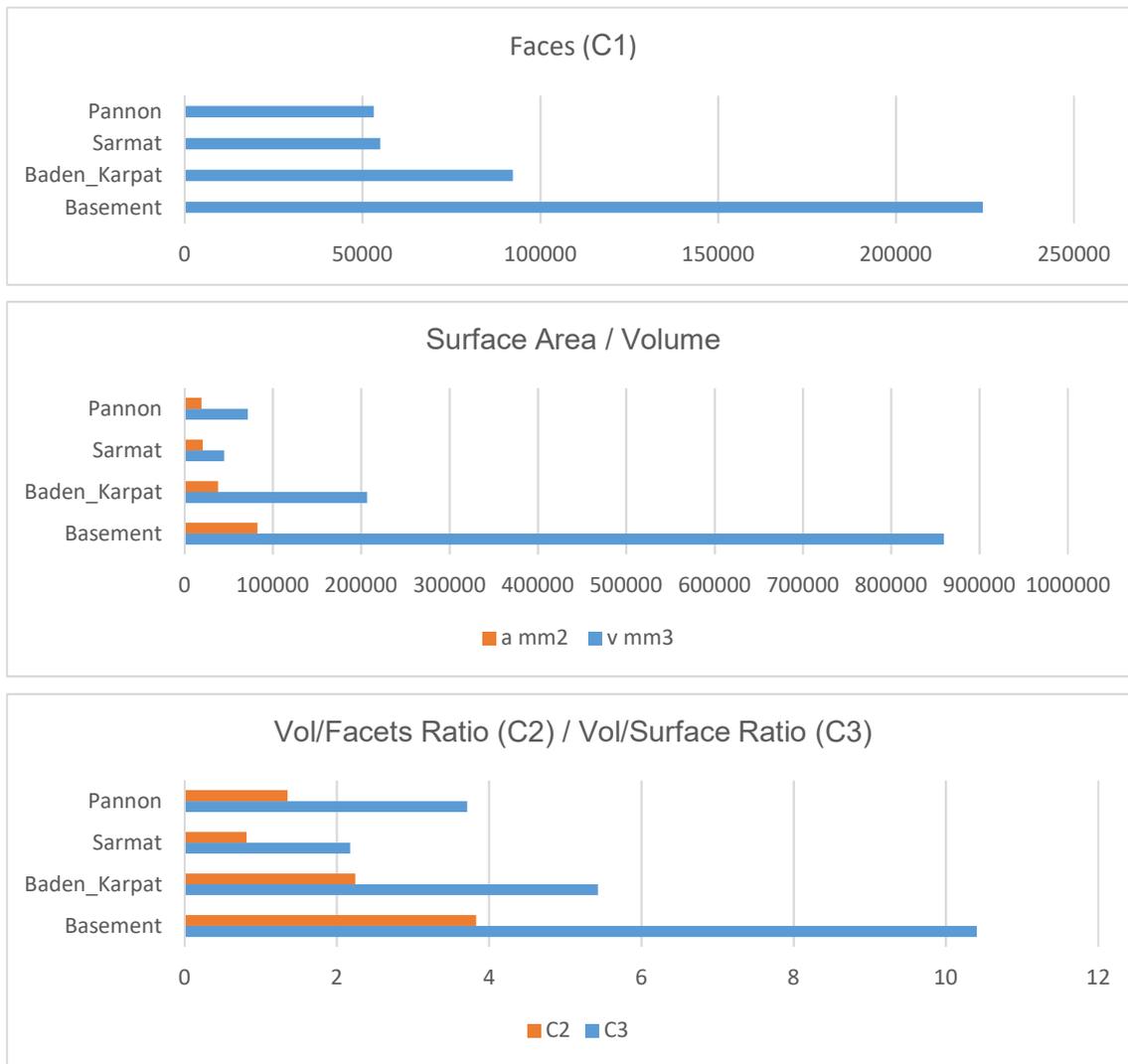


Tabelle 10: Maßzahlen der Formkomplexität der einzelnen Schichten des geologischen Modells.

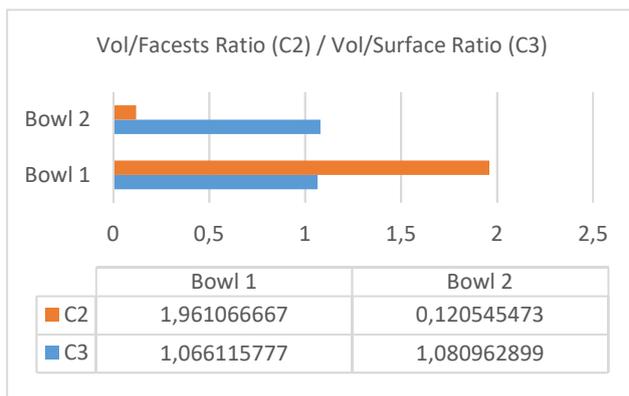


Tabelle 11: Maßzahlen der Formkomplexität einer hohlen Halbkugel Beispiel Abb. 35

Die Analyse der einzelnen Modelleinheiten zeigt keine überraschenden Ergebnisse. Es besteht ein klarer Zusammenhang zwischen Volumen und der Größe der Oberfläche. Am Beispiel in Tabelle 11 wird deutlich, dass das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen unabhängig von der Anzahl der Dreiecke ist. Wie in Kapitel 5.3.2 (Abb. 35) an der Form „Bowl“ verdeutlicht werden kann, ist eine höhere Anzahl von Dreiecken bei

gleichbleibenden bzw. geringfügigen Änderungen des Volumens sowie das Verhältnis der beiden Werte zueinander ein Wert, der mehr über die Formkomplexität aussagen kann.

Auch VALENTAN (vgl. 2008: 79) beschreibt die Maßzahl C2 als jene, die am ehesten Aufschluss über die Komplexität der Form geben kann, mit der Einschränkung, dass auch diese Maßzahl die Geometrie des untersuchten Objektes, ein nicht unwesentlicher Faktor, nicht berücksichtigt. Die Maßzahl C2 kann somit auch als jene Maßzahl interpretiert werden, die Aufschluss über die Feinheit und Detailliertheit der Oberfläche gibt.

Wie sich diese Kennzahlen am Untersuchungsobjekt verändern, wenn man die Anzahl der Facets erhöht, wird in der folgenden Abbildung (Abb. 46) beziehungsweise der darauffolgenden Tabelle verdeutlicht. Verwendet wurde dabei die originale Datei des Basement Objekts (DXF-Format). Im Programm Cinema 4D (R18 Student Version) wurde mit dem Befehl [Select > MESH > COMMANDS > SUBDIVIDE] die Anzahl der Facets, die das Objekt beschreiben knapp vervierfacht.

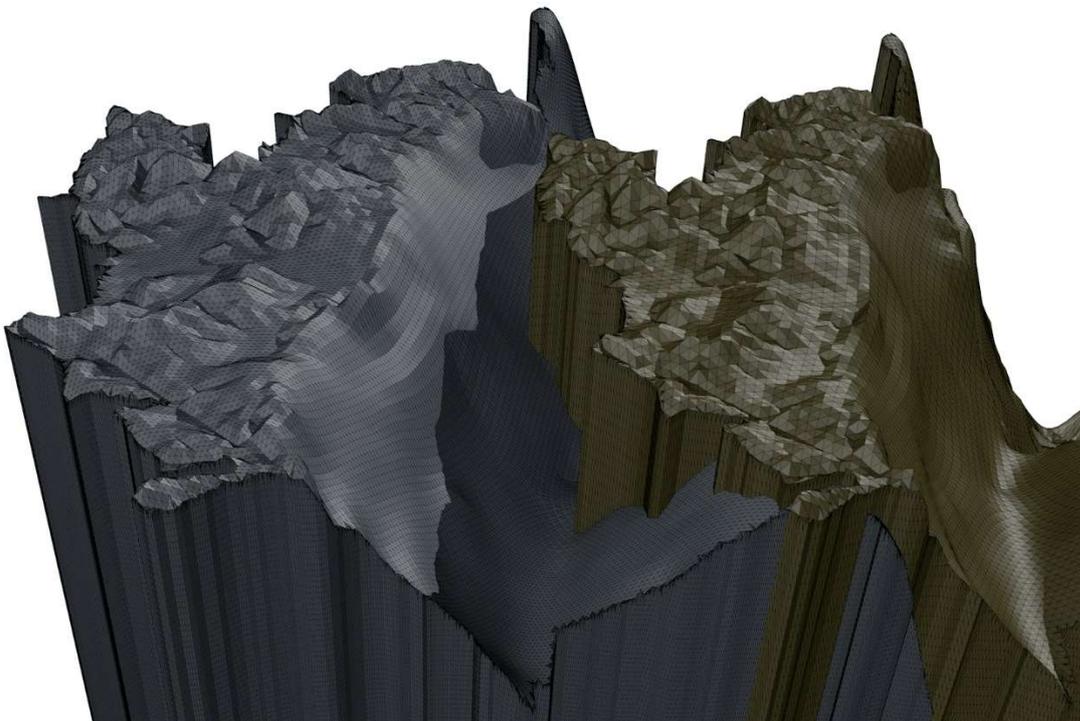


Abb. 46: Gegenüberstellung der originalen STL-Druckdatei (rechts) und des bearbeiteten Objekts [Anzahl der Facets vervierfacht] (links) Quelle-Bild: Hofer Florian C4D-Render

	Datei <sup>17</sup>	a mm <sup>2</sup>	v mm <sup>3</sup>	C1/Faces	C2	C3
Basement_orig	10,96	82616,7	859673	224436	3,83	10,40
Basement_Neu	43,83	82423,9	856354	897760	0,95	10,39

Tabelle 12: Vergleich der Formkomplexitätskennzahlen gleicher Objekte mit unterschiedlichen Detailierungsgrad.

<sup>17</sup> Dateigröße: MB / Dateiformat: BINARY STL. Neben dem lesbaren STL Format auf ASCII Basis liegen die Vorteile beim Speichern im Binary STL Format in einer geringeren Dateigröße (vgl. VALENTAN 2008: 74f.)

Wie zu erwarten, hat ein subdivide und somit eine Erhöhung der Anzahl der Facets vor allem Auswirkung auf den Wert C2, also das Verhältnis zwischen Volumen und der Anzahl der das Volumen beschreibenden Dreiecke. Welche Auswirkungen das auf die Darstellung hat, wird in Abbildung 47 deutlich ersichtlich. Gerade in Bereichen inhomogener Flächen, wie hier am Beispiel des Bereichs des Wienerwaldes, wirkt sich ein höherer Detailgrad (sprich eine höhere Anzahl beschreibender Facets) positiv auf das Objekt aus. Nicht außer Acht zu lassen ist auch die Vervielfachung der Dateigröße.

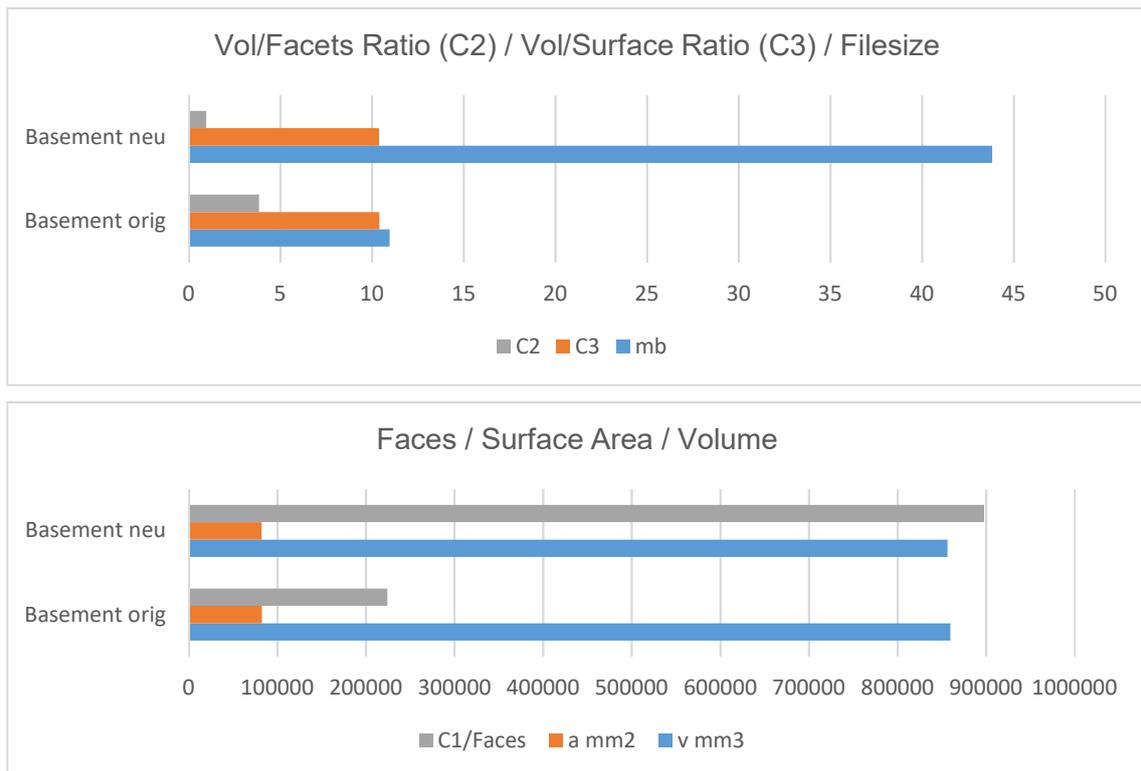


Tabelle 13: Maßzahlen der Formkomplexität im Vergleich von Objekten mit unterschiedlichen Detailierungsgrad

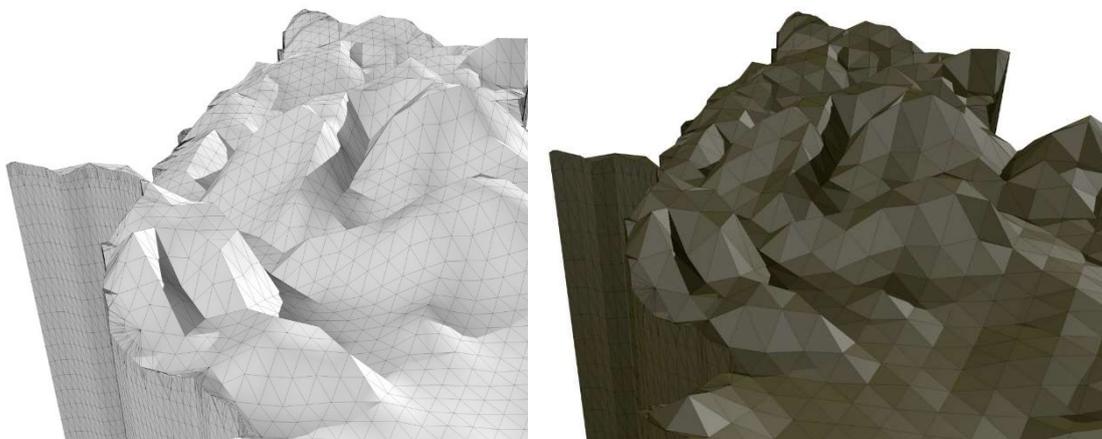


Abb. 47: Detailansicht der Gegenüberstellung im Bereich inhomogenen Geländes.  
Quelle-Bild: Hofer Florian C4D Render.

### 7.1.1 Analyse der Maschinendaten / Steuerungsdatei

Wie in Kapitel 5.4.2 und in Abb. 34 bereits angesprochen und abgebildet, fungieren das Format STL sowie alle anderen besprochenen Formate lediglich als Austauschformat, sozusagen als Brücke zwischen größtenteils CAD Programmen und der Steuerungssoftware der generativen Fertigungsanlagen. Im Falle des Modells der Geologischen Bundesanstalt liegt die Steuerungsdatei im Format .gcode vor. G-Code ist eine Programmiersprache, die vorwiegend zur Steuerung von CNC-Maschinen<sup>18</sup> verwendet wird (vgl. [precifast.de](http://precifast.de)), in unserem Fall auch die Programmiersprache, mit der der verwendete 3D-Drucker angesprochen wird.

```
1 M109 S210.000000
2 ;Sliced at: Wed 28-09-2016 14:47:28
3 ;Basic settings: Layer height: 0.2 Walls: 0.8 Fill: 15
4 ;Print time: 3 Stunden 47 Minuten
5 ;Filament used: 16.467m 49.0g
6 ;Filament cost: None
7 ;M190 S70 ;Uncomment to add your own bed temperature line
8 ;M109 S210 ;Uncomment to add your own temperature line
9 G21 ;metric values
10 G90 ;absolute positioning
11 M82 ;set extruder to absolute mode
12 M107 ;start with the fan off
13 G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops
14 G28 Z0 ;move Z to min endstops
15 G1 Z15.0 F9000 ;move the platform down 15mm
16 G92 E0 ;zero the extruded length
17 G1 F200 E3 ;extrude 3mm of feed stock
18 G92 E0 ;zero the extruded length again
19 G1 F9000
20 ;Put printing message on LCD screen
21 M117 Printing...
22
23 ;Layer count: 553
24 ;LAYER:-2
25 ;RAFT
26 G0 F9000 X86.881 Y86.949 Z0.300
27 ;TYPE:SUPPORT
28 G1 F1200 X96.587 Y86.949 E1.21059
29 G1 X106.853 Y87.552 E2.49322
30 G1 X106.846 Y88.205 E2.57468
31 G1 X110.981 Y88.288 E3.09052
32 G1 X110.981 Y88.349 E3.09813
33 G1 X135.581 Y88.349 E6.16637
.....
8159 G0 F9000 X104.262 Y103.960 Z3.810
8160 ;TYPE:WALL-INNER
8161 G1 F1800 E1858.22204
.....
10796 G0 F9000 X188.681 Y93.402
10797 ;TYPE:SUPPORT
10798 G1 F1800 E2164.09546
```

In der grauen Box befindet sich ein Auszug der .gcode Steuerungsdatei eines der vier Elemente des Untersuchungsobjektes (Pannon, oberste Einheit). Zwischen Zeile 1 und 7 befinden sich einige für den

<sup>18</sup> CNC – computerized numerical control

Druck relevante Steuerinformationen. Ab Zeile 7 beginnt der eigentliche Code. Die nach der Punktzeile stehenden Informationen sind einem Kommentar gleichzusetzen und haben keinen Einfluss auf die Steuerung. Als Beispiel Zeile 7 `M190 S70 ;Uncomment to add your own bed temperature line: M190S70` ist der Befehl, um die Temperatur der Bauplattformtemperatur zu steuern (M190), auf den Wert 70°C (S70). Öffnet man die .gcode Datei mittels einem Texteditor-Programm wie Notepad++ (Windows) oder Text Wrangler (OSX) wird die Datei wie im grauen Feld ersichtlich dargestellt.

Im Steuerungsprogramm der generativen Fertigungsanlage wird die Datei auch graphisch dargestellt. Als Steuerungssoftware für den Witbox 2 Drucker dient das frei verfügbare Programm *Cura* (verwendete Version 15.04.3 [https://ultimaker.com/en/products/cura-software\\_](https://ultimaker.com/en/products/cura-software_), zuletzt Abgerufen am 17.02.2016). Die folgenden Screenshots (Abb. 48-51) zeigen die visualisierte Steuerungsdatei.

Gleich zu Beginn (Abb. 48) ist die bei FLM-Verfahren typische Füllkonstruktion, die sogenannten „Hatches“ zu erkennen (interne Stützkonstruktion). Alle Druckbahnen, die für die Erstellung interner Stützkonstruktion vorgesehen sind, werden in Gelb dargestellt. Die rot-grünen Linien visualisieren die Bahnen des Druckkopfes für die Hülle des Objektes. Die rote Seite beschreibt dabei die Außenseite, die grüne Linie die Innenseite des Objektes. Es werden nicht beide Linien gedruckt, die Darstellung dient lediglich dazu, die richtige Orientierung des Bauteils überprüfen zu können.

Blaue Linien, wie sie auf Abbildung 49 gut zu erkennen sind, sind Steuerlinien, auf denen der

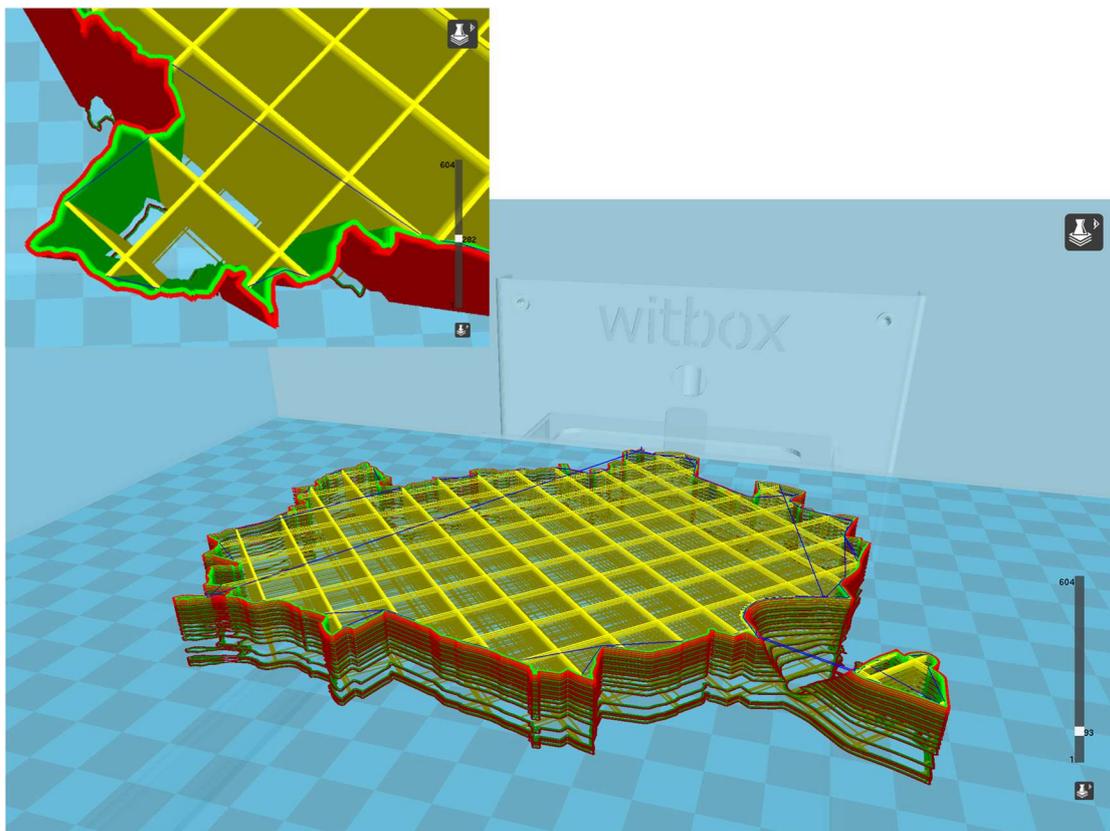


Abb. 48: Visualisierung der .gcode Steuerungsdatei des Basement Elements Quelle-Bild: Screenshot

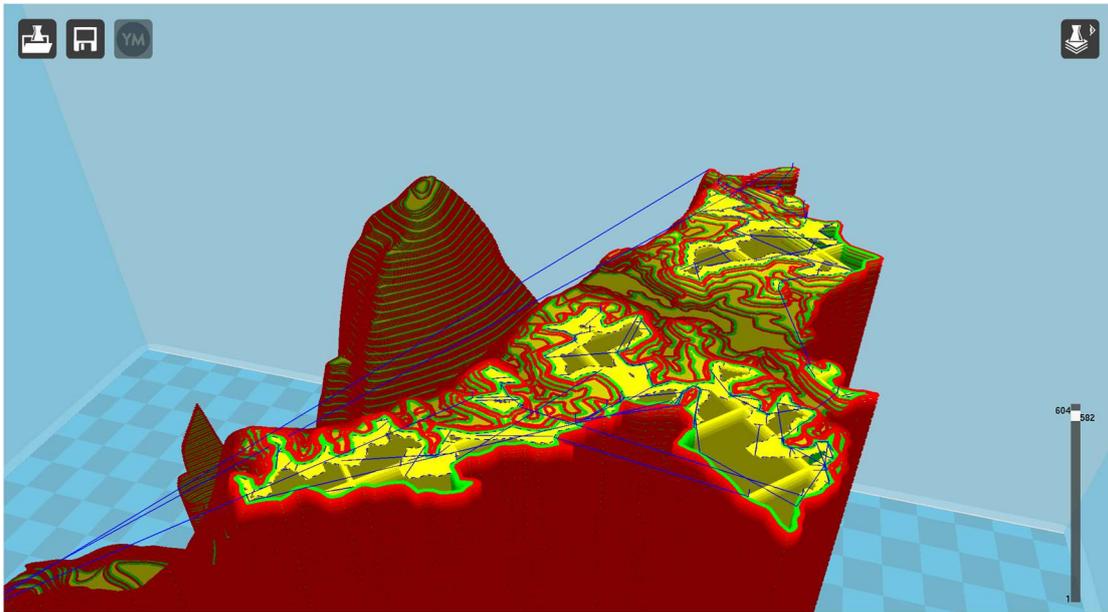


Abb. 49: Visualisierung der .gcode Steuerungsdatei des Basement Elements 2 Quelle-Bild: Screenshot

Druckkopf neu positioniert wird, ohne dabei Material aufzutragen. In den beiden letzten Abbildungen (49 u. 50) ist die vom Programm automatisch generierte Stützkonstruktion (türkis) sehr gut zu erkennen. Auch sie wird mit einer Füllung (Hatches) gedruckt gleich dem Innenleben der eigentlichen Bauteile.

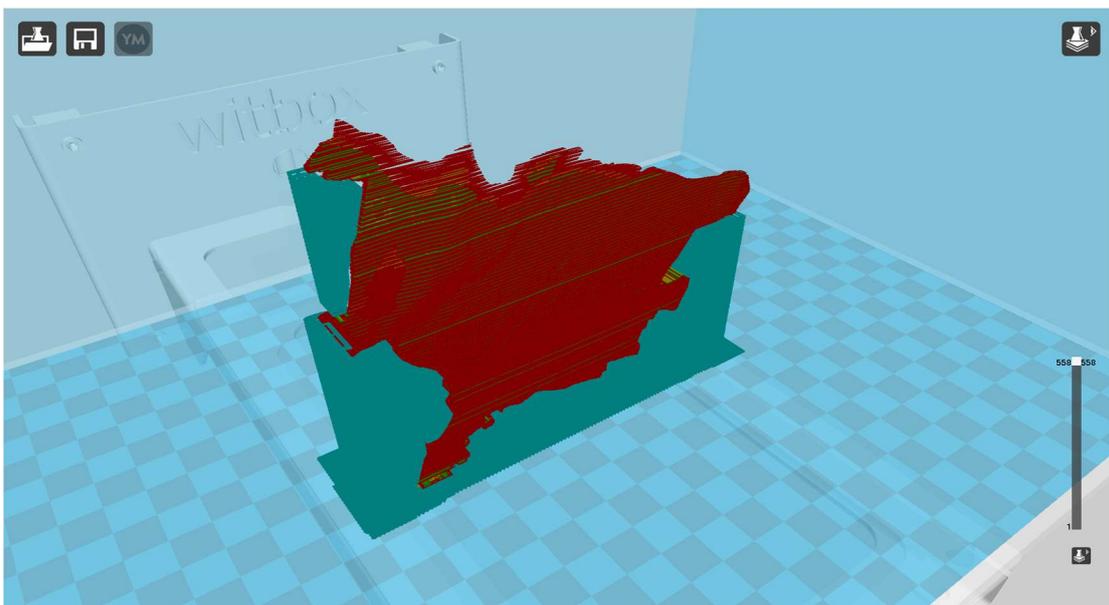


Abb. 50: Vollständige Visualisierung der .gcode Steuerungsdatei des Pannon Elements (Deckelement) inkl. Stützkonstruktion (Türkis) Quelle-Bild: Screenshot

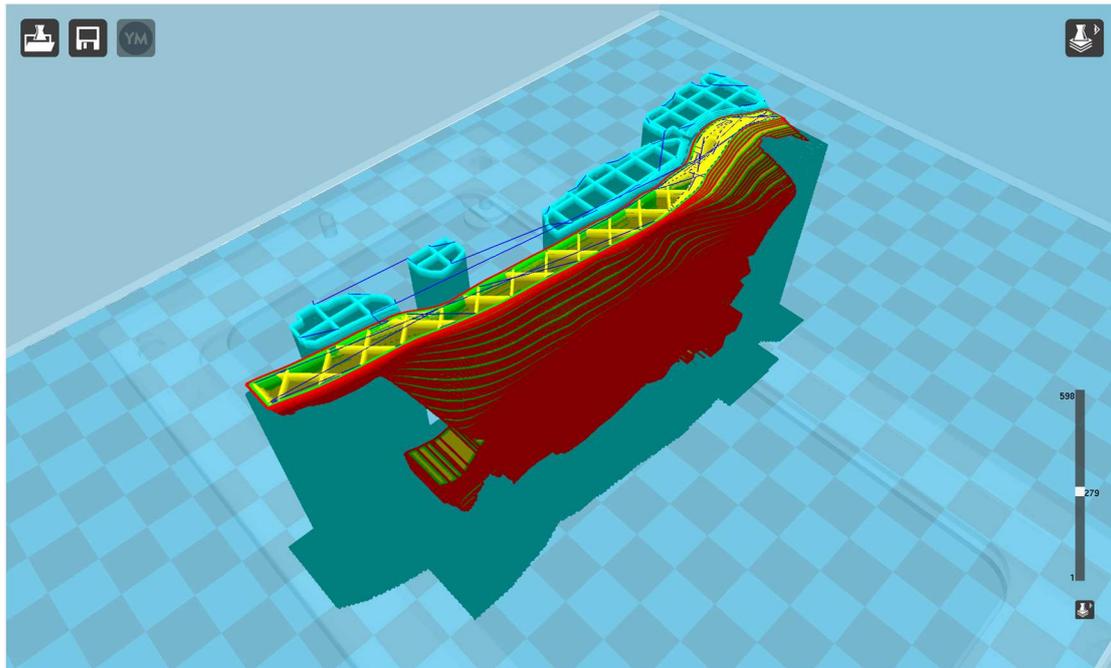


Abb. 51: Querschnitt der .gcode Steuerungsdatei des Pannon Elements(Deckelement) inkl. Stützkonstruktion (türkis)  
 Quelle-Bild: Screenshot

Die Orientierung im Druckraum ist bei jedem Element unterschiedlich. Grund dafür ist nicht, wie in Kapitel 5.2 besprochen, die Vermeidung des Treppenstufeneffektes. Die Orientierung der Einzelteile wurde so gewählt, dass der Materialeinsatz, vorrangig der des Stützmaterials, so gering wie möglich gehalten wird, sowie aus stabilitätstechnischen Gründen. Gerade die beiden obersten Elemente flachen sehr stark zu einer Seite hin ab. Eine an der tatsächlichen Lage des Objekts im Raum orientierte Druckausrichtung hätte dazu geführt, dass die sehr filigranen Teile schon während des Drucks bzw. spätestens beim Entfernen des Stützmaterials wegbrechen (PORPACZY C 2016)

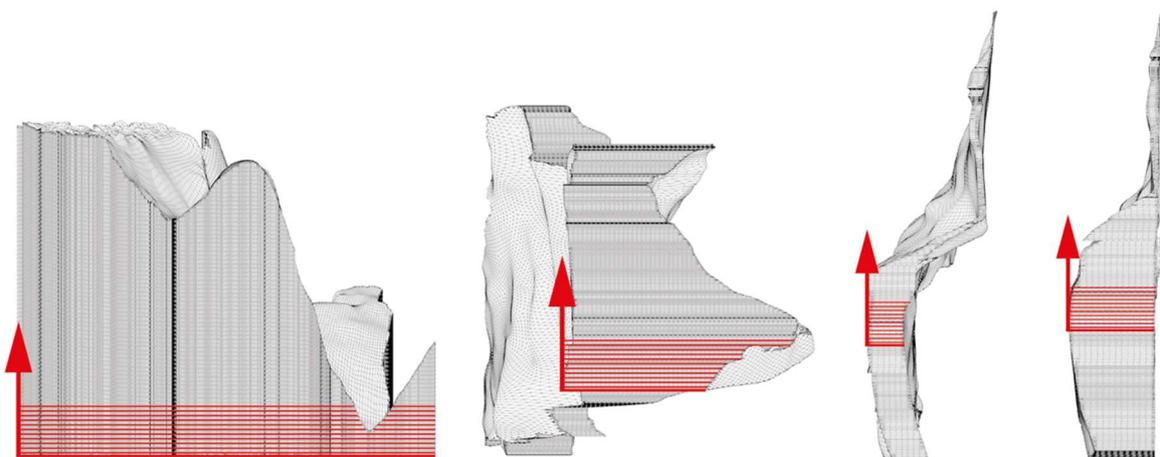


Abb. 52: Orientierung bei der Fertigung sowie Schichtlage der generierten Schichten am geologischen Modell. Quelle-Bild:  
 Eigene Darstellung, C4D Render inkl. Overlay

Abb. 52 zeigt die Orientierung der Elemente im Bauraum der generativen Fertigungsanlage sowie die dazugehörige Orientierung der Schichten. Wie bereits in Kapitel 5 erwähnt, hat die Orientierung der Bauteile im Bauraum Auswirkungen auf das Erscheinungsbild der generierten Objekte aufgrund des Treppenstufeneffektes. Dieser Effekt beschränkt sich ausschließlich in Richtung der Z-Achse, wie bereits in Kapitel 5.2 erläutert wurde.

Die Schichtdickenäquidistanz beträgt bei dem Modell 0,2 mm, was im Bereich der generativen Fertigung, auch im Bereich der Extrusionsverfahren (FLM), als sehr grob bzw. ungenau bezeichnet werden kann.

## 7.2. Analyse Untersuchungsobjekt (3D-Druck)

Da wir ein bereits existierendes Modell zur Analyse heranziehen, überspringen wir den Prozess des Druckens an sich und betrachten nur das Endprodukt. Viele der Parameter wurden bereits besprochen und diskutiert. Die Beschreibung bezieht sich daher rein auf die visuell erkennbare Eigenheiten, Merkmale oder offensichtliche Fehlstellen. Einige sind vermutlich auf den Druck und das ausgewählte Verfahren zurückzuführen andere wiederum auf die Orientierung im Bauraum oder die spezielle Eigenschaft der additiven Fertigung an sich. Für die Analyse ziehen wir die Abbildungen der kommenden Seiten heran.

Der Treppenstufeneffekt, wie bereits in Kapitel 5.2 beschrieben worden, ist eine Eigenschaft bzw. Eigenheit bei generativen Fertigungsverfahren, welche auf der schichtbasierten Generierung der Bauteile basiert. Die unterschiedlichen Ausformungen dieses Effektes sind in den drei Abbildungen auf der kommenden Seite zu betrachten. In Abb. 55 ist der Treppenstufeneffekt zu sehen, der auftritt, wenn die aufeinanderfolgenden Schichten in X- und Y-Richtung eine geringere Ausdehnung haben als die jeweils vorhergegangene Schicht. Das Bild, das dabei entsteht ist zu vergleichen mit Höhenschichtlinien auf einer Karte. Für die Ausprägung des Effektes ist in diesem speziellen Fall die Orientierung des Bauteils im Druckraum verantwortlich. Zur Erinnerung: Die X- u. Y-Ebene ist jene Ebene, in der die Konturierung des Objektes erfolgt (Kapitel 5.2), die Z-Ebene jene Schicht, die ausschließlich für die Schichtdicke verantwortlich ist. An den anderen Oberflächen (Abb. 56, Abb. 57, Abb. 58) ist dieser Effekt nicht zu erkennen. Grund dafür ist die andere Ausrichtung der Bauteile im Bauraum (Abb. 52).

In Abb. 54 sind Unregelmäßigkeiten in den einzelnen Schichten zu erkennen. Zwar müsste der Treppenstufeneffekt auch hier zu erkennen sein (begründet in der gewählten Schichtäquidistanz), die Unregelmäßigkeiten sind jedoch vermutlich auf das gewählte Verfahren und Inkonsistenzen in der Konturierung (X-, Y-Ebene) zurückzuführen. In Abb. 53 zeichnet sich das Baden-Karpat Bauteil (Blaue Schicht) durch eine sehr unregelmäßige Seitenfläche aus. Dabei handelt es sich um die Unterseite des Bauteils beim Druck selbst, also jenen Bereich, wo der erste Materialauftrag stattgefunden hat und sich die Verbindung zwischen Stützkonstruktion und eigentlichem Bauteil befindet. Solche Fehlstellen können durch eine Nachbearbeitung (Schleifen) entfernt werden.

Diese Fehlerstellen sind auch auf den anderen Bauteilen (SARMAT u. PANNON) zu erkennen. Jedoch sind diese dort aufgrund der vergleichsweise geringeren Seitenfläche liegt nicht so augenscheinlich.

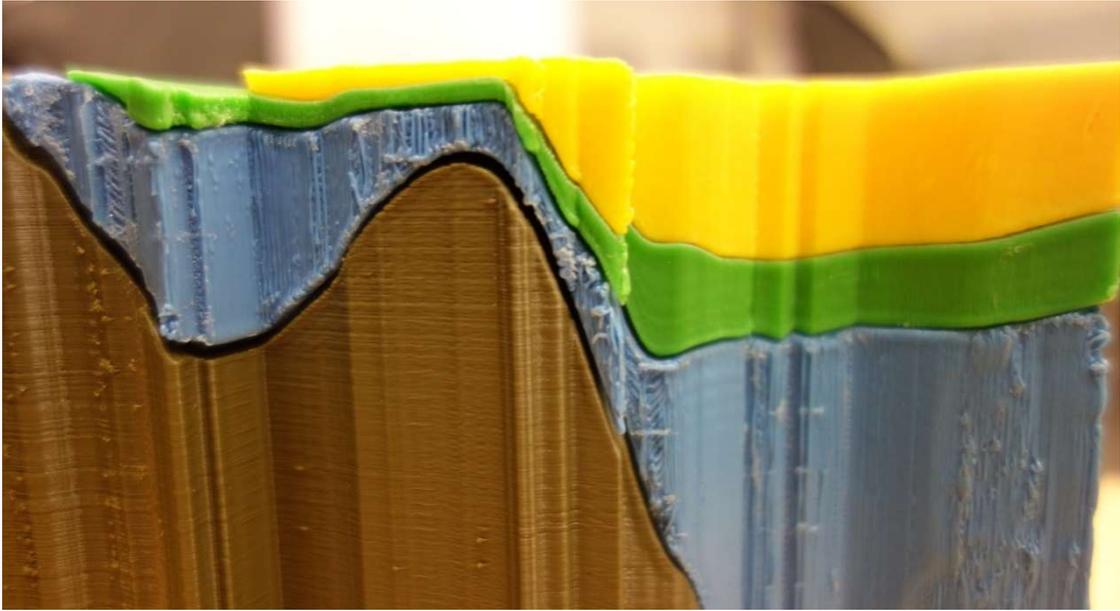


Abb. 53: Seitliche Detailaufnahme der einzelnen geologischen Schichten. Quelle-Bild: Hofer Florian



Abb. 55: Detailaufnahme Bereich Wienerwald. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt



Abb. 54: Detailaufnahme Basement Objekt. Quelle-Bild: Hofer Florian



Abb. 56: Aufsicht #1. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt

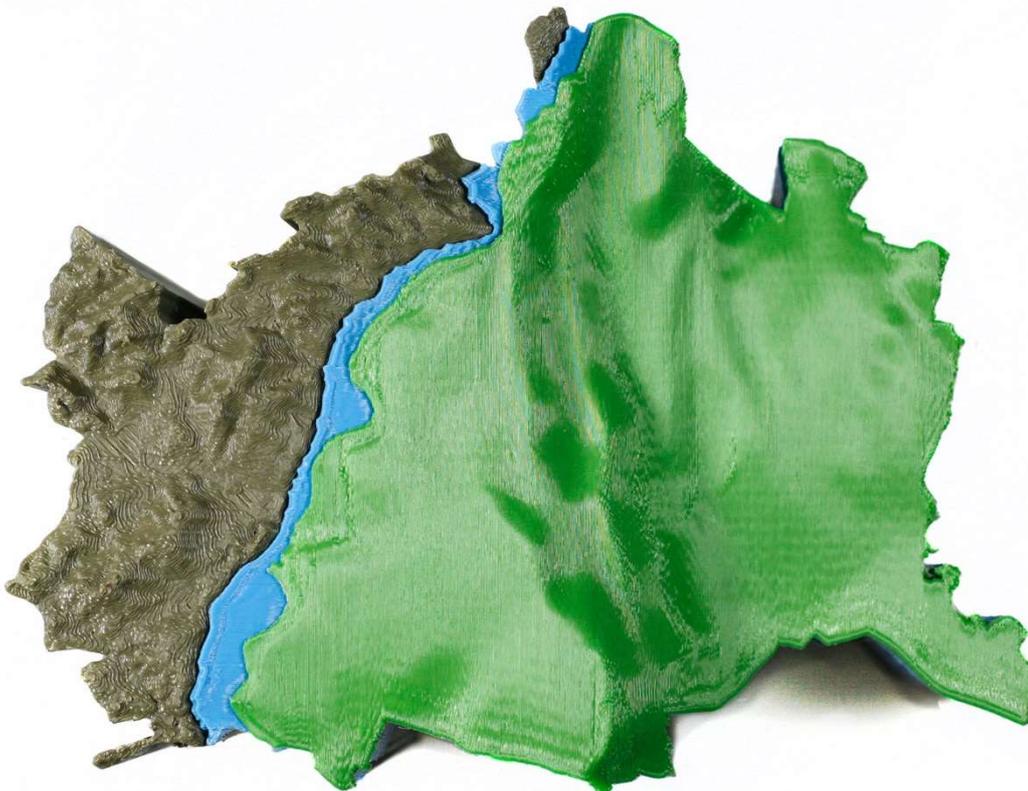
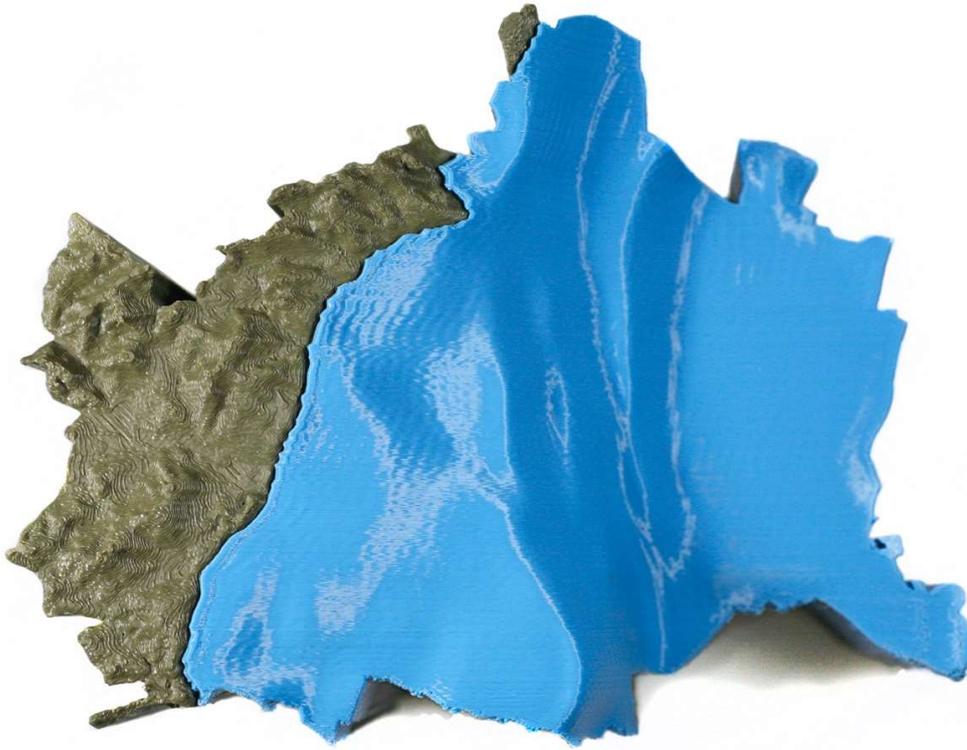
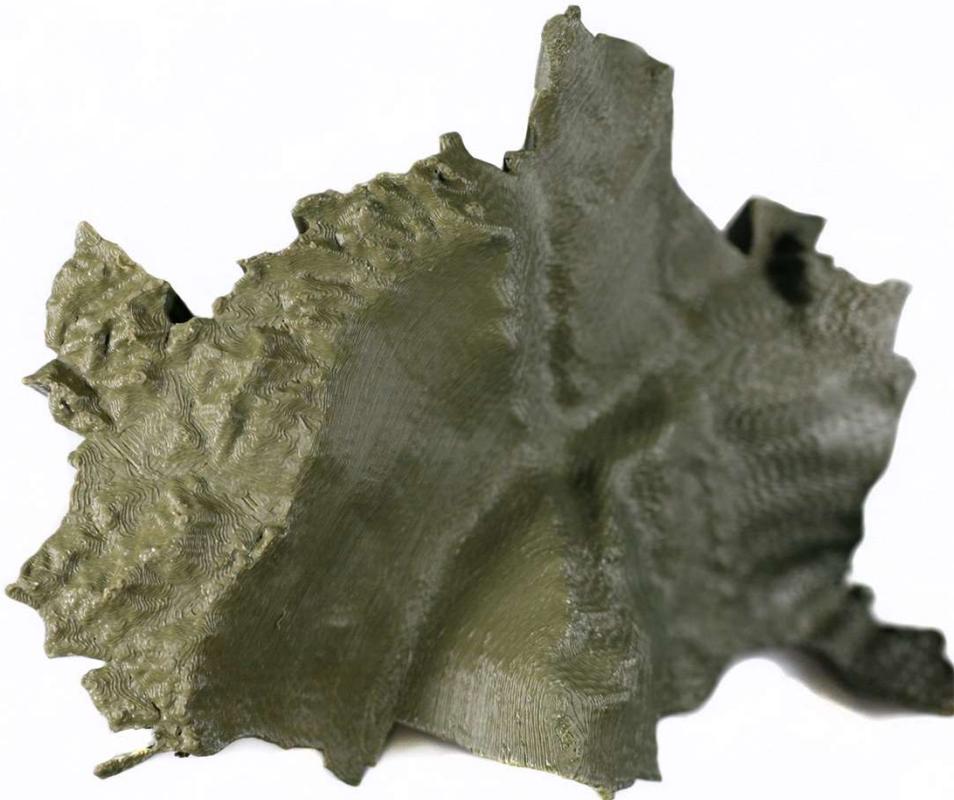


Abb. 57: Aufsicht #2. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt



*Abb. 58: Aufsicht #3. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt*



*Abb. 59: Aufsicht #4. Quelle-Bild: © Geologische Bundesanstalt*

Bis auf diese vereinzelt, auf das gewählte Verfahren und dessen geringe Maschinenqualität zurückzuführenden Fehlerstellen sind die restlichen Oberflächen (Abb. 56, Abb. 57, Abb. 58, Abb. 59) den Druckverfahren entsprechend gleichmäßig ausgeprägt. Die einzelnen Schichten sind bei genauerer Betrachtung zu erkennen. Offensichtliche Fehler wie an den Seitenbereichen können aber nicht ausgemacht werden.

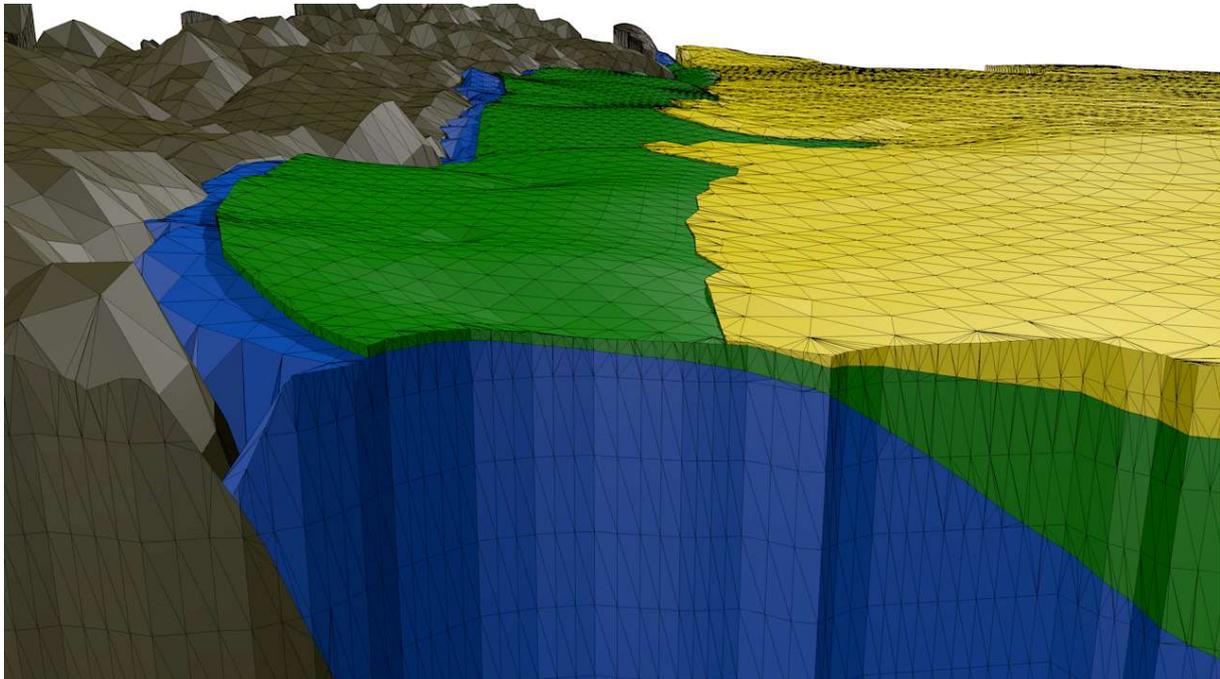


Abb. 60: Seitliche Detailaufnahme der einzelnen Schichten des Ursprungsmodells (C4D-Render) Quelle-Bild: Hofer Florian

Im Vergleich mit den Renderings des Ursprungsmodells zeigt sich eine sehr deutliche Abweichung, deren Auswirkungen in der späteren Analyse noch eine Rolle spielen werden.

An den Grenzen der einzelnen Bauteile am Ursprungsmodell (Abb. 60) ist kein Abstand zu erkennen. Die Schichten berühren sich an den Schichtgrenzen vollständig. (Im eigentlich Modell (Abb. 53) sind jedoch deutliche Lücken zu erkennen. Eine mögliche und denkbare Ursache dafür ist, dass die Elemente einerseits in separaten Druckaufträgen gedruckt wurden und in einer doch sehr niedrigen Druckauflösung (Schichtdickenäquidistanz). Dies führt vermutlich dazu, dass die einzelnen Bauteile nicht passgenau hergestellt werden konnten.

Ohne an dieser Stelle zu weit vorzugreifen, hat dies natürlich Auswirkungen auf die Geometrie des Gesamtobjekts und ebenso auf die Genauigkeit des gedruckten Objektes im Vergleich zum Ursprungsmodell. Darauf wird später noch näher eingegangen.

### 7.3. Deviationsanalyse

Bis zu diesem Punkt wurde die Analyse jeweils für das Ursprungsobjekt, also die aus den 3D Daten erzeugte Druckdatei, und das Untersuchungsobjekt selbst, das 3D gedruckte Modell, separat vorgenommen. Im letzten Teil der Analyse soll die Frage beantwortet werden, wie genau generative Fertigungsverfahren sind. Dazu werden die beiden Modelle, also das Untersuchungsobjekt und das Ursprungsobjekt einer Deviationsanalyse<sup>19</sup>, in Anlehnung an die Arbeit von VIRTANEN et. al (vgl. VIRTANEN 2008) unterzogen. Ziel ist es herauszufinden, wie genau das Untersuchungsobjekt mit dem Ursprungsobjekt übereinstimmt sowie welches Ausmaß und welche Ursache etwaige Abweichungen haben. Um diese Analyse überhaupt durchführen zu können, müssen aber beide Modelle in einer Form vorhanden sein, in der sie miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Ein möglicher Weg ist, das Untersuchungsobjekt erneut zu digitalisieren. Für die Analyse wurde das Modell mittels Laserscanner (Kapitel 7.3.1) digitalisiert und anschließend im Programm CloudCompare mit dem Ursprungsobjekt bezüglich etwaiger geometrischer Abweichungen analysiert (Kapitel 7.3.2).

Gleich vorweg ist anzumerken, dass die Ergebnisse der Analyse keine Aussagen darüber treffen können, wie genau generative Fertigungsverfahren in ihrer Gesamtheit sind. Die Aussagen und Ergebnisse beziehen sich rein auf das verwendete Druckverfahren mittels dessen das Untersuchungsobjekt hergestellt wurde, sowie auf das Modell selbst.

#### 7.3.1 3D-Scan

Um physische Objekte, in diesem Fall das Modell der geologischen Schichten, zu digitalisieren und daraus einen 3-dimensionalen Datensatz zu generieren, gibt es mehrere Möglichkeiten. Objekte können photogrammetrisch oder mit Hilfe von bildgebenden Verfahren aus den Bereich der Radiologie oder aber auch durch den Einsatz von Laserscannern digitalisiert werden. Für die Digitalisierung des geologischen Modells wurde ein Laserscanner der TU Wien des Institutes für Kunst und Gestaltung an der Fakultät für Architektur und Raumplanung verwendet.

Mit dem Laserscanner der Firma Metris (mittlerweile Nikon) wurden insgesamt 3 Scanvorgänge durchgeführt. Das geologische Schichtmodell wurde im ersten Scanvorgang komplett (im zusammengesetzten Zustand) eingescannt. Im zweiten Vorgang wurde das *Basement* Element gescannt. Hier wurde die Grenzschicht des *Basement Elementes* zum *Baden-Karpat* Element gescannt (die äußere Begrenzung liegt durch Scan 1 vor). In einem dritten und letzten Scanvorgang wurde das *Baden-Karpat* Element vollständig aufgenommen.

---

<sup>19</sup> Deviation – Abweichung (duden.de)

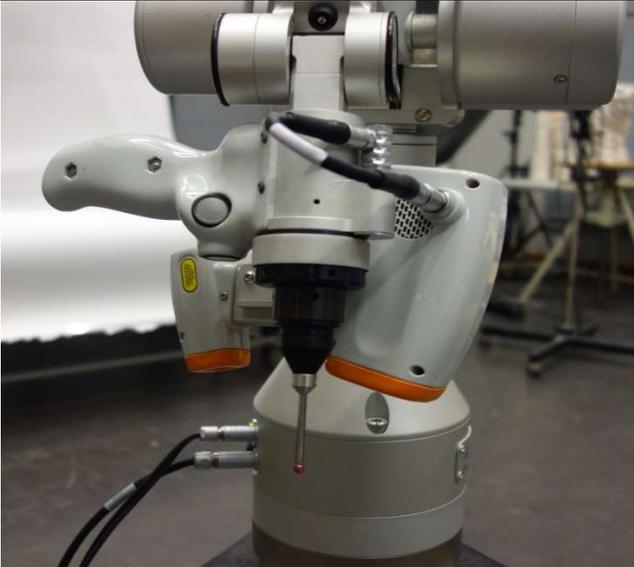
Technische Daten MMD50	MMD50	
Streifenbreite [Y] (mm)	50	
Start Messbereich (mm)	100	
Messbereich [Z] (mm)	50	
Genauigkeit [2σ] (μm)	16	
Max. Datenrate (echte Pkt./Sek.)	81.920	
Punkte je Streifen	1.024	
Höchstgeschw. (Streifen/Sek.)	80	
Temperaturkompensation	Ja	
Sensorgewicht (g)	395	
Lasertyp	Klasse M	

Tabelle 14: Technische Daten des Laserscanners MMD50 (Model Maker D50) Quelle-Bild: Hofer Florian

	Scan 1 (Komplett)	Scan 2 (Basement)	Scan 3 (Baden-Karpat)
Punkte (unbereinigt)	17.142.248	5.901.595	5.224.667
Dateigröße (mb)	~408	~140	~124

Tabelle 15: Größe der Punktwolken und Dateigröße der Scans des geologischen Modells

Gleich zu Beginn des Scanvorgangs wurde festgestellt, dass aufgrund der Materialeigenschaften des Modells das Scannen nicht möglich war. Das Reflexionsvermögen des Materials war zu gering, um eine genaue Messung gewährleisten zu können. Der vom Laser ausgesendete Impuls drang in das Material ein und wurde so erst unter der Oberfläche reflektiert, was zu einem falschen Messergebnis führte.



Abb. 61: Modell mit Cyclododecan - Beschichtung. Quelle-Bild: Hofer Florian

Um das Reflexionsvermögen der Oberfläche zu erhöhen und somit ein Eindringen des Laserstrahls in das Objekt zu verhindern, wurde das gesamte Objekt mit *Cyclododecan*<sup>20</sup> beschichtet.

Die weißliche Beschichtung des Bindemittels *Cyclododecan* (Abb. 61) erhöht das Reflexionsvermögen der Oberfläche und führt somit zu exakteren Messergebnissen.

Beim Scanvorgang wurden die Elemente auf einem Sockel (Abb. 62) platziert, um so sicherzustellen, dass das Modell vollständig digitalisiert werden kann. Dieser Umstand führt zu Artefakten (Abb. 63) in der Punktwolke, die vor einer weiteren Analyse bereinigt werden müssen.

<sup>20</sup> Cyclododecan – flüchtiges Bindemittel, welches bei Raumtemperatur in angemessener Zeit verdunstet. (<http://www.deffner-johann.de/cyclododecan-spraydose-400-ml.html> - Stand 07.04.207)

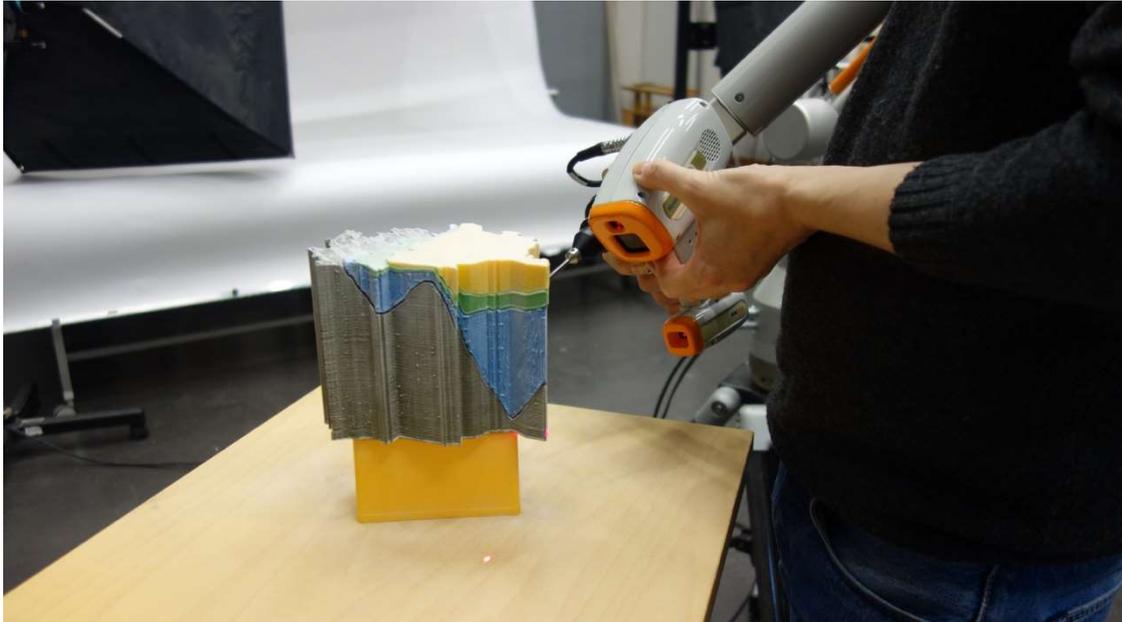


Abb. 62: Abtasten des geologischen Schichtmodells mittels handgeführtem Laserscanner Model Maker MMD50.  
Quelle-Bild: Hofer Florian

Der eigentliche Scanner und der Gelenkmessarm bilden eine Einheit. Der 7-Achsige Gelenkmessarm hat die Aufgabe, die relative Position der Scaneinheit im Raum zu eruieren und aufzuzeichnen. Anders als bei terrestrischen Verfahren, bei denen die Scanner von bekannten Positionen aus scannen und während des Vorganges nicht bewegt werden, ist in diesem Fall die Scaneinheit beweglich und das zu scannende Objekt statisch. Somit bedarf es der relativen Positionsbestimmung durch den Gelenkmessarm, um die Punktwolke generieren zu können.

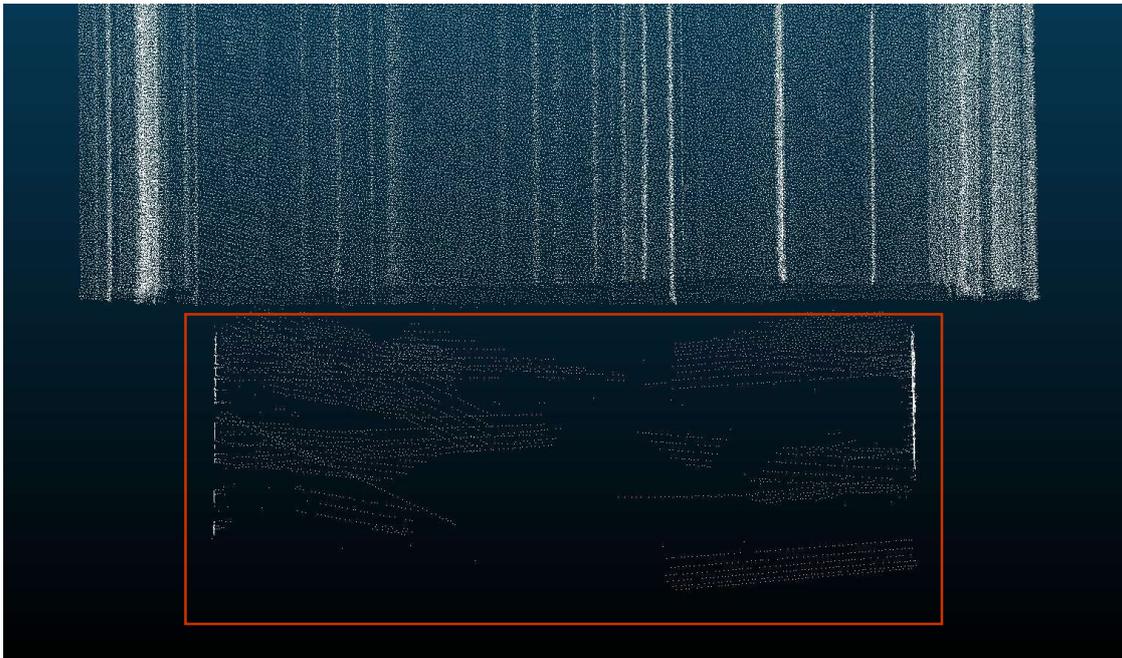
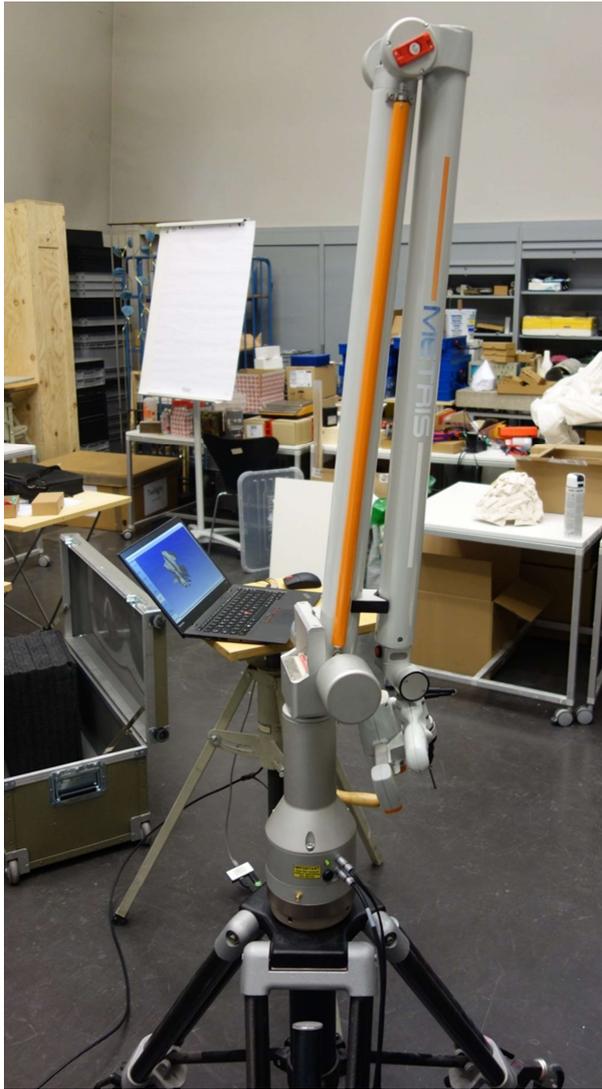


Abb. 63: Artefakte nach dem Scanvorgang des vollständigen Objektes (vgl. Abb. 62) Quelle-Bild: Screenshot CloudCompare



Die von der Software des Scanners (Focus Handheld 3.3) aufgenommenen Daten im Format **.SAB2** wurden anschließend als **.ASC** Datei exportiert. Das für die weitere Analyse verwendete Programm CloudCompare ist nicht in der Lage, das Format **.SAB2** zu öffnen.

*Abb. 64: gesamte Scaneinheit – handgeführter Laserscanner inkl. Gelenkmessarm und Stativ und Laptop für die Datenaufnahme. Quelle-Bild: Hofer Florian*

### 7.3.2 Ziel der Analyse

Aus der Fragestellung heraus ergeben sich die Ziele der Analyse, die vor dieser definiert wurden. Sie stellt sich wie folgt dar:

- Überprüfung der geometrischen Genauigkeit des gedruckten geologischen Modells
- Dokumentation und Vermessung der in Kapitel 7.2 durch die visuelle Analyse gefundenen Fehlstellen und geometrischen Eigenheiten (Kapitel 7.2 Abb. 53 54 sowie Abb. 55)
- Überprüfung der Oberfläche, im Speziellen der Schichtdicke und der Treppenstufeneffekten.

Als Referenzmodell der Analyse werden (dem Bauteil entsprechend) die **.STL** Dateien herangezogen. Diese fungieren als Grundlage, an die die Punktwolke des Scans mittels statistischen Verfahren (Programmfunktion) angenähert werden. In einer anschließenden Analyse werden die Abstände der Punktwolke zum Ursprungsmodell gemessen und visualisiert.

In der folgenden Dokumentation wird anhand eines Beispiels die Vorgangsweise bei der Analyse im Programm *CloudCompare* demonstriert. Anhand von Abbildungen<sup>21</sup> und textlichen Erweiterungen werden alle notwendigen Schritte (die für alle 3 Analysen ident sind) erläutert.

### 7.3.3 Deviationsanalyse mittels CloudCompare (Dokumentation)

In Kapitel 8 widmen wir uns vollständig der Analyse der Ergebnisse aus der Deviationsanalyse. Zuvor jedoch werden die Schritte der Analyse als eine Art Dokumentation besprochen. Das verwendete Programm nennt sich (wie bereits erwähnt) *CloudCompare* und ist eine *3D point cloud and mesh processing software*. Das Open Source Programm ist für die Plattformen Windows, MacOS und Linux verfügbar und kann unter <http://www.danielgm.net/cc/> geladen werden.

“*CloudCompare* is a 3D point cloud (and triangular mesh) processing software. It has been originally designed to perform comparison between two dense 3D points clouds or between a point cloud and a triangular mesh.”  
(<http://www.danielgm.net/cc/>)

Andere Programme (wie „Geomagic“ der Firma 3D Systems) wären auch dazu in der Lage, diese Analysen durchzuführen. Das Programm *CloudCompare* eignet sich aber in vollem Umfang für die Art der gewählten Analyse. Wie auch schon im Textfeld oben beschrieben wird, ist *CloudCompare* auf Abweichungsmessungen zwischen mehreren Punktwolken und oder Mesh-Objekten spezialisiert.

---

<sup>21</sup> Bei den Abbildungen der Dokumentation handelt es sich größtenteils um eine verkleinerte Punktwolke (500.000 Pkt. anstatt >17.000.000 Pkt.), um die Darstellungsqualität zu erhöhen.

### Schritt 1 u. 2 [Load]

Laden der Analysedateien in das CloudCompare

File > Open [gilt für beide Dateiformate]

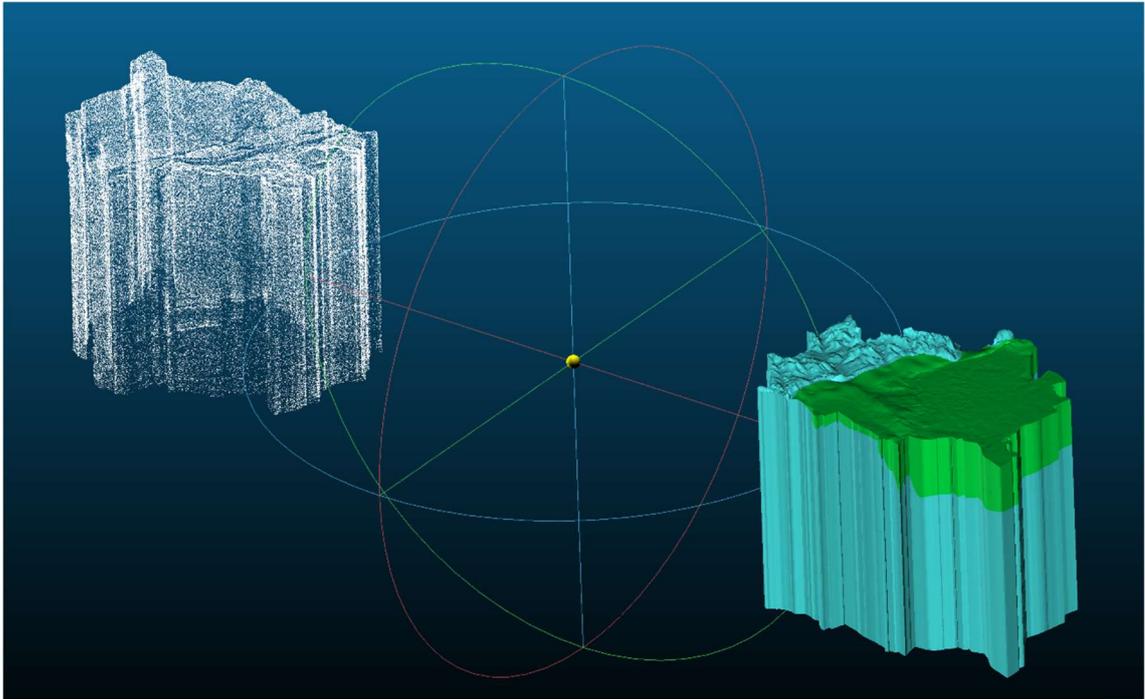


Abb. 65: Beide Modelle, geladen in der Arbeitsumgebung von CloudCompare  
Quelle: Screenshot

### Schritt 3 [Alignment]

Tools > Registration > Match bounding-box center

Grobe Ausrichtung der 2 Objekte. Die Schwerpunkte der beiden Objekte werden zusammengeführt.

### Schritt 4 [Manual Transformation]

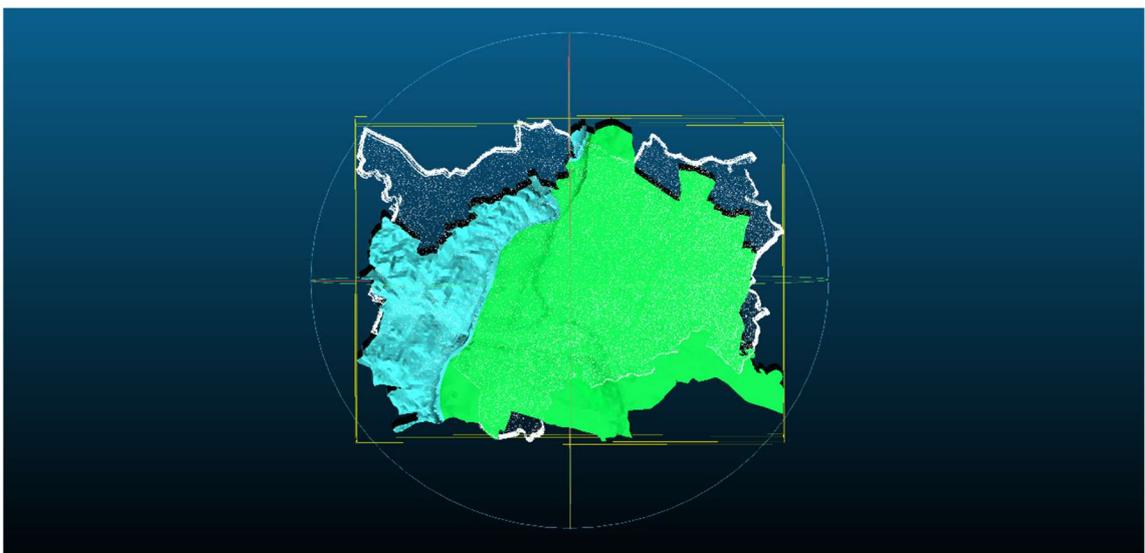
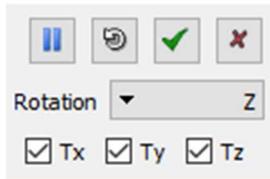


Abb. 66: Überlagerung der bounding-boxen (gelb) Punktdatensatz (weiß) und STL-Datensatz (grün-türkis) jedoch noch nicht endgültig ausgerichtet. Quelle: Screenshot

Edit > Translate/rotate oder auf der Main Toolbar das Icon



Bei der manuellen Transformation erscheint das Menü Fenster links auf der Arbeitsfläche. Unter dem Drop-Down Menü „Rotation“ können Achsen für die Rotation gesperrt od. ausgewählt werden. In diesem Fall ist nur eine Drehung über die Z-Achse möglich. Auch Achsen für die Transformation können gesperrt oder freigegeben werden. In diesem Fall sind die Achsen XYZ freigegeben.

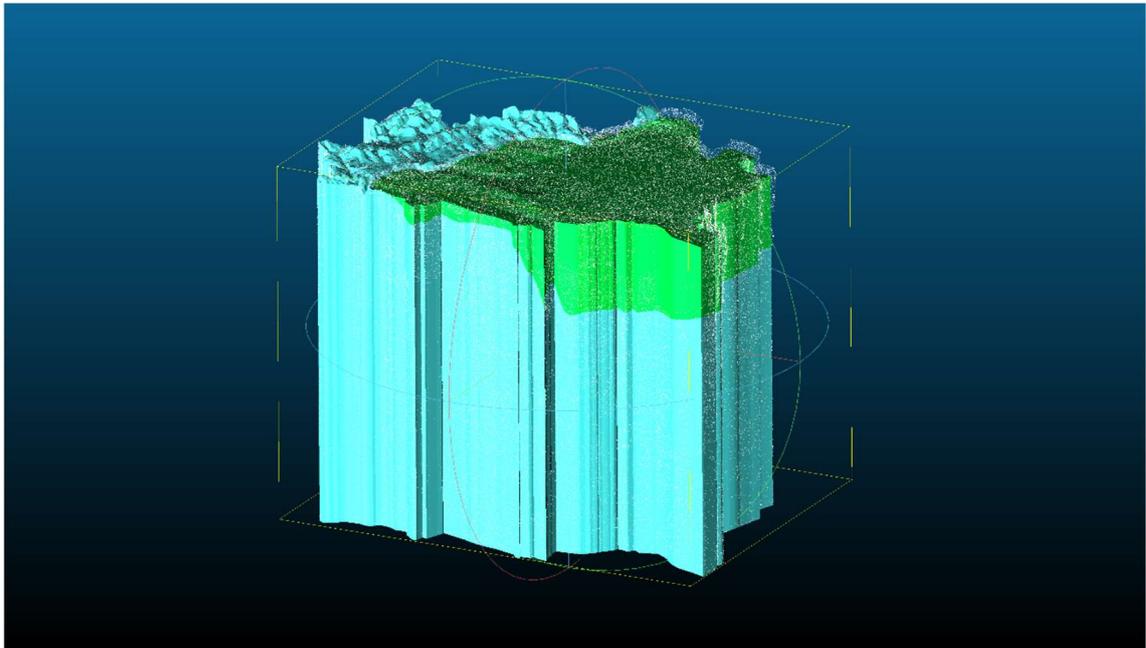


Abb. 67: Die beiden Objekte durch eine manuelle Rotation und Transformation aneinander ausgerichtet. *Quelle: Screenshot*

### Schritt 5 [Fine Registration with Iterative Closest Point algorithm (ICP)]



#### Alignment in CloudCompare

Es gibt mehrere unterschiedliche Möglichkeiten, Objekte für eine anschließende Analyse zueinander zu orientieren.

#### Tools > Fine registration (ICP)

In einem letzten Schritt vor der eigentlichen Analyse führt eine exakte Registrierung dazu, die beiden Objekte exakt aneinander auszurichten.

Bei der ICP Registrierung werden in einen iterativen Prozess, also einem Vorgang, der sich fortlaufend wiederholt, der jeweils am nächsten gelegene Punkt (closest Point) des zu referenzierenden Objektes bestimmt. Dies geschieht iterativ bis zum kleinstmöglichen Wert des Quadratischen Mittels (RMS). (vgl. RUSINKIEWICZ 2001: 145)

Bis auf die Einstellung `Enable farthest points removal` (Registerkarte RESEARCH) wurden die Standardeinstellungen verwendet.

Den beiden Objekten müssen noch Rollen zugewiesen werden. Jene Daten, die die Grundlage für die Deviationsmessung bilden, stellen das „reference“ Objekt dar, die zu referenzierenden Einheiten die „aligned“ Objekte.

Nach der Berechnung werden im Fenster „Register Info“ alle wichtigen Parameter der Transformation visualisiert.

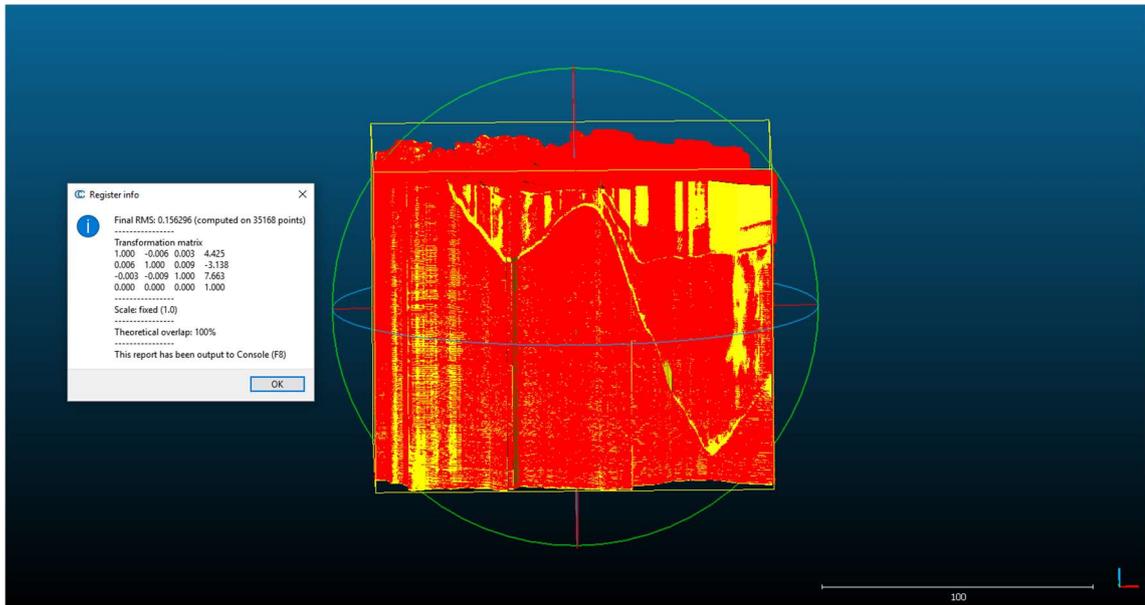


Abb. 68: Ergebnis der ICP Registrierung und Transformation. Die Farbgebung im Modell spiegelt die Zuordnung von align -, und reference Modell wieder (Abb. 68). Quelle: Screenshot

## Schritt 5 [Compute Cloud to mesh distance (C2M)]

Tools > Distances > Cloud/Mesh Dist.

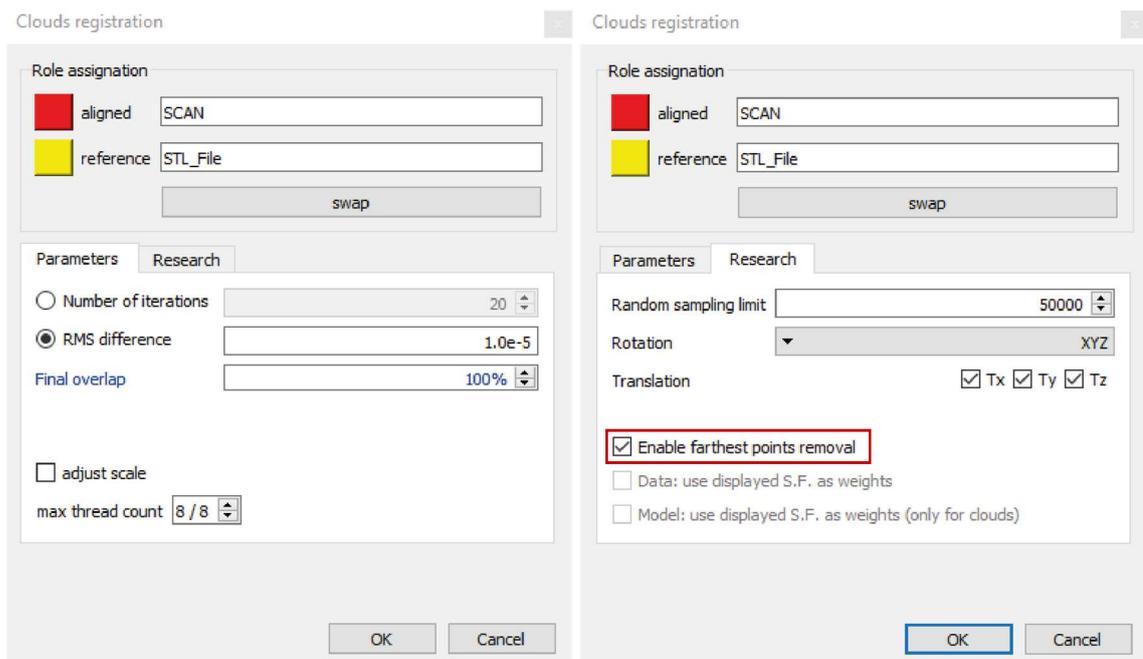


Abb. 69: Menüfenster der ICP Registrierung. Quelle: Screenshot

Für Deviationsmessungen in *CloudCompare* stehen zwei Methoden zur Verfügung C2C (Cloud to Cloud Distance) und C2M (Cloud to Mesh Distance). In diesem Fall kommt die C2M Distanz Berechnung zum Einsatz. Bei der C2M Methode wird das Mesh Objekt automatisch als Referenz Objekt gesetzt. Für die Analyse werden die Default Einstellungen übernommen.

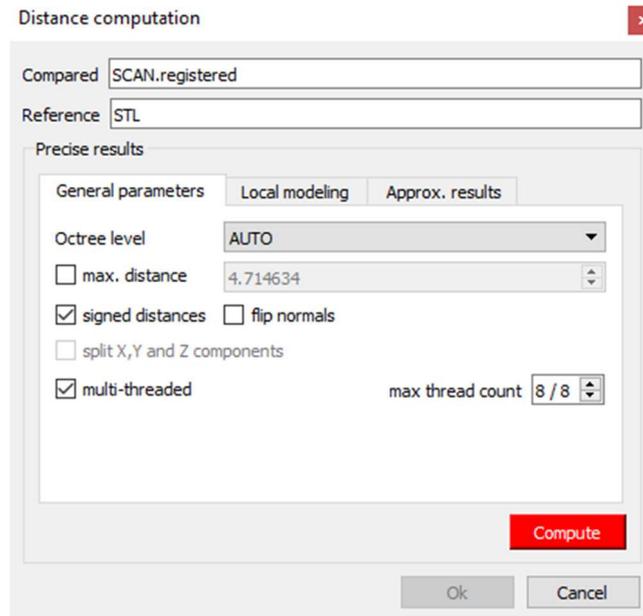


Abb. 70: Menüfenster Distance Computation Quelle: Screenshot

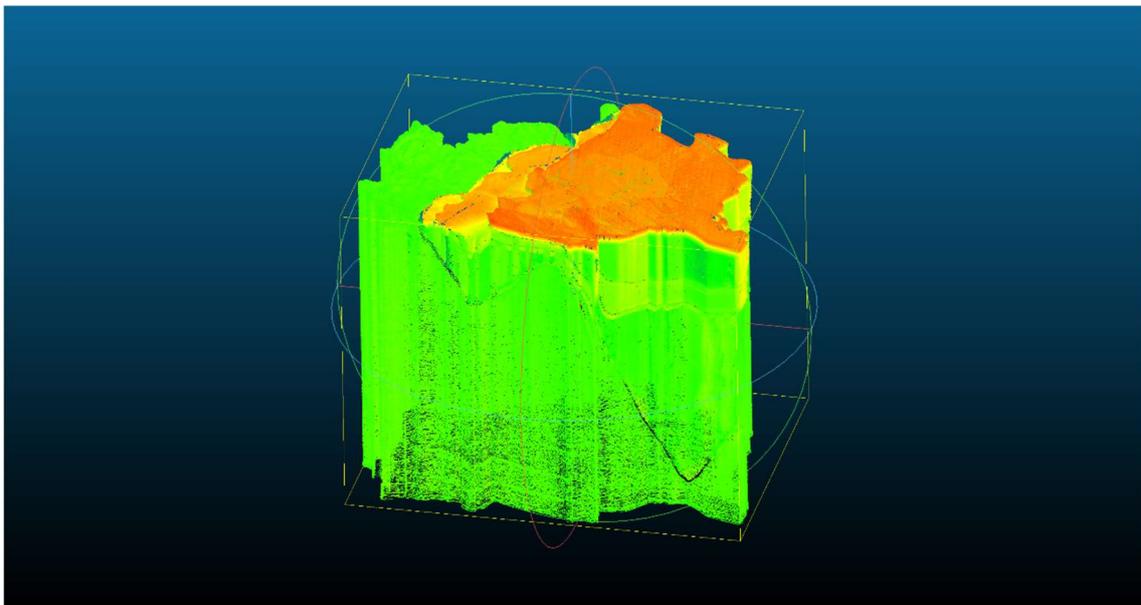


Abb. 71: Ergebnis der Distance Computation ohne Anpassung der Scalar Fields. Quelle: Screenshot

## Schritt 6 [Set Properties und Scalar Fields der Distance Computation]

Die programmseitigen Visualisierungseinstellungen der Displayparameter müssen in einem letzten Schritt bearbeitet werden. Dazu werden im „Properties View“ Fenster einige Default Einstellungen verändert.



Abb. 72: Properties Menüfenster. Color Scale und SF display parameter. Quelle: Screenshot

- 1) Einstellung der Wertebereiche der Scalar Fields für eine bessere Analyse (256 auf < 25).
- 2) Visualisierung der Color Scale im 3D Viewer.
- 3) Einstellen der Color Scale Parameter.
  - Einstellen des Wertebereiches (min. - max. displayed scalar values) mittels den weißen Ringen in der graphischen Anzeige od. durch eine numerische Angabe der min. u. max. Werte (displayed).
  - Einstellen Farbsättigung der Scalar Values mittels dem blauen (min.) od. roten (max.) Dreieck od. durch eine numerische Angabe der min. u. max. Werte (saturation).

Parameter Einstellung der Color Scale im 3D Viewer. Anzeigen des 0 Werte auf der Scala

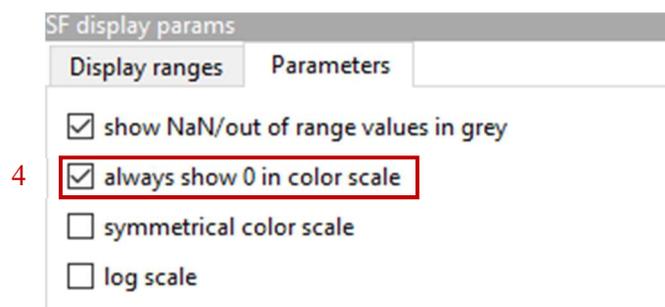


Abb. 73: Propertiesmenü Scalar Field Parameter. Quelle: Screenshot

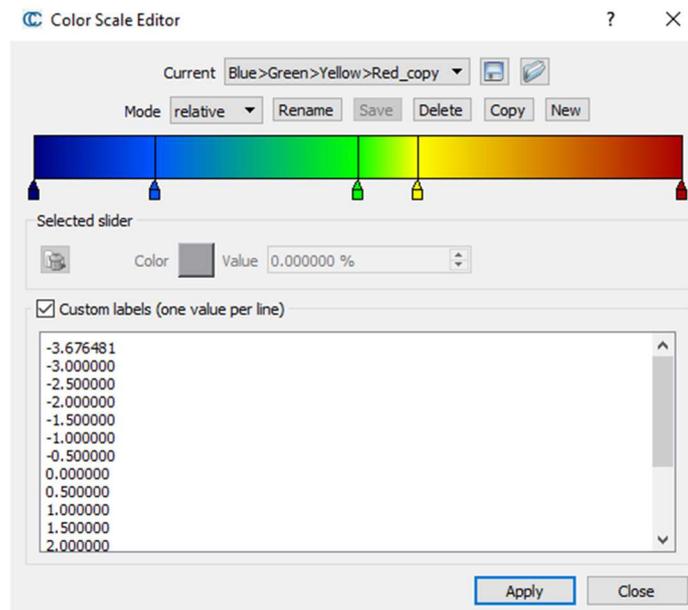


Abb. 74: Einstellungen im Color Scale Editor. Quelle: Screenshot

- 4) Einstellung der Farbskala und der Skalenbeschriftung im Color Scale Editor. Abstimmung der Anzahl der Klassen mit der Farbskala inkl. BenutzerInnendefinierter Skalenbeschriftung.

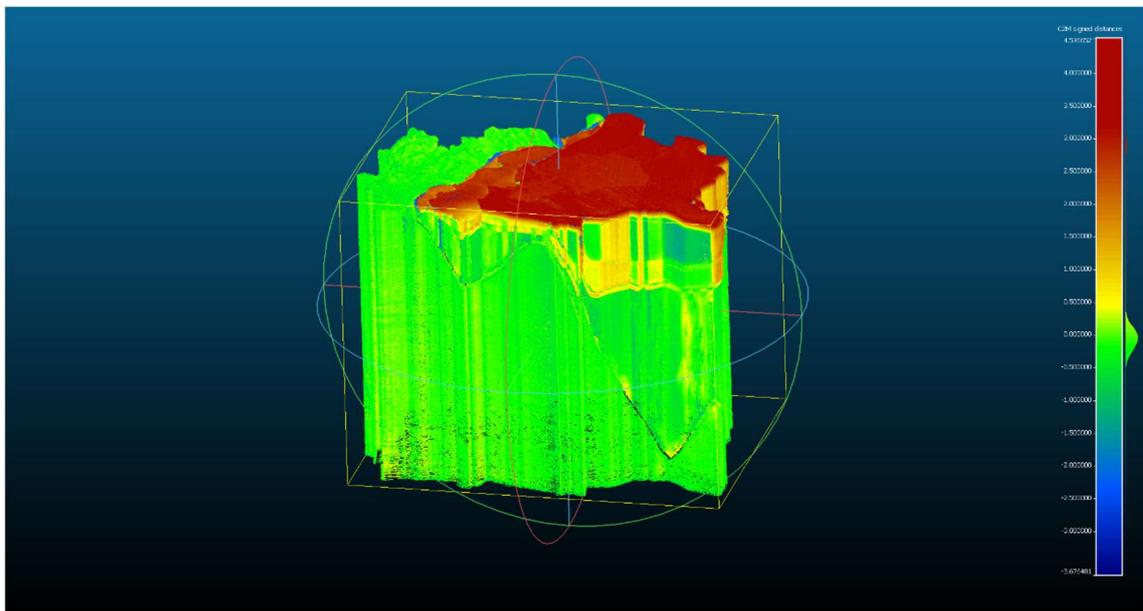


Abb. 75: Endergebnis der Deviationsanalyse in mm des kompletten geologischen Schichtmodells, Quelle: Screenshot

**Die Vorgangsweise ist bei allen Deviationsanalysen ident.** Die Wertebereiche und Einstellungen sind von Modell zu Modell unterschiedlich. Somit sind die Angaben und Visualisierungen der Dokumentation nur als Beispiel zu sehen.

## 8. Ergebnisse

Im letzten Kapitel, bevor wir zum Abschluss der Arbeit inklusive detaillierter Diskussion aller Ergebnisse der Arbeit kommen, wird der Output der CloudCompare Ergebnisse im Detail analysiert. Die Analyse erfolgt unter den in Kapitel 7.3.2 erwähnten Gesichtspunkten und fokussiert sich daher vorwiegend auf die geometrische Genauigkeit des geologischen Schichtmodells – geometrische Genauigkeit in der Hinsicht, in wie weit das Ursprungsmodell und das digitalisierte Untersuchungsobjekt in ihrer Geometrie übereinstimmen oder voneinander abweichen.

Beginnend mit dem vollständigen geologischen Schichtmodell und dessen Deviationsanalyse werden in weiterer Folge die Ergebnisse der zwei Detailaufnahmen, des Basement- und des Baden-Karpat Elementes, diskutiert.

Die numerischen Angaben der Analyse sind gleich den numerischen Einheiten des Ursprungsobjektes. Die Werte der Skala sind als Millimeter-Einheiten zu interpretieren. CloudCompare ist in dieser Hinsicht dimensionslos und übernimmt die Einheiten des Modells, wie sie zum Zeitpunkt des Imports vorliegen.

Vor der Untersuchung der Messdaten muss ein Bereich festgelegt werden, der als Bereich der geometrischen Exaktheit gilt. Das Auflösungsvermögen bei **FLM**-Verfahren wird durch die Schichtdicke (mm) und die Konturgenauigkeit der X- u. Y-Achse (mm) definiert. In den Angaben des Druckermodells (Tabelle 9) wird lediglich ein Wertebereich für die Schichtdicke angegeben.

Die Schichtäquidistanz des gedruckten Objektes liegt bei 0,2 mm. Auf Basis der Äquidistanz wird ein Bereich von insgesamt 0,4 mm (-0,2 - +0,2) festgelegt. Alle Stellen (Punkte) des gescannten Modells die sich in den Bereich von -0,2 - +0,2 mm befinden, werden als geometrisch exakt angenommen. Alle anderen Punkte, deren Abweichung zum Ursprungsobjekt  $> -0,2$  mm oder  $> +0,2$  mm beträgt, werden als geometrisch nicht exakt definiert. In den Abbildungen der folgenden Seiten (Abb. 76 - 81) werden die Ergebnisse graphisch dargestellt und anschließend in der weiteren textlichen Erläuterung beschrieben.

Eine weitere Analyse auf Basis von Kennzahlen (Anzahl der Punkte / Wertebereich) soll die graphische Analyse numerisch untermauern. Es wird anhand dieser Kennzahlen festgestellt, wieviel Prozent des jeweils untersuchten Bauteils außerhalb der definierten Wertebereiche liegen. Der Prozentwert der im Wertebereich von -0.2 – 0.2 mm liegenden Punkte ergibt sich aus der Differenz des Prozentwertes der abweichenden Punkte ( $=\sum P > (-)0,2 \text{ mm} + > (+)0,2 \text{ mm}$ ) zur Gesamtmenge von 100 %. Dieser wird nicht extra ausgewiesen.

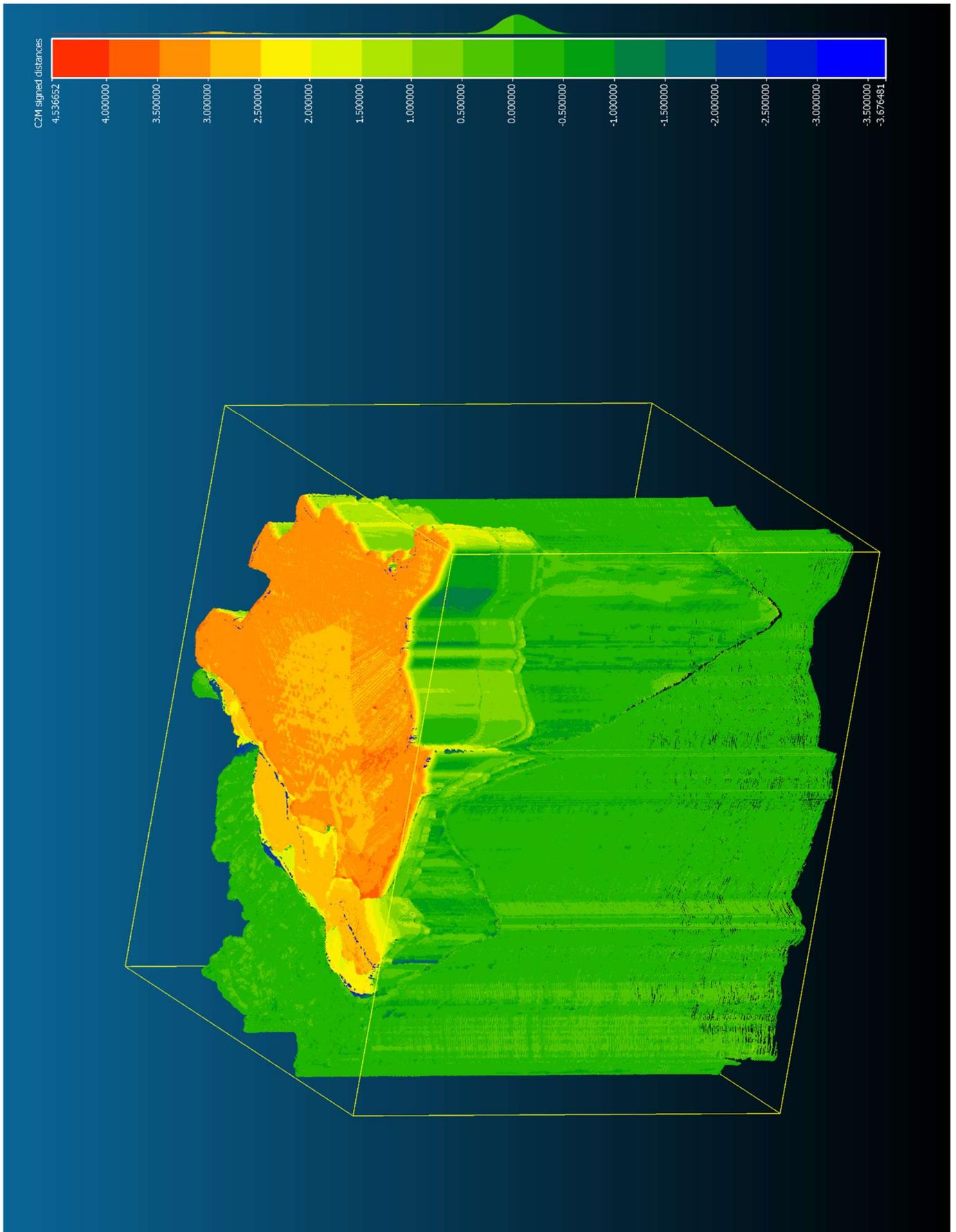


Abb. 76: Deviationsanalyse (in mm) des gesamten Schichtmodells. Quelle: Screenshot

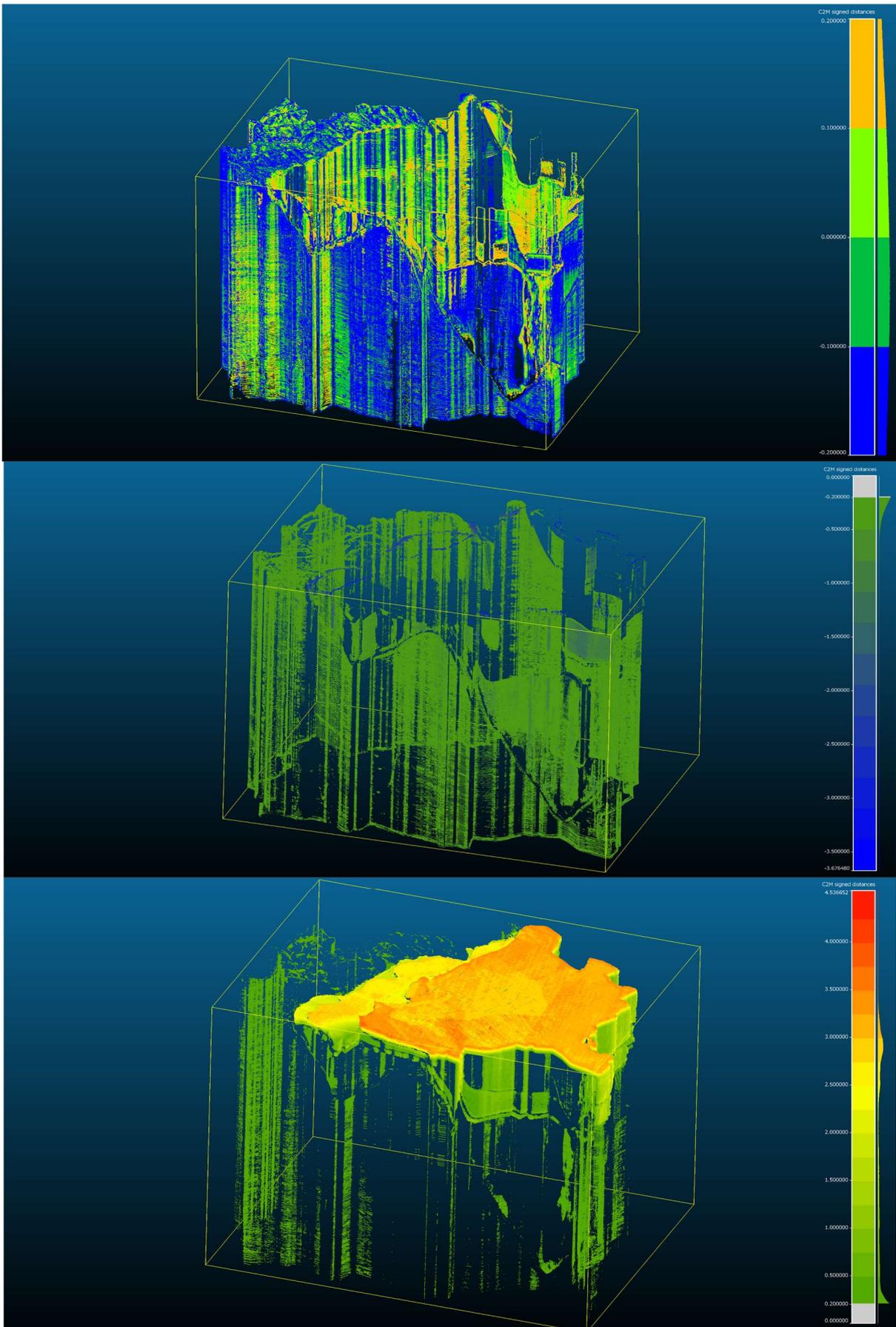


Abb. 77: Ergebnisse der Deviationsanalyse (in mm) des gesamten Schichtmodells, unterteilt in die 3 Wertebereiche [-0.2-+0.2]oben. [-0.2- -3.676482] mitte. [-4.536592-+4.000000] unten. Quelle: Screenshot

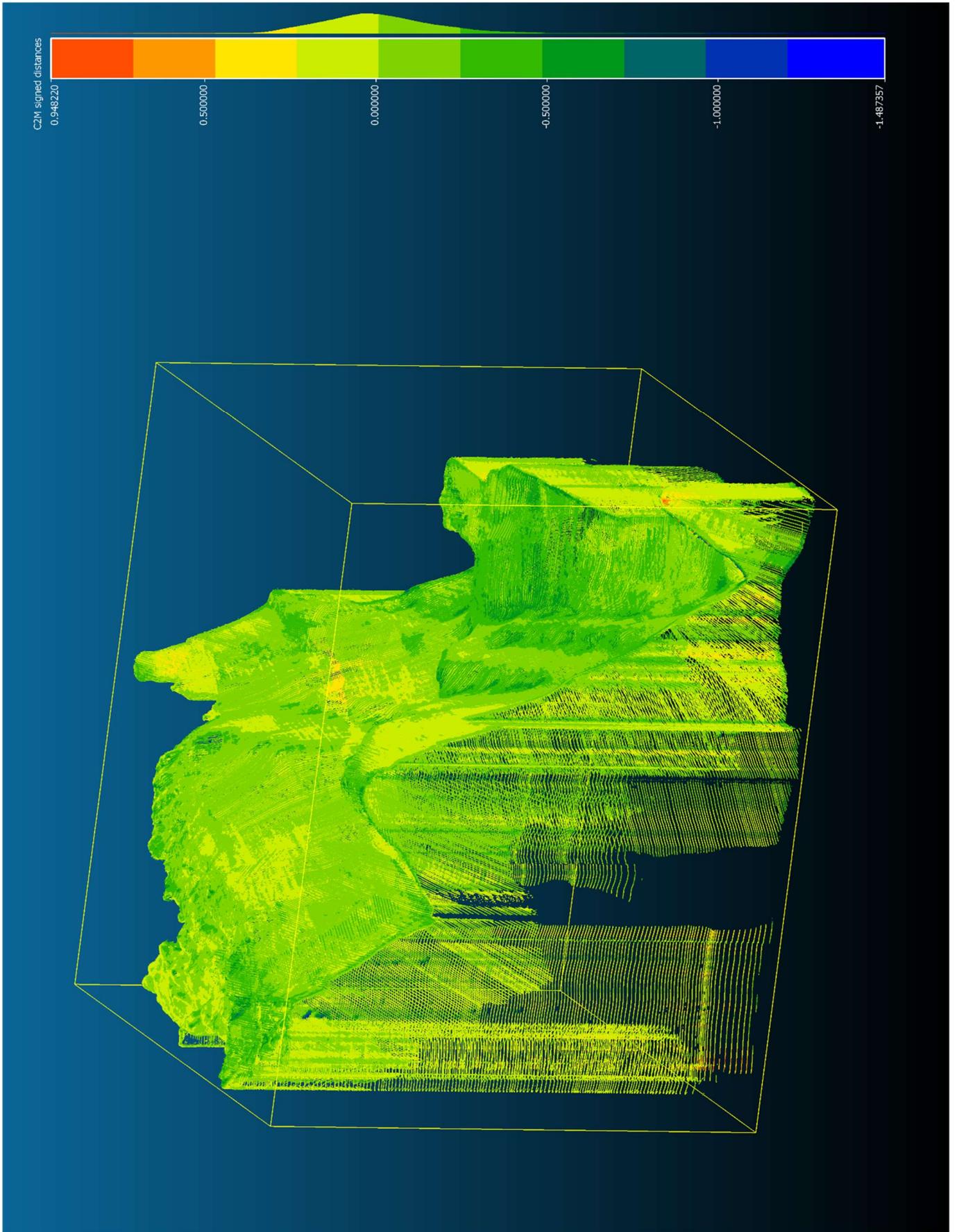


Abb. 78: Deviationsanalyse (in mm) des Basement Elementes Quelle: Screenshot

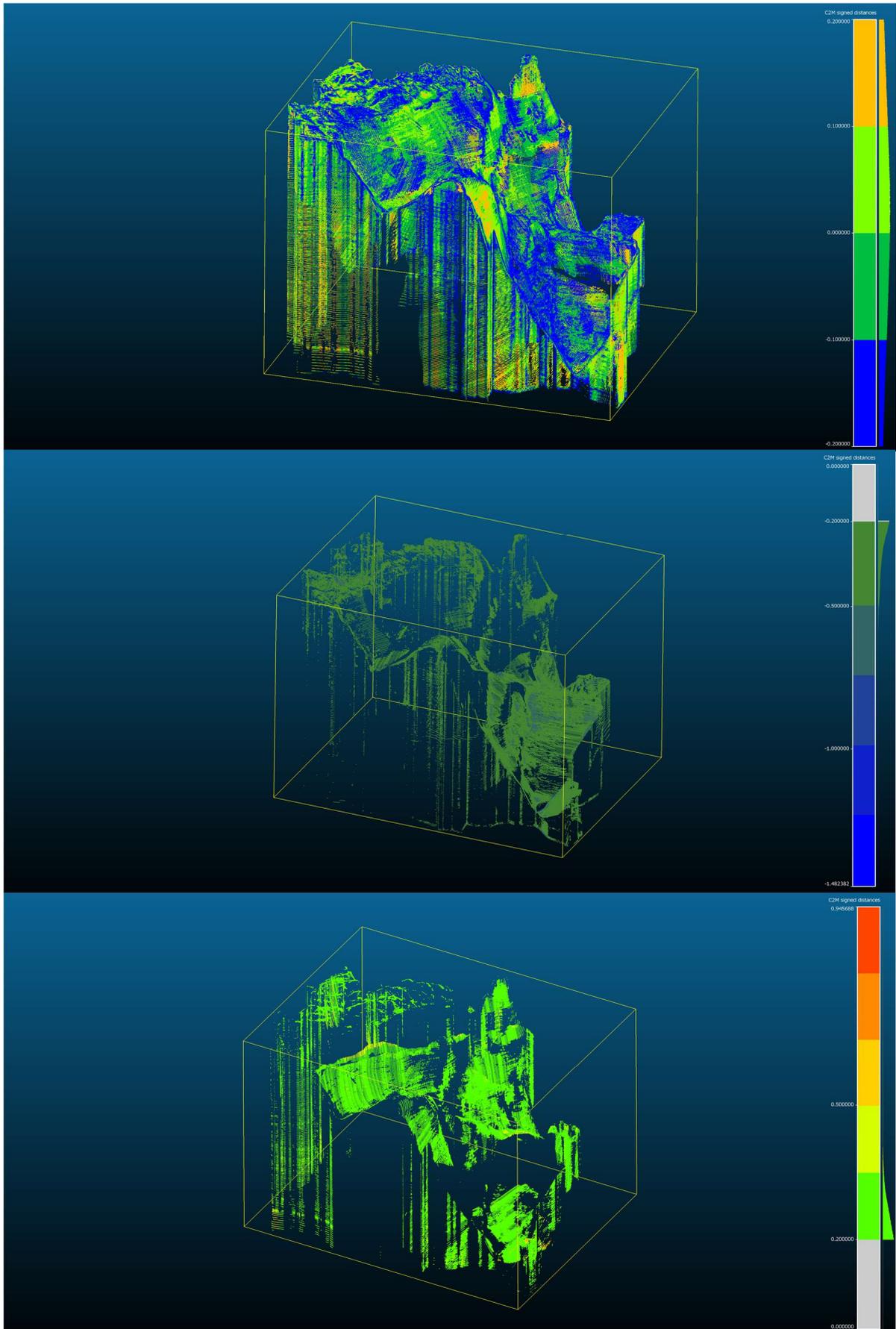


Abb. 79: Ergebnisse der Deviationsanalyse (in mm) des Basement Elementes, unterteilt in die 3 Wertebereiche [-0,2-+0,2]oben, [min. - -0,2] mitte, [+0,2-max.]unten. Quelle: Screenshot

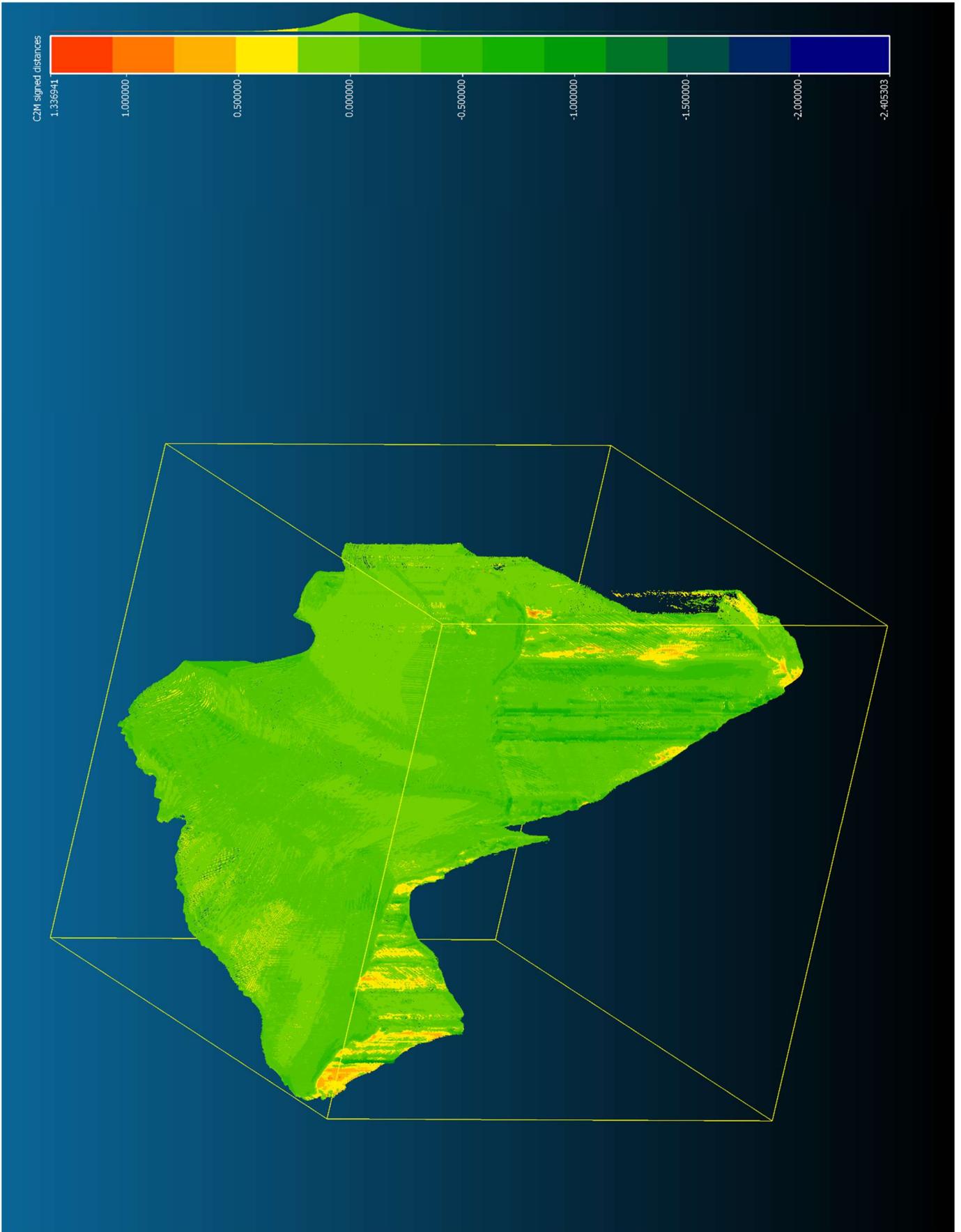


Abb: 80: Deviationsanalyse (in mm) des Baden-Karpat-Elementes Quelle: Screenshot

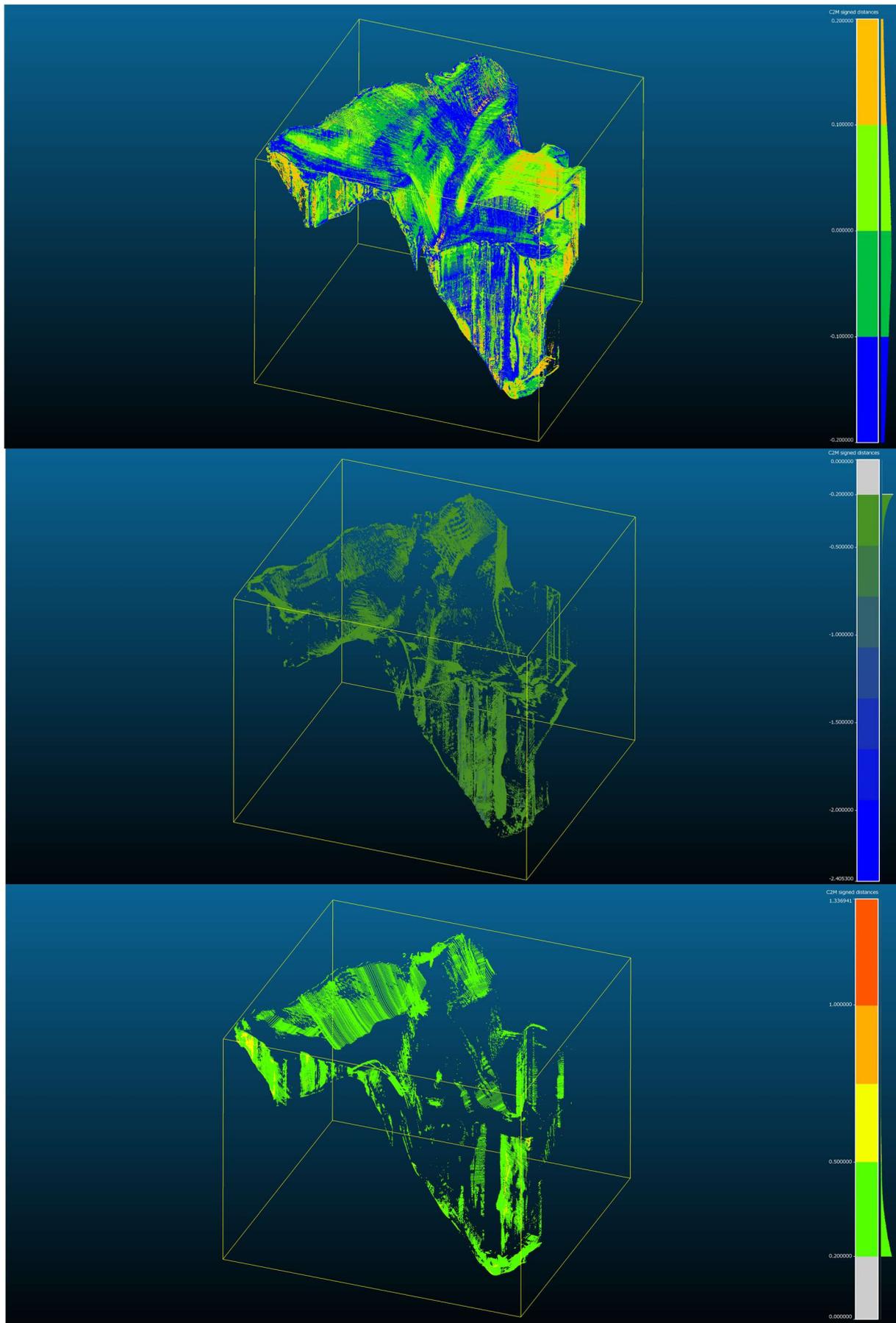


Abb. 81: Ergebnisse der Deviationsanalyse (in mm) des Baden-Karpat-Elementes, unterteilt in die 3 Wertebereiche [-0,2-+0,2]oben, [min. - -0,2] mitte, [+0,2-max.]unten. Quelle: Screenshot

Als Überleitung der graphischen Abbildungen zur textlichen Analyse sind die zuvor besprochenen Kennzahlen in Tabelle 16 abgebildet. Aufgelistet ist jeweils die Gesamtanzahl der Punkte/Punktwolke pro Element und die Anzahl jener Punkte in den Wertebereichen von [-0.2 - +0.2] / [min. - -0.2] / [+0.2 - max.] sowie die Summe der Punkte aus den Wertebereichen [min. - -0.2] und [+0.2 - max.]. Diese Summen wurden anschließend als Prozentwert in der Spalte [Abweichung Gesamt %] ausgegeben. Auch die Wertebereiche [min. - -0.2] und [+0.2 - max.] wurden zusätzlich noch als Prozentwerte ausgegeben. Ergänzend zu den Angaben der Punktwolken ist auch für jede Schicht die Spanne der Abweichung der Punkte zum jeweiligen Referenzobjekt in mm angegeben [Abweichung Gesamt (mm)]. Bei den Elementen mit dem Kürzel SOR (Statistical Outlier Filter) wurden die Punktwolken von Ausreißern bereinigt.

Punkte / Wertebereich pro Element	Abweichung Gesamt (mm)	Punkte Gesamt	-0.2 - +0.2	min - -0.2	+0.2 - max	Abweichung Gesamt	Abweichung Gesamt %
Objekt gesamt	-3,68 – +4,54	<b>17.040.294</b>	9.277.064	3.138.288 (18,42 %)	4.624.943 (27,14 %)	7.763.231	<b>45,56 %</b>
Basement	-1,48 – +0,94	<b>5.878.577</b>	4.568.314	758.048 (12,90 %)	552.195 (9,39 %)	1.310.243	<b>22,29 %</b>
Baden-Karpat	-2,41 – +1,34	<b>5.133.814</b>	4.181.504	524.880 (10,22 %)	427.430 (8,33 %)	952.310	<b>18,55 %</b>
Objekt gesamt (SOR)	-3,59 - +4,25	<b>15.231.615</b>	8.408.512	2.683.031 (17,61 %)	4.140.073 (27,18 %)	6.823.104	<b>44,80 %</b>
Basement (SOR)	-1,30 - +0,92	<b>5.221.434</b>	4.099.697	641.082 (12,28 %)	480.655 (9,21 %)	1.151.737	<b>22,06 %</b>
Baden-Karpat (SOR)	-1,21 - +1,10	<b>4.603.512</b>	3.832.680	421.206 (9,15 %)	349.626 (7,59 %)	770.832	<b>16,74 %</b>

Tabelle 16: Kennzahlen der Punktwolken aller Elemente unbereinigt und bereinigt (SOR)

Zwischen den Darstellungen des gesamten Objektes (Abb. 76) und der beiden Elemente „Basement“ und „Baden-Karpat“ (Abb. 78 u. 80) fallen jene Punkte des gesamten Objektes auf, die sich am Ende des Wertebereiches der positiven Skala (Rot) befinden. Punkte mit einer so enormen Abweichung (bis zu +4,54 mm) sind bei den beiden anderen Objekten (Basement u. Baden-Karpat) nicht zu finden. Dies wird auch ersichtlich, wenn man die Gesamtabweichung der Elemente in Tabelle 16 zwischen den einzelnen Elementen vergleicht. Die Differenz der positiven Abweichung zwischen dem *Objekt gesamt* und *Basement* beträgt 3,51mm, zwischen dem *Objekt gesamt* und *Baden-Karpat* 3,2 mm. Auch im Bereich der negativen Abweichung sind diese Unterschiede vorhanden. Die Differenzen bewegen sich hier von 2,2 mm (*Objekt gesamt* - *Basement*) bis 1,27 mm (*Objekt gesamt* – *Baden-Karpat*)

Abweichungen treten auch zwischen den beiden Elementen „Basement“ und „Baden-Karpat“ auf. Der Unterschied im Wertebereich der positiven Skale liegt bei 0,4 mm (*Basement* u. *Baden-Karpat*) im negativen Wertebereich bei 0,93 mm. Alle Elemente, gemessen an ihren maximalen Abweichungen, liegen nicht im Bereich der geometrischen Exaktheit.

Eine solch erste Analyse anhand von Absolutwerten (Anzahl der Punkte) kann einen ersten Aufschluss darüber geben, ist aber mit einer gewissen Skepsis zu betrachten. Für alle Analysen (graphisch wie nummerisch) bis auf das Löschen der Artefakte (Abb. 63) wurden die Rohdaten des Laserscans ausgewertet. Neben tatsächlichen Abweichungen am Objekt selbst können diese Extremwerte auch durch Fehler beim Scanvorgang hervorgerufen werden. Daher ist die Betrachtung der statistischen Auswertung über die Gesamtverteilung der Punkte sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen notwendig.

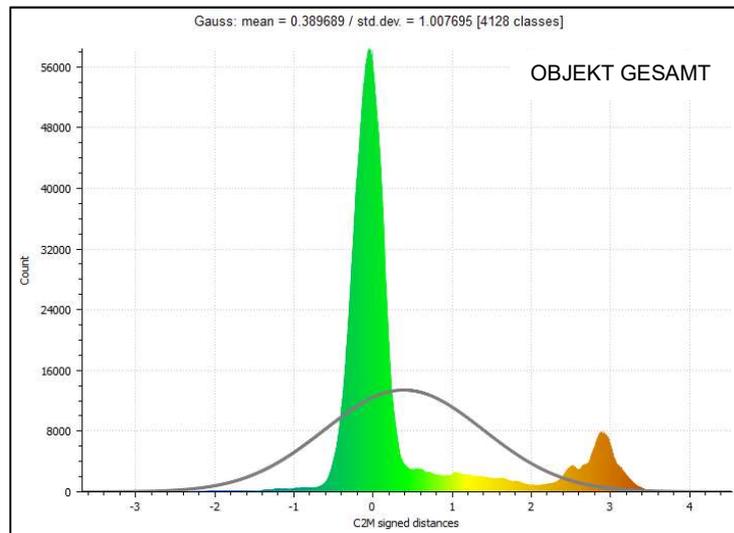


Abb. 82: Statistisches Modell des „Objektes gesamt“. Quelle:

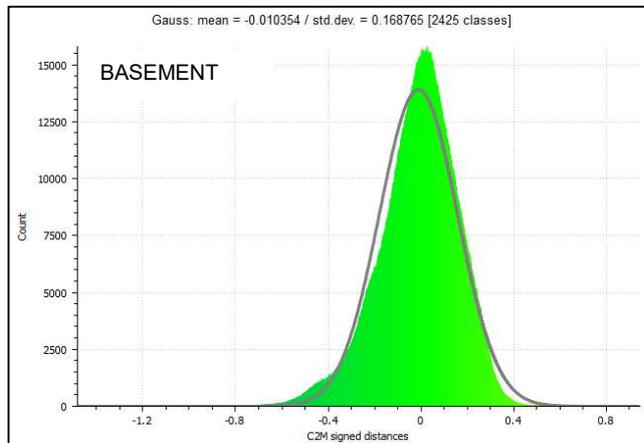


Abb. 83: Statistisches Modell des „Basement“ Objektes. Quelle: CloudCompare

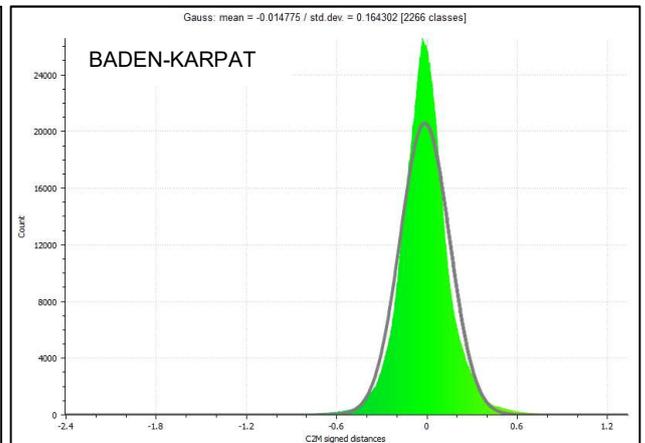


Abb. 84: Statistisches Modell des „Baden-Karpat“ Objektes. Quelle: CloudCompare

Statistische Modelle der Analyse	Standardabweichung	Mittelwert
	std. dev.	mean
Objekt gesamt	1,007695	0,389689
Basement	0,168765	-0,010354
Baden-Karpat	0,164302	-0,014775
Objekt gesamt (SOR)	1,005703	0,397958
Basement (SOR)	0,165770	-0,008410
Baden-Karpat (SOR)	0,158467	-0,013134

Tabelle 17: Standardabweichung und Statistisches Mittel der Deviationsanalyse der Elemente

Bei den Absolutwerten in Tabelle 16 ist der Unterschied in den Kennzahlen bevor und nach der SOR Berechnung deutlich zu erkennen. Bei den statistischen Kennzahlen jedoch sind die Abweichungen nicht mehr so stark ausgeprägt (Tab. 17). Da nicht definitiv festgestellt werden kann, ob es sich bei den Extremwerten um Messfehler oder tatsächlich gemessene Punkte handelt, sind die statistischen Modelle gegenüber den SOR-bereinigten Daten vorzuziehen.

Zieht man die Werte der Standardabweichung zur Analyse hinzu, ergibt sich ein differenzierteres Bild als bei einer alleinigen Betrachtung der Werte in Tabelle 16. Bei den beiden Elementen „*Basement*“ und „*Baden-Karpat*“ ist neben einer Normalverteilung auch eine sehr niedrige Standardabweichung zu erkennen. Für die beiden Elemente heißt dies, dass sich 68,2% aller Punkte in einem Bereich von 0,17 mm (*Basement*) bzw. 0,16 mm (*Baden-Karpat*) um den angegebenen Mittelwert befinden. Bei einem Wert für die geometrische Exaktheit von 0,2 mm sind diese Elemente somit doch relativ genau. Das bestätigt auch der Prozentwert der Gesamtabweichung von nur 22,29% der Punkte des „*Basement*“ Elementes und 18,55% der Punkte des „*Baden-Karpat*“-Elementes, die sich außerhalb des Wertebereichs der geometrischen Exaktheit befinden.

Zumindest für die zwei vermessenen Elemente kann somit behauptet werden, dass diese im Vergleich zum Referenzobjekt, nämlich den Druckdateien (Ursprungsobjekt), um relativ genau gefertigte Bauteile handelt. Man darf an dieser Stelle aber nicht vergessen, dass es sich bei der gewählten Schichtdicke von 0,2 mm beim Druck um eine sehr grobe Auflösung handelt.

Untermauern lässt sich das Ganze auch durch die graphischen Abbildungen (Abb. 79 u. 81). In der zusammengesetzten Abbildung sind im oberen Bild alle Punkte visualisiert, die im Bereich der geometrischen Exaktheit liegen, im mittleren Bild alle Punkte im negativen Wertebereich und im unteren Bild jene Punkte des positiven Wertebereichs. Die Unterschiede sind alleine durch die graphische Darstellung sehr deutlich. Die Punktwolke des Wertebereiches  $[-0.2 - +0.2]$  ist deutlich dichter als jene der beiden anderen Bereiche.

Bei der Analyse des Gesamtobjektes ergibt sich jedoch ein anderes Bild. Obwohl nicht alle Einzelteile des Objektes mittels Laserscanner vermessen wurden, so lassen die Ergebnisse der beiden Einzelobjekte den Schluss zu, dass bei gleicher Schichtdicke, gleichem Material und gleichem Drucker eine Analyse ähnliche Ergebnisse gezeigt hätte. Somit muss die Ursache, warum beim gesamten geologischen Modell ca. 44% aller Punkte außerhalb des Bereichs der geometrischen Exaktheit liegen, ein anderer sein.

Ein erster Anhaltspunkt lässt sich aus dem statistischen Modell (Abb. 82) entnehmen. Hier wird deutlich, dass die Mehrheit der abweichenden Punkte im positiven Wertebereich angesiedelt ist. Auch die Standardabweichung (1,007695) und der Mittelwert (0,389689) weichen deutlich von den Werten der anderen Bauteile ab, vor allem der positive Mittelwert.

Das Modell ist in den rot eingefärbten Bereichen (bis zu 4,54 mm) deutlich höher als das Referenzmodell. Dieser Umstand ist auch in den Kennzahlen der Tabelle 16 deutlich zu erkennen. Die Abweichungen im Bereich der positiven Skala sind auch hier deutlich in der Mehrheit. Ein erster bereits erwähnter Anhaltspunkt ergibt sich bei der genaueren Betrachtung der beiden Abbildungen Abb. 53 u. 60. Im Vergleich der Druckdatei mit dem tatsächlichen Modell sind große Lücken entlang der Schichtgrenzen erkennbar. Da die Schichtgrenzen ausschließlich horizontal verlaufen, setzten sich diese Ungenauigkeiten also nur in der Z-Richtung fort und führen dazu, dass sich die Ungenauigkeiten an der Oberseite des Modells am deutlichsten zeigen.

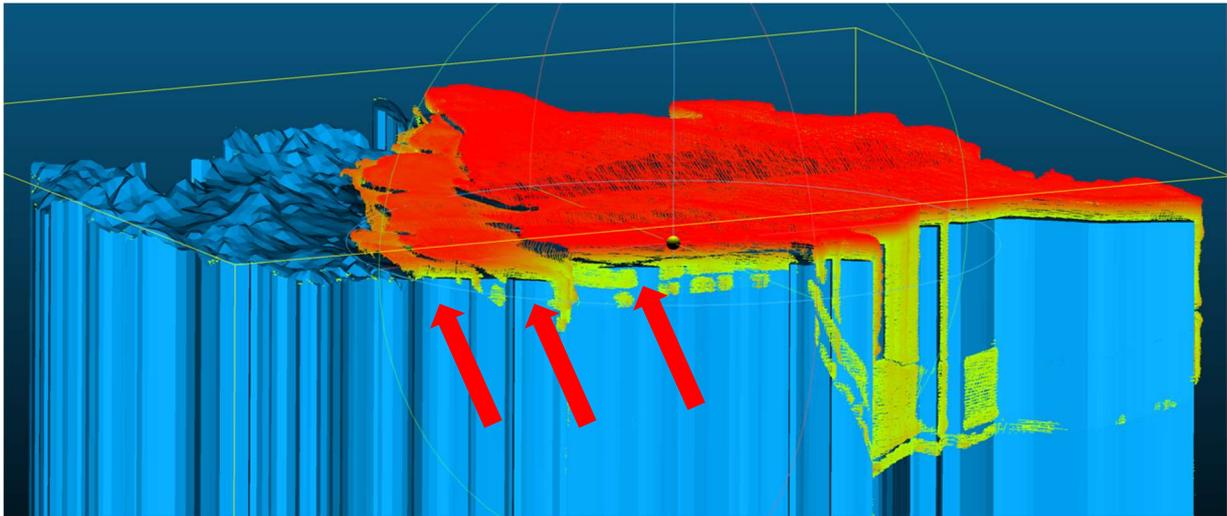


Abb. 85: Überhöhter Bereich des Gesamtmodells an der Oberfläche. Quelle: Screenshot

In Abbildung 85 sehen wir das Phänomen der Erhöhung in der Z-Achse noch einmal sehr deutlich. Die drei Pfeile in der Abbildung zeigen jeweils auf eine Schicht, die an dieser Stelle auch auf der Oberfläche des Modells zu erkennen ist. Es ist hier auch schon in der Abbildung zu erkennen, dass die Intensität der Farbgebung, die ja gleichbedeutend mit einer höheren Abweichung ist, von links der Baden-Karpat Schicht nach rechts über die Sarmant- bis zur Pannon-Einheit hin zunimmt.

## 8.1 Fazit

In der Analyse wurde deutlich, dass die einzelnen Elemente in einer Genauigkeit vorliegen, die für das eingesetzte Verfahren durchaus annehmbar ist. Gerade deshalb zählt das verwendete Verfahren bzw. die generative Fertigungsanlage doch zu einer der Kategorien und Druckverfahren, die in dem Bereich der Personal 3D-Printer angesiedelt sind (vgl. Tabelle 8). Im Hinblick auf das gesamte Modell als Geometriemodell, nämlich die Möglichkeit, die einzelnen Elemente wie in einer Art Puzzle auseinanderzunehmen, fällt das Urteil eher ernüchternder aus. Denn hier wird ersichtlich, dass es trotz der relativen Genauigkeit der Elemente zu einer Aufsummierung der geometrischen Ungenauigkeit kommt. Diese resultiert in einer in der Z-Achse liegenden sehr hohen Ungenauigkeit. Der Bereich der

geometrischen Exaktheit wurde in einem Bereich von  $-0,2 - +0,2$  mm definiert. Die Abweichungen in der Z-Achse liegen aber im Bereich um  $+4$  mm.

Was die Fehlerstellen, die im Kapitel 7.2 angesprochen und in den Abbildungen 53, 54 u. 55 dokumentiert wurden, betrifft, so musste festgestellt werden, dass einige der besonderen geometrischen Merkmale in der Deviationsanalyse erkennbar sind. Auf die Lücken, die in Abbildung 53 zu sehen sind und auf deren Auswirkung auf die geometrische Genauigkeit des gesamten Objektes wurde bereits eingegangen. Die in Abbildung 54 angesprochene und foto-dokumentierte Ungenauigkeit in der X- u. Y-Ebene wird in der mittleren Abbildung in Abb.77 sichtbar. Hier ist zu sehen, dass über große Bereiche die Kontourgenauigkeit nicht im Bereich von  $-0,2 - +0,2$  liegt.

Die in Abbildung 55 gezeigten Treppenstufeneffekte sind in den Analysen nicht mehr sichtbar. Die Auswirkungen des Treppenstufeneffektes liegen hier unterhalb des für den Laserscanner messbaren Bereiches.

Bezüglich der Oberfläche muss gesagt werden, dass der Treppenstufeneffekt bei allen Bauteilen in den Vermessungen nicht in der erwarteten Form zum Vorschein kommt. Es können somit auch keine Aussagen darüber getroffen werden, ob sich eine andere Orientierung im Bauraum, bei der Produktion selbst, auf die Oberflächenqualität auswirkt. Zumindest kann dies nicht durch die Vermessung belegt oder widerlegt werden.

Im Abbildung 56, 57 u. 58 ist aber zu erkennen, dass die Oberfläche hier im Vergleich zur Abbildung 59 deutlich feiner strukturiert ist. Wirklich lässt sich dies aber nur am tatsächlichen Modell feststellen bzw. erfühlen.

Aufgrund der doch sehr starken Abweichung als Gesamtmodell in Bezug auf die Geometrie kann gesagt werden, dass die Abweichungen, vor allem die des zusammengesetzten Modells, außerhalb des Bereichs liegen, der als Bereich der geometrischen Exaktheit definiert wurde. Was das Modell als Konzeptmodell betrifft, so erfüllt das Modell die Anforderungen, wie sie im Kapitel 6 definiert wurden, zur Gänze. Auch die Erweiterung des Modells um eine funktionale Komponente, die des Zerlegens bzw. Zusammenbauens, erweitert die Fähigkeiten des Modells im Hinblick auf eine intendierte Kommunikation von geologischen relevanten Sachverhalten sehr.

## 9. Diskussion

Als Basis für eine abschließende Diskussion bezieht sich die Arbeit auf die in Kapitel 1.3 entworfene Fragestellung. Anhand aller theoretischen und praktischen Analysen der Arbeit sollte dieses Kapitel nun in der Lage sein, die Antworten auf die eingangs gestellten Fragen geben zu können. Unterfragen, welche in einzelnen Kapiteln zum Vorschein gekommen sind, wurden bereits in den Kapiteln selbst bzw. in darauffolgenden Abschnitten beantwortet. Ziel dieser Analyse ist es, einen kompakten und zielgerichteten Überblick über die Forschungsergebnisse dieser Arbeit zu geben.

### **Welche Druckverfahren gibt es, welche Eigenschaften besitzen sie und welche sind für geowissenschaftliche Fragestellungen interessant?**

Mit der Frage nach den Druckverfahren hat sich ein ganzes Kapitel (5) beschäftigt. Die Frage sollte aber an dieser Stelle nochmal präzisiert werden. Druckverfahren an sich wurden in dieser Arbeit nicht direkt analysiert. Vielmehr lag der Fokus auf der Vorstellung der zurzeit wichtigsten Verfahrensfamilien an sich. Wie bereits in der Arbeit erwähnt, ist das Feld der generativen Fertigung sehr dynamisch. Verfahren, die derzeit den Stand der Technik repräsentieren, können morgen schon wieder obsolet sein. Die Verfahrensfamilien, also die unterschiedlichen Verfahrenskonzepte der generativen Fertigung, werden dagegen länger Bestand haben. Es ist somit nicht zielführend, in einer Arbeit, in der zwei große Bereiche miteinander verknüpft werden, bei der Frage der generativen Fertigungstechnologie in verfahrenstechnische Details abzudriften. Die Intention hinter dieser speziellen Frage war, den Bereich der generativen Fertigung so aufzubereiten, dass die grundlegenden Unterschiede der einzelnen Verfahrensfamilien auch für Personen aus dem Bereich der Geowissenschaften verständlich aufbereitet werden. In einer Arbeit wie dieser, in der die gesamte Verfahrensgruppe der generativen Fertigung von Interesse ist, kann daher nicht anders vorgegangen werden als die generative Fertigung und die darin enthaltenen Verfahren nur in ihren Grundsätzen darzustellen. Die kommende Frage nach speziellen Eigenschaften der Druckverfahren gibt hier noch einen weiteren Einblick

### **Welche Druckverfahren kommen dafür auf Basis ihrer Eigenschaften in Frage?**

Für die Beantwortung der Frage, welche Verfahren für Geowissenschaftliche Fragestellungen von besonderem Interesse sind, bildet die Abbildung 44 auf Seite 78 die Grundlage. In dieser Abbildung werden die Verfahren definierten Modelltypen zugeordnet. Aus der Definition der Modelltypen geht hervor, dass aufgrund der beschriebenen Eigenschaften die Modelltypen „Konzeptmodell“ und „Geometriemodell“ jene Modelltypen sind, die für geowissenschaftliche Anwendungen von besonderem Interesse sind. Aus dieser Gliederung lassen sich in weiterer Folge die Verfahren ableiten, die zur Herstellung der jeweiligen Modelltypen am geeignetsten sind. Im Falls der Geowissenschaften sind dies die Verfahren **3DP** (Three dimensional Printing), **LLM** (Layer Laminated Manufacturing od. Schicht-Laminat-Verfahren) und **FLM** (Fused Layer Modeling od. Extrusionsverfahren), die aufgrund

ihrer Eigenschaft, monochrom oder polychrom drucken zu können, dafür sehr gut geeignet sind. Im Bereich der Geometrieprototypen sind die beiden Verfahren **SL** (Stereo-Lithographie) und **(L)S** (Laser-Sintering) laut GEBHARDT besser geeignet, da sie aufgrund von verfahrenstechnischen Eigenschaften in der Lage sind, geometrisch exakte Modelle zu erzeugen. Hier jedoch spielt die Möglichkeit, in Farbe drucken zu können, auch eine wichtige Rolle. Sind diese Verfahren dazu nicht in der Lage, so kommen sie für geowissenschaftliche Anwendungen nicht in Frage. Bezüglich der Eigenschaften der Verfahren ist diese Frage sehr stark von den Materialien abhängig, die für die Fertigung verwendet werden. Hier kann gesagt werden, dass der jeweilige Anwendungszweck eine Auswahl des am besten geeigneten Material voraussetzt. Im Bereich der physischen Modelle ist hier anzumerken, dass das Alleinstellungsmerkmal der taktilen Erfassung im Vordergrund steht. Die Auswahl des Druckverfahrens bzw. des Materials sollte daher immer auch so gewählt werden, dass die taktile Erfassung, also eine gewisse Strapazierfähigkeit des Materials, gewährleistet ist.

### **Was wären potentielle Anwendungsbereiche im geowissenschaftlichen Umfeld?**

Was die potentiellen Anwendungsbereiche im geowissenschaftlichen Umfeld betrifft, ist die Frage auch, wie besprochen, über den Umweg der Modelltypen zu beantworten. Der Umstand, dass das Feld der Geowissenschaften nicht so einfach einzugrenzen ist (wie wir in Kapitel 2 gesehen haben), erschwert natürlich die Aufgabe, diese Frage gezielt zu beantworten, enorm. Anhand der Beispiele aus Kapitel 4.1 und 4.2, die für unterschiedliche Disziplinen in den Geowissenschaften präsentiert wurden, lässt sich nur sehr schwer der gesamte Anwendungsbereich im geowissenschaftlichen Umfeld ableiten. Über die Funktion der Modelle lassen sich auch Anwendungsbereiche für eben diese definieren.

Die Begriffe, die in dieser Hinsicht von GEBHARDT benutzt wurden, der Begriff des „*Solid Images*“ und der der „*Show and Tell Modelle*“ (S.77), beschreiben sehr gut, wo die Anwendungsbereiche von generativ gefertigten Modellen in den Geowissenschaften liegen. Alle Modelle und unterschiedlichen Formen der Visualisierung dienen der Kommunikation von Inhalten, in diesem Fall der wissenschaftlichen Kommunikation. Dies untermauert auch PORPACZY in seiner Aussage über das geologische Modell auf Seite 35. Gerade bei komplexen 3-dimensionalen Darstellungen sieht er den Vorteil in der Wissensvermittlung gegenüber einem fachfremden Publikum mittels physischen Modellen. Am Beispiel der Abbildung 17 auf Seite 35 (Kristallmodelle) wird auch gezeigt, dass nicht nur die Möglichkeit der wissenschaftlichen Kommunikation nach außen ein Vorteil von physischen Modellen sein kann, sondern auch für den wissenschaftlichen Diskurs innerhalb einer Disziplin oder an Hochschulen die Ausbildung Studierender betreffend. Die Möglichkeit, eine weitere sensorische Ebene bei der wissenschaftlichen Kommunikation zu benutzen, egal ob unter Fachleuten, im schulischen Kontext oder in einem öffentlichkeitswirksamen Kontext, ist dabei besonders herauszustreichen. Untermauert wird dies durch die Abbildung 3 in der unkonventionellen Darstellung des Aufnahmepotentials über unterschiedliche sensorische Kanäle des Menschen. Taktile erfassbare Modelle herzustellen kann somit als ein wichtiger Anwendungsbereich von physischen Modellen angesehen

werden, vor allem in Hinblick auf generative Fertigungsverfahren. Obwohl auch an dieser Stelle gesagt werden muss, dass auch Modelle, die nicht mit generativen Fertigungsverfahren hergestellt worden sind, für die gleichen Anwendungsbereiche in Frage kommen. Zur Frage, warum dann 3D-Druck eventuell von besonderem Interesse ist oder wo seine Vorteile gegenüber klassischen Methoden liegen, kommen wir noch.

### **Wo liegen die Vorteile und der Nutzen physisch-dreidimensionaler Informationsdarstellungen?**

Der Frage, wo der Nutzen physisch-dreidimensionaler Visualisierungen liegt, sowie dem Nutzen von Modellen im Kontext der Geowissenschaften widmeten sich bereits die Kapitel 3 und 4. Hier sollen noch einmal die wichtigsten Punkte, beginnend mit RASEs Aussagen zusammengefasst werden. Dem Zitat von RASE auf Seite 17 ist zu entnehmen, dass physische Modelle gerade für fachfremde Personen leichter zu erfassen sind als 2-dimensionale Darstellungen wie z.B. Karten, die ein Vorwissen über die eingesetzten Formen der Kodierung voraussetzen. Gegenüber pseudo-dreidimensionalen Darstellungen liegt der Vorteil bei physischen Modellen darin, dass die Betrachtung und Analyse von physischen Modellen in der Natur des Menschen liegt, da wir die ganze Zeit unseres Lebens mit der Wahrnehmung von physischen Objekten befasst sind. Über die Möglichkeit der taktilen Erfassung solcher Modelle und deren Vorteil wurde bereits gesprochen. Kapitel 4.3 widmet sich in einem kurzen Abschnitt dem Bereich der taktilen Karten. Gerade für Menschen mit visuellen Beeinträchtigungen ist es enorm wichtig, dass Modelle, die haptisch wahrgenommen werden können, zur Verfügung stehen. Die Abbildungen 21 und 27 zeigen solche Beispiele. Ob man im Bereich der Ästhetik von einem wirklichen Nutzen sprechen kann, soll an dieser Stelle nicht zur Diskussion gebracht werden. Trotzdem kann man den klassischen Landschaftsmodellen wie in Abbildung 5 u. 14 oder Stadtmodellen wie am Beispiel in Abbildung 8 nicht absprechen, dass es sich dabei durchaus um ästhetisch der Anspruchsvolle Modelle handelt. CALDWELLs Zitat auf Seite 21 zeigt aber auf, wie man diese Frage beantworten muss. Zwar lassen sich digitale Daten mit Datenbanken verknüpfen, analysieren und auch animieren, wodurch sie vielseitiger einsetzbar sind, doch stehen sie trotzdem in keiner Konkurrenz mit physischen Modellen – sie ergänzen diese eher. Gerade auf die Möglichkeiten im Bereich der Augmented Reality (oder auch Virtual Reality) in Verbindung mit physischen Modellen soll hier kurz hingewiesen werden. Digitale Daten lassen sich so mit realen physischen Objekten verbinden und bieten so die Möglichkeit eventuell noch effektiver Wissen zu kommunizieren.

### **Welche Vor- und Nachteile haben generative Fertigungsverfahren in diesem Zusammenhang?**

Modelle, gebaut nach herkömmlichen „klassischen“ Methoden, hat es immer gegeben und sie werden auch weiterhin Bestand haben. Ob automatisierte Verfahren jemals in der Lage sein werden, Modelle nach dem Vorbild eines IMHOF oder MEYER zu erstellen, ist überhaupt fraglich und die Frage eigentlich nicht zielführend. Wozu sie aber in der Lage sind, und das wurde auch in der Arbeit

angesprochen, ist, eine Symbiose mit klassischen Verfahren einzugehen. Dort, wo es sinnvoll ist, kann die generative Fertigung gezielt eingesetzt werden und zu einer Steigerung der Gesamtqualität beitragen. Der Vorteil von generativen Verfahren ist eindeutig der, dass die Generierung von physischen Modellen nicht mehr vom handwerklichen Geschick einiger weniger Personen / Firmen abhängig ist.

Das Beispiel des in der Arbeit analysierten Modells zeigt auch in dieser Hinsicht auf, was durch den Einsatz dieser Technologie möglich ist. Virtuelle Daten wurden auf einfachste Weise in ein physisches Modell verwandelt und in eine Ausstellung integriert, die dazu diente, einer breiten Öffentlichkeit neue Formen der 3-dimensionalen Visualisierung im Bereich der Geologie näherzubringen. Obwohl die Kosten der Erstellung des Modells in dieser Arbeit keine Rolle spielten, so wird vermutet, dass die Kosten einer Fertigung durch einen Modellbauer, eine Modellbauerin mit Sicherheit über jenen der generativen Fertigung gelegen wären.

Der größte Vorteil beim Einsatz von generativen Fertigungsverfahren ist das diese Technologie weitaus Zugänglicher ist als z.B. klassische Methoden der Fertigung. Diese setzten ein gewisses Verständnis und auch Handwerkliches geschickt voraus um zu einem Endergebnis zu kommen. Dieser Faktor fällt bei generativen Fertigungsanlagen vollständig weg. Die Erstellung eines 3D-Volumenmodells kann somit gleichgesetzt werden mit Fähigkeiten die man besitzen muss bzw. erlernen muss will man generative Fertigungsverfahren verwenden. Der Prozess der Produktion selbst wird aber von der Anlage selbstständig übernommen. In Kapitel 6 (Seite 81 f.) wird ein solches Beispiel skizziert. Als EndanwenderIn ist man, in Verbindung mit dem 3D-Druck gleichzeitig auch ProduzentIn. Das heißt die Auswahl des zu produzierenden Objektes obliegt alleine dem / der EndanwenderIn. Man ist in Folge also nicht mehr auf Produkte angewiesen die zwar dem entsprechen was man sucht z.B. Reliefkarten für den Unterricht, aber hat die Möglichkeit das Gebiet, bleiben wir bei den Reliefkarten, welches gedruckt werden soll selbst zu wählen. Diese kann als Alleinstellungsmerkmal von generativen Fertigungsverfahren im Vergleich zu herkömmlichen Methoden gesehen werden und ist somit ein klarer Vorteil.

Verglichen mit klassischen Landschaftsmodellen, die Anhand einiger Beispiel in dieser Arbeit vorgestellt wurden wird erkennbar das gedruckte Modelle nicht diesen grad der Ästhetik erreichen können wie diese Art des Modellbaus. In Abschnitt 4.1.1 wurde bereits kurz erwähnt das beim Finish und der Bemalung von Landschaftsmodellen die Erfahrung und eine nicht unbeträchtliche künstlerische und gestalterische Fähigkeit des Modellbauers verlangt wird. Dieser Prozess basiert auf einer Rückkoppelung zwischen Gestaltung und Wirkung, etwas dazu Maschinen nicht in der Lage sind.

**Welche Rolle spielen Generalisierung und Detaillierung im Zusammenhang mit generativen Fertigungsverfahren?**

Diese Frage, wie auch in Kapitel 1.3 dargestellt, verfolgt zwei Ansätze. Welche Rolle die Generalisierung bzw. Detaillierung spielt, konnte in dieser Arbeit nicht ausreichend beantwortet werden. Um hier fundierte Aussagen treffen zu können, müssten Formen und Formkompositionen, welche für den physischen Modellbau in den Geowissenschaften relevant sind, anhand einer oder mehrerer Versuchsreihen mit unterschiedlichen generativen Fertigungsverfahren erstellt und anschließend analysiert werden. Dazu müssten in erster Linie eben diese Formen identifiziert und anschließend so aufbereitet werden, dass diese in Versuchsreihen getestet werden könnten. Außerdem müssten die Kriterien zur Überprüfung der Formen entweder bekannt sein oder erarbeitet werden. Im Zuge der Recherche wurde somit von der Beantwortung dieser Frage Abstand genommen, da sie aufgrund des zu erwartenden Umfangs nicht ausreichend bearbeitet werden könnte.

### **Wie genau sind generative Fertigungsverfahren**

Die Frage der Genauigkeit von generativ gefertigten Bauteilen wurde hingegen ausführlicher diskutiert. Anhand einer Analyse der Druckdatei sowie der Deviationsanalyse konnten hier Ergebnisse erzielt werden. Beginnend mit der Druckdatei konnten einige Parameter erarbeitet werden, die über die Komplexität von Objekten Aufschluss geben können. Dabei wurde sehr deutlich, dass es zwar möglich ist, auf einer rein digitalen Ebene Modelle und Ursprungsdaten qualitativ zu verbessern. Dies ist aber nur immer dann sinnvoll, wenn auch das gewählte generative Verfahren in der Lage ist, diese Qualitätsansprüche zu erfüllen.

Im Fall des untersuchten Objektes wird angenommen, dass eine höhere Formkomplexität des Ursprungsobjektes zu keinem Qualitätsunterschied beim endgültigen Modell geführt hätte. Das gewählte Verfahren ist grundsätzlich ungenau und wäre dazu nicht in der Lage gewesen. Dabei muss beachtet werden, dass sich diese Aussagen immer nur auf das spezielle Verfahren sowie die für den Druck gewählten Einstellungen beziehen können. Die Frage, ob sich die Qualität des Modells verbessert hätte, würde man das Objekt mit einer besseren Auflösung (geringere Schichtdicke) drucken, konnte nicht beantwortet werden. Eine Steigerung der Maschinengenauigkeit bedeutet gleichzeitig auch eine Steigerung der gesamten Prozessgenauigkeit. Auf einer theoretischen Basis ist die Frage somit beantwortet. Eine praktische Überprüfung aber noch ausständig.

Etwas, das bei der Deviationsanalyse jedoch deutlich wurde ist, dass trotz der geringen Auflösung die Abweichungen zum Ursprungsobjekt weniger signifikanter waren als erwartet. Nur in der Aufsummierung der Fehler der einzelnen Bauteile gesehen am Gesamtobjekt wurden die Abweichungen sehr deutlich. Gesehen am Gesamtnutzen des Objektes als Kommunikationsmittel sind die geometrischen Abweichungen aber nebensächlich. Das Modell ist trotzdem in der Lage, die gestellten Aufgaben im vollen Umfang zu erfüllen.

Bezogen auf generative Fertigungsanlagen bedeutet diese Erkenntnis: Die Verwendung von 3D-Drucken der untersten Qualitätsstufen (Personal 3D-Drucker/Fabber) ist grundsätzlich möglich, solange die Modellfunktionen im vollen Umfang realisiert werden können. Als Modellfunktion wird das kommunikative Potential der Modelle gesehen. Erst an zweiter Stelle würden etwaige technische Modellfunktionen stehen. Die Erstellung von auf allen Ebenen qualitativ hochwertigen Modellen sollte in einem wissenschaftlichen Kontext angestrebt werden. Daher sind semi-professionelle bzw. professionelle Drucker (vgl. Tabelle 6) einfacheren Fertigungsanlagen vorzuziehen.

### Wie sieht ein möglicher Verfahrensablauf aus?

Ein möglicher Verfahrensablauf wurde bereits skizziert bzw. vorgestellt. Solange aus den virtuellen Daten ein Volumenmodell erzeugt werden kann, ist es grundsätzlich möglich, dieses auch zu drucken. Je nach gewünschten Eigenschaften und verfügbaren Fertigungsverfahren muss das Modell so aufbereitet werden, dass die für das jeweilige Verfahren relevanten Eigenschaften auch in der Druckdatei vorhanden sind bzw. diese an die Gegebenheiten der Fertigungsanlage angepasst sind. Steht eine Fertigungsanlage zur Verfügung muss, somit das Modell an die Parameter der Anlage angepasst werden. Stehen die gewünschten Modelleigenschaften im Vordergrund so muss das generative Verfahren anhand dieser Parameter gewählt werden.

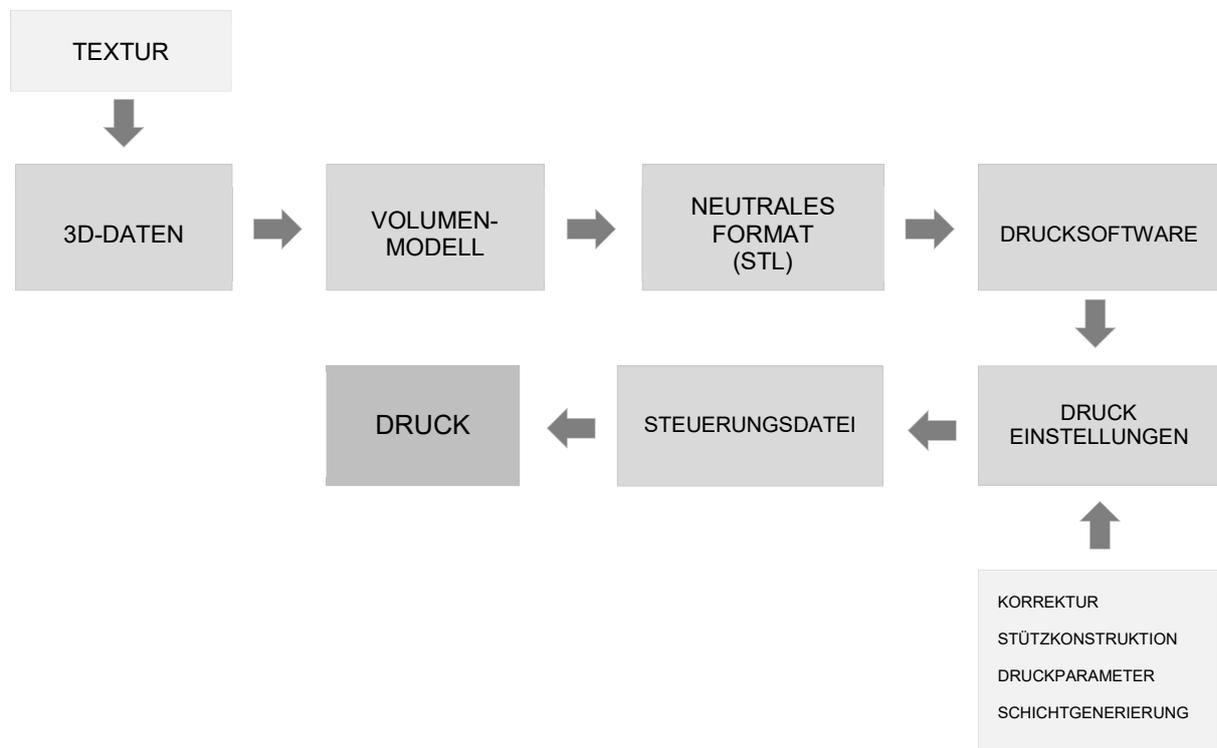


Tabelle 18: Schema eines möglichen Verfahrensablauf 3D-Druck, Eigene Darstellung

In Tabelle 18 ist ein sehr vereinfachter Verfahrensablauf in Anlehnung an die Abbildung 34 (S. 59) skizziert. Zu Beginn steht ein beliebiger 3D-Datensatz inkl. eventuelle Texturen. Voraussetzung für die

weitere Verwendung des Datensatzes im Zuge des Fertigungsprozesses ist, dass aus dem Vorhandenen Modell ein 3D-Volumenmodell bzw. Körpermodell generiert werden kann. Eine genaue Erläuterung darüber befindet sich in Tabelle 2 (S. 60). Das Volumenmodell muss anschließend in ein neutrales Format (z.B. STL) konvertiert werden. Falls die Texturen für den Druck erhalten bleiben müssen, muss bei diesem Schritt ein dafür geeignetes Dateiformat gewählt werden. (Kap 5.4.2). Nach diesem Schritt kann die Datei in das jeweilige Programm der generativen Fertigungsanlage geladen werden. Innerhalb dieser Programme werden die Objekte auf eventuelle Fehlstellen überprüft und in weiterer Folge können die Parameter für den Druck (z.B. Schichtdicke, Materialspezifische Einstellungen, Füllung, Stützkonstruktion, usw.) eingestellt werden. Die für generative Fertigungsverfahren essentielle Schichtgenerierung wird auch von diesen Programmen übernommen. Bevor die Datei nun endgültig an die Fertigungsanlage übergeben werden kann, muss noch eine Steuerungsdatei generiert werden, die den Bauprozess in der Anlage steuert. Im Falle des Untersuchungsobjektes handelt es sich hierbei um eine Datei im Dateiformat .gcode (vgl. Kap 7.1.1).

## 10. Quellenverzeichnis

AWIZUS B; BAST J; DÜRR H; MAYR P. (2016): Grundlagen der Fertigungstechnik – München.

BASILIERE P. (2011): 3D Printing, In: FENN J. LEHONG H. Hype Cycle for Emerging Technologies, 2011

BERTALANFFY L. (1949): Zu einer allgemeinen Systemlehre, in BLEICHER 1972, 31-45

BILL R; ZEHNER M.L. (2001): s.V. ASCII – Lexikon der Geoinformatik – Heidelberg.

BONHAM-CARTER G.F. (1994): Geographic Information Systems for Geoscientists – Modelling with GIS, Geological Survey of Canada Ottawa, Ontario.

BUCHROITHNER M. (1999): Möglichkeiten „echter“ 3D-Visualisierungen von Geo-Daten – In: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, Beiträge zum AGIT-Symposium, Salzburg.

CALDWELL R.D. (2001): Physical Terrain Modeling for Geographic Visualization. Modern Technology Meets An Ancient Art Form. In: Cartographic Perspectives, No. 38, 66-72

FASTERMANN P. (2014): 3D-Drucken. Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert. – Berlin Heidelberg.

FASTERMANN P. (2012): 3D-Druck/Rapid Prototyping. Eine Zukunftstechnologie – kompakt erklärt. – Berlin Heidelberg.

FAULKNER L. (2006): Physical Terrain Modeling in a Digital Age. Simulation Series 38.1, 373-376. Online unter: [http://www.solidterrainmodeling.com/pdf\\_brochures/Physical\\_Terrain\\_Modeling\\_in\\_a\\_Digital\\_Age.pdf](http://www.solidterrainmodeling.com/pdf_brochures/Physical_Terrain_Modeling_in_a_Digital_Age.pdf) (Stand: 28.11.2016).

FRITZ A.H; SCHULZE G (Hrsg.) (2015): Fertigungstechnik – Berlin.

GEBHARDT A. (2013): Generative Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. – München.

GÖTZE H.J; MERTMANN D; RILLER U; ARNDT J. (2016): Einführung in die Geowissenschaften, 2.Aufl. – Stuttgart.

HAGL R. (2015): Das 3D-Druck-Kompedium. Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber. – München.

HILBRING D. (2005): 3D-Visualisierung in der Umweltinformatik, Dissertation – Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe.

HAKE G; GRÜNREICH D; MENG L. (2002): Kartographie – Visualisierung raum-zeitlicher Informationen 8.Aufl. – New York.

HASIUK F. (2014a): Making things geological: 3-D printing in the geosciences. In: GSA Today, v. 24, no. 8, 28-29

HASIUK F. HARDING C. (2014b): Touchable topography: 3D printing elevation data and structural models to overcome the issue of scale. In: Geology Today, Vol. 32, No. 1, Jan-Feb 2016, 16-20, London

HOROWITZ S; SCHULTZ H. (2014): Printing Space: Using 3D Printing of Digital Terrain Models in Geosciences Education and Research. In: Journal of Geoscience Education 62, 138-145

KOCH W.G. (2012): State of the Art of Tactile Maps for Visually impaired People. In: Ture-3D in cartography: autostereoscopic and solid visualization of geodata. Heidelberg (137 - 151)

KRIZ K. (1999): Perspektiven in der Kartographie. – In: KRETSCHMER I. KRIZ K. (Hrsg.) 25 Jahre Studienfach Kartographie. Wien, Institut für Geographie der Universität Wien (= Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Bd. 12), Seite??

KÜHN K.D. (2015): Einführung. In: FRITZ A.H. und SCHULZE G. (Hrsg.): Fertigungstechnik – Berlin. [Einleitung Kap Generative Fertigungsverfahren]

LACHMAYER R; LIPPERT R.B. (2016) 3D.Druck beleuchtet – Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung.; Hrsg: FAHLBUSCH T. Heidelberg.

LESER H; HAAS H; MEIER S; MOISMANN T; PAESLER R; HUBER-FRÖHLI J. (2010): Diercke, Wörterbuch Allgemeine Geographie, 14.Aufl; Hrsg. LESER H; – München

MacEACHERN A; KRAAK M-J. 2001: Research Challenges in Geovisualization. Draft, Nov. 20, 2000 – forthcoming in Cartography and Geographic Information Science, Vol. 28, No.1,

MURAWSKI H; MEYER W. (2010): Geologisches Wörterbuch, 12 überarbeitete und erweiterte Auflage – Heidelberg.

NEGENDANK J.F.W. (2000): s.V. Geowissenschaften – In: Lexikon der Geowissenschaften, Bd. 2, Heidelberg/Berlin.

N.N.(2012): The third industrial Revolution, online 12.04.2017, <http://www.economist.com/node/21553017> (12.04.2017)

PATTERSON T.(2000): A View From on High: Heinrich Berann's Panoramas and Landscape Visualization Techniques For the US National Park Service. Cartographic Perspectives, Bd. 37, 38 – 65, Harpers Ferry

PIFFNER O.A; ENGI M; SCHLUNEGGER F; MEZGER K; DIAMOND L. (2012): Erdwissenschaften. – Bern u.a.

PICKERT C; WIRTH M. (2013): Additive Fertigungsverfahren, CEDIFA Arbeitsbericht 1 (Center for Digital Fabrication) Würzburg

RASE W-D- (2006): Physical Models for Cartographic Applications – In: KRIZ K. CARTWRIGHT W. PUCHER A. KINBERGER M. (Hrsg.). Kartographie als Kommunikationsmedium. Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien (= Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Bd. 17) S.286-291.

RASE W-D. (2009): Dreidimensionale Karten für die Großräumige Planung – In: Informationen zur Raumplanung Heft 10/11.2009, 677-688, Bonn.

RASE W-D. (2010): Karten aus dem 3D-Drucker. In: Kartographische Nachrichten, Heft 1/10, 38-41, Bonn

ROPOHL G. (2009): Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik. – Karlsruhe

RUSINKIEWCZ S. LEVOY M: (2001): Efficient variants of the ICP algorithm. In: Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 145-152 Quebec City, Que

SETAR L; MACFARLAND M. (2012): Top 10 Fastest-Growing Industries. IBISWorld Special Report, 1-4

VIRTANEN J-P; HYYPPÄ H; KURKELA M; VAAJA M; ALHO P; HYYPPÄ J. (2014): Rapid Prototyping – A Tool for Presenting 3-Dimensional Digital Models by Terrestrial Laser Scanning. In: ISPRS International Journal of Geo-Information 2014, Vol.3, 871-890.

VALENTAN B; BRAJLIH T; DRSTVENSEK I; BALIC J. (2008): Basic solutions on shape complexity evaluation of STL data. In: Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Vol. 26, Issue 1, 73 - 80

WESTKÄMPER E; WARNECKE H.J. (2010): Einführung in die Fertigungstechnik – Wiesbaden.

## ONLINE QUELLEN

McCNDLESS, Ted Talk David McCandless: The beauty of data visualization  
[http://www.ted.com/talks/david\\_mccandless\\_the\\_beauty\\_of\\_data\\_visualization#t-1078141](http://www.ted.com/talks/david_mccandless_the_beauty_of_data_visualization#t-1078141)  
(Stand 18.11.2017) July 2010 TEDGlobal 2010

de.wikitionary.org  
<https://de.wiktionary.org/wiki/geo-> (Stand 28.09.2016)

spektrum.de  
<http://www.spektrum.de/lexikon/kartographie-geomatik/kartographie/2691>  
(Stand 13.10.2016)

wissen.de  
<http://www.wissen.de/lexikon/dimension-geometrie> (Stand 24.11.2016)

dasgehirn.info  
<https://www.dasgehirn.info/wahrnehmen/sehen/sehen-in-3d> (Stand 24.11.2016)

terrainmodels.com<sup>1</sup>  
[http://www.terrainmodels.com/history.html#\\_ftn2](http://www.terrainmodels.com/history.html#_ftn2) (Stand 24.02.2017)

terrainmodels.com<sup>2</sup>  
<http://www.terrainmodels.com/navigation.html> (05.03.2017)

vgl. terrainmodels.com<sup>3</sup>  
<http://www.terrainmodels.com/thermoplastic.html> (Stand 08.05.2017)

vgl. terrainmodels.com<sup>4</sup>  
[http://www.terrainmodels.com/wenschow\\_method.html](http://www.terrainmodels.com/wenschow_method.html)

terrainmodels.com<sup>5</sup>  
<http://www.terrainmodels.com/emboss.html> (Stand 25.02.2017)

terrainmodels.com<sup>6</sup>  
<http://www.terrainmodels.com/computer.html> (Stand 25.02.2017)

terrainmodels.com<sup>7</sup>  
<http://www.terrainmodels.com/natscience.html> (Stand 09.05.2017)

bergmodelle.de<sup>1</sup>  
<http://www.bergmodelle.de/nota-bene/herstellung/> (Stand 25.02.2017)

blogs.walkerart.org  
<http://blogs.walkerart.org/newmedia/2006/05/16/art-com-northrop-grumman-and-audiopad/>  
(Stand 25.02.2017)

wien.gv.at<sup>1</sup>  
<https://www.wien.gv.at/verkehr-stadtentwicklung/interview-modellbau.html> (Stand 27.02.2017)

hamburg.de  
<http://www.hamburg.de/stadtmodell/> (28.02.2017)

vgl. [creators.vice.com/de/](https://creators.vice.com/de/)

<https://creators.vice.com/de/article/daten-von-erdbeben-im-3d-druck-visualisieren> (09.05.2017)

[www.uibk.ac.at/](http://www.uibk.ac.at/)

<https://www.uibk.ac.at/public-relations/presse/archiv/2015/603/> (09.05.2017)

[nhm-wien.ac.at](http://www.nhm-wien.ac.at/)

[http://www.nhm-wien.ac.at/forschung/1\\_zoologie\\_wirbeltiere/zoologische\\_hauptpreparation/modellbau](http://www.nhm-wien.ac.at/forschung/1_zoologie_wirbeltiere/zoologische_hauptpreparation/modellbau) (01.03.2017)

[precifast.de](http://www.precifast.de)

<http://www.precifast.de/cnc-programmierung-mit-g-code/> (Stand 17.02.2017)