



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Die Erstellung von Geländerelevs im Wandel der  
Zeit - Entwicklung, Anwendung und Perspektiven.“

verfasst von / submitted by

Katharina Biedermann BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the  
degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2018 / Vienna 2018

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. Karel Kriz



Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.

Des Weiteren möchte ich darauf hinweisen, dass aus Gründen der besseren Lesbarkeit die Sprachform des generischen Maskulinums in dieser Arbeit Anwendung findet. Dies soll jedoch keinesfalls eine Geschlechterdiskriminierung oder eine Verletzung des Gleichheitsgrundsatzes zum Ausdruck bringen. Sämtliche Ausführungen beziehen sich auf beide Geschlechter in gleicher Weise.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>ii</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Forschungsfrage .....	2
1.3 Ziel der Arbeit.....	3
1.4 Methodik und Problemlösungsweg .....	3
<b>2 Begriffsdefinitionen und Abgrenzung des Themas .....</b>	<b>4</b>
2.1 Kartographie .....	4
2.2 Kartenverwandte Ausdrucksformen.....	6
2.3 Reliefs.....	9
2.4 Gegenüberstellung Karte - Relief / 2D vs. 3D .....	15
2.5 Abgrenzung des Themas .....	19
<b>3 Historische Entwicklung des Reliefbaus .....</b>	<b>20</b>
3.1 Die Anfänge des Reliefbaus im 16. bis 18. Jahrhundert .....	21
3.2 Die Hochblüte des Reliefbaus seit dem 19. Jahrhundert.....	27
3.3 Der moderne Reliefbau seit Ende des 20. Jahrhundert bis heute .....	33
3.4 Bedeutung und Nutzen im Wandel der Zeit .....	35
<b>4 Datengrundlagen im Reliefbau.....</b>	<b>36</b>
4.1 Methoden der originären Datenerfassung im Reliefbau .....	36
4.1.1 Terrestrische Vermessung.....	37
4.1.2 Hydrographische Vermessung.....	39
4.1.3 Photogrammetrie .....	40
4.1.4 Fernerkundung .....	44
4.1.5 Erfassung aus originären Daten.....	49
4.1.5.1 Karten.....	49
4.1.5.2 Digitale Geodatenmodelle .....	50
4.1.5.3 Andere Datenquellen.....	54
4.2 Methoden der sekundären Datenerfassung im Reliefbau.....	55



---

4.3	Gegenüberstellung der relevanten Geodaten .....	55
<b>5</b>	<b>Herstellungsverfahren im Reliefbau .....</b>	<b>58</b>
5.1	(Analoge) manuelle Verfahren .....	59
5.1.1	Modellierung durch Holzschnitzerei.....	59
5.1.2	Freie Modellierung .....	60
5.1.3	Modellierung mit Fixpunkten .....	61
5.1.4	Modellierung auf Basis von Höhen- & Profillinien .....	64
5.2	(Analoge) maschinelle Verfahren.....	73
5.2.1	Pantograf .....	73
5.2.2	Wenschow-Verfahren.....	74
5.2.3	Das italienische Verfahren.....	79
5.2.4	Das amerikanische Verfahren.....	80
5.2.5	Reliefherstellung mittels Stereobildern .....	81
5.2.6	Reliefherstellung mittels Photopolymerisation.....	82
5.3	Digitale Verfahren .....	82
5.3.1	Additive Verfahren .....	83
5.3.2	Subtraktive Verfahren .....	91
5.3.3	Formative Verfahren .....	95
5.4	Weitere Herstellungsverfahren.....	95
<b>6</b>	<b>Analyse der Geländemodelle .....</b>	<b>98</b>
6.1	Das Relief des Wettersteingebirges .....	98
6.2	Das Matterhorn Relief.....	101
6.3	Das Eiger Relief.....	107
<b>7</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>110</b>
7.1	Gegenüberstellung der Herstellungsverfahren.....	110
7.2	Gegenüberstellung und Vergleich der Modelle .....	114
7.3	Beantwortung der Forschungs- und Arbeitsfragen .....	116
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>118</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>131</b>
<b>10</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>137</b>

## **Kurzfassung**

Das Thema dieser Arbeit sind Geländereliefs. Da sich die Kartographie nicht nur der klassischen Karte widmet und es eine Vielzahl an kartenverwandten Ausdrucksformen gibt, aber nur eine, die eine echte dreidimensionale Abbildung von Teilen der Erdoberfläche erlaubt, nämlich das Geländerelief, wird versucht dieses Thema von den verschiedensten Gesichtspunkten her zu beleuchten. Zu Beginn der Arbeit wird auf die Entwicklung im Reliefbau eingegangen, der seine Wurzeln bereits im 16. Jahrhundert hat und sich seither stets weiterentwickelt hat. Die historische Entwicklung wird anhand von einzelnen herausragenden Reliefbauern erläutert. Einige nutzten die selben Herstellungsverfahren für ihre Modelle, andere entwickelten ihre komplett eigene Technik. Der Herstellungsprozess ist aber stets eng mit den verfügbaren Geodaten und dem technischen Fortschritt der jeweiligen Epoche verbunden. Daher wird den für den Reliefbau relevanten Geodaten ein eigenes Kapitel gewidmet, in dem auch die verschiedenen Aufnahmeverfahren beleuchtet werden. Diese Ausgangsdaten werden dann zu Geländemodellen weiterverarbeitet bzw. veredelt. Hier bietet sich eine Vielzahl an Verfahren an. Von der anfänglichen freien Modellierung, die etwas ungenau ist, über die Modellierung mittels Höhenlinien, die bis heute noch Anwendung findet, bis hin zu den aktuellen computergestützten bzw. Rapid Prototyping Verfahren. Diese und alle weiteren Herstellungstechniken werden in historischer Reihenfolge erläutert. Im Anschluss daran werden beispielhaft ausgewählte Reliefmodelle, die mittels verschiedener Techniken und Ausgangsdaten gefertigt wurden, analysiert. Das Ziel dieser Arbeit ist es, das aktuell am besten geeignete Verfahren für die Erstellung von großmaßstäbigen Geländereliefs im Alpenraum zu finden.

## **Abstract**

This thesis describes the development and the production techniques of relief models. The focus of this paper is set on large-scale models in Alpine regions. Over time different analogous as well as digital approaches have been utilized that document the broad variety of techniques. Relief models of Alpine areas can be dated back all the way to the 16th century. As time passed, not only the materials used for generating such models have changed but also the production techniques and the needed input data. In the past centuries the only way to create relief models was by hand. Nowadays digital terrain models utilizing computer-based techniques are in use. Toni Mair (1940-2015) once said: "...even in the last phase of creating relief models, man is superior to the machine" (Mair 2009). But is this still true today? Can computer-generated 3D printer models already compete with the high quality handmade models created e.g. by Xaver Imfeld (1853-1909) and Eduard Imhof (1895-1986)?

This contribution, by example of selected famous and impressive relief models of the past centuries, will try to find out whether state of the art techniques can bear comparison at all with past techniques. The overall aim is to analyze the historical, current as well as evolving manufacturing methods in order to find out the optimal method for creating relief models today.

---

# 1 Einleitung

Bereits seit dem 16. Jahrhundert wird die Landschaft im alpinen Raum in Form von Geländereliefs nachmodelliert. Das „Relief der Innerschweiz (oder auch Urschweiz)“ von Franz Ludwig Pfyffer von Wyher (1716-1802), erstellt zwischen 1762 und 1786, gilt als eines der ältesten und bekanntesten noch erhaltenen Landschaftsreliefs der Schweiz. Pfyffers Werk weist in vermessungstechnischer Sicht eine äußerst hohe Genauigkeit auf, wenn man bedenkt, dass dieses große Relief fast 100 Jahre vor dem ersten modernen schweizerischen Kartenwerk von Guillaume-Henri Dufour erstellt wurde. Das Relief basierte auf persönlichen Gebietsbeobachtungen und -messungen und diente später als Grundlage zur Kartenerstellung. Ab etwa der Mitte des 19. Jahrhunderts änderte sich dies und der Herstellungsprozess wurde umgekehrt - Geländereliefs werden seither mit Hilfe von Karten und anderen Geodaten erstellt. Auf Basis von den darin enthaltenen Höhenkurven können Treppenstufenmodelle aufgebaut und mittels Gips ausmodelliert werden. Im Laufe der Zeit kamen nicht nur die verschiedensten Materialien für die Modellierung zum Einsatz, auch das Herstellungsverfahren selbst änderte sich. Wurden Geländereliefs zu Beginn ausschließlich händisch erstellt, so können diese mittlerweile ganz ohne manueller Modellierarbeit erstellt werden - unter anderem mittels 3D-Drucker. Auch hier gibt es die verschiedensten 3D-Druckverfahren. Toni Mair (1940-2015) beschreibt diese computergenerierten Reliefs allerdings als „...dilettantisch vereinfacht, stark überhöht, ihre Bemalung kartenmäßig und völlig unnatürlich...“, des Weiteren stellt er fest: „Äußert sich der Reliefbauer über die Schwächen der computergenerierten Modelle, dann erhält er immer wieder die Belehrung, das System werde laufend verfeinert und die Darstellung optimiert. Nun, dies hört man schon seit 40 Jahren. Bisher ist aber keine merkliche Verbesserung eingetreten... Auch in dieser letzten Phase der Reliefherstellung ist der Mensch der Maschine überlegen [MAI-06].“ Wie sieht es nun mehr als 10 Jahre später aus? Können computergenerierte Modelle aus dem 3D-Drucker mittlerweile mit den Landschaftsreliefs von höchster Qualität, die zum Beispiel von Xaver Imfeld (1853-1909) und Carl Meili (1871-1919) gegen Ende des 19. Jahrhunderts geschaffen wurden, mithalten? Neben Imfeld und Meili seien noch ein paar der bedeutendsten Reliefkünstler, die im Laufe der Arbeit immer wieder vorkommen, genannt: Charles François Exchaquet (1746-1792), Joachim Eugen Müller (1752-1833), Charles-Eugène Perron (1837-1909), Albert Heim (1849-1937), Simon Simon (1857-1925), Paul Oberlercher (1859–1915), Karl Wenschow (1884-1947), Eduard Imhof (1895-1986). [vgl. GYG-37] [IMH-81] [MAI-06] [NIE-02]

## 1.1 Problemstellung

In der Literatur wird immer wieder darauf verwiesen, dass die Menge an guten Reliefbauern äußerst gering ist. Auch Mair stellte dieses Problem fest: „Seit Jahren versuche ich, junge Leute zu dieser sinnvollen Arbeit zu animieren. Leider war für alle Aspiranten die Arbeit zu streng, sie waren nicht bereit durchzuhalten, bis sie einen ersten Erfolg hätten erleben

können. Doch man soll die Hoffnung nicht aufgeben. Es gab früher nur einzelne, welche gute Reliefs fertigten, es werden in der Zukunft auch wieder nur einzelne sein“ [MAI-09]. Neben dem Mangel an „Fachkräften“ stellt aber auch der große Arbeitsaufwand der mit hohen Kosten verbunden ist, in gewisser Art und Weise ein Hindernis im manuellen Reliefbau dar. Somit bietet die Herstellung von Landschaftsmodellen mittels 3D-Drucker eine kostengünstigere Alternative wie Rase schreibt: „Die Einzelstücke von Toni Mair sind vorwiegend für Anwendungen gedacht, bei denen sich die hohen Fertigungskosten amortisieren lassen, etwa in Museen oder Ausstellungen... Die Technik des 3D-Druckens ermöglicht jetzt die individuelle Herstellung von Reliefmodellen von jedem Ausschnitt der Erdoberfläche zu vertretbaren Kosten für das Einzelstück [RAS-10].“ Computergenerierte Modelle bzw. Modelle aus dem 3D-Drucker setzen somit die klassischen Gipsmodelle unter Druck. Zemann schrieb bereits 1986 im Rahmen seiner Diplomarbeit, dass angesichts der technologischen und digitalen Entwicklungen „...dem (Gips)Relief als Hilfsmittel in der wissenschaftlichen Forschung kaum mehr Bedeutung“ zu kommt [ZEM-86]. Wie sieht dies aber fast 30 Jahre später aus? Die technischen Möglichkeiten verbessern sich stetig, eine exakte zweidimensionale Wiedergabe von steilen Geländeformen ist nicht möglich, dreidimensionale Modelle hingegen kommen der Realität näher, sowohl in Form von plastischen als auch virtuellen Darstellungen, die Grenze zwischen Realität und Virtualität schwindet zunehmendes. Im Rahmen dieser Masterarbeit soll auf die Entwicklung des Reliefbau eingegangen, die verschiedenen Herstellungsverfahren sowie ihre zu Grunde liegenden Daten diskutiert und die Unterschiede hinsichtlich der Qualität und Ausführung aufgezeigt werden.

## 1.2 Forschungsfrage

Aus der vorangegangenen Problemstellung ergibt sich folgende Forschungsfrage:

*„Welche Verfahren gibt es und welche eignen sich heute am besten für die Erstellung von Geländereliefs unter besonderer Berücksichtigung der zugrundeliegenden Geodaten?“*

Zusätzlich dazu gilt es folgende Arbeitsfragen zu beantworten:

*„Wie hat sich die Erstellung von Geländereliefs im Laufe der Zeit entwickelt?“*

*„Welche Daten liegen den Modellen zugrunde? Welche Anforderungen werden heute an Geodaten gestellt?“*

*„Sind Geländereliefs heute noch von Bedeutung? Welchen Zweck haben sie? Hat sich die Bedeutung verändert?“*

*„Sind manuell erstellte analoge Geländereliefs ein Anachronismus vergangener Tage oder immer noch von großer Bedeutung? Zahlt sich die manuelle Herstellung noch aus? Oder geht der Trend hin zu digitalen oder virtuellen Modellen?“*

*„Kann die digitale Erstellung von Reliefs mittels 3D-Drucker mit der Genauigkeit manueller Reliefs mithalten? Welche 3D-Druckverfahren gibt es und welche sind im Reliefbau am besten geeignet?“*

*„Vergleich zwischen analogen und digitalen Modellen! Welche Vor- und Nachteile gibt es?“*

### **1.3 Ziel der Arbeit**

Ziel der Arbeit ist es, die Entwicklung des Reliefbaues im alpinen Raum seit dem 16. Jahrhundert bis heute darzustellen sowie die Perspektiven und Trends der Zukunft zu diskutieren. Dabei sollen die bekanntesten und eindrucksvollsten Reliefs der letzten Jahrhunderte sowie der neueste Stand der Technik vorgestellt und auf deren Herstellungstechniken und -verfahren, zugrundeliegenden Daten sowie Anwendungsbereiche eingegangen werden. In Folge dessen werden die verschiedenen Reliefarten und Techniken gegenübergestellt. Es soll ein Vergleich zwischen analog bzw. manuell hergestellten sowie maschinell als auch digital hergestellten Modellen durchgeführt werden. Unter anderem werden folgende Kriterien verglichen: Datengrundlage, Materialeinsatz, Arbeitsaufwand, Kosten, Herstellungstechnik, Qualität, Genauigkeit, Ästhetik, Anwendungsbereiche, Arbeitsgeräte, etc. Des Weiteren ist zu klären, ob bzw. welche Bedeutung oder Zweck den Landschaftsmodellen generell heute noch zu kommt und wie sich diese Bedeutung im Laufe der Zeit womöglich geändert hat. Übergeordnetes Ziel der Arbeit ist somit die Aufarbeitung der historischen, aktuellen und sich entwickelnden Herstellungsverfahren um das optimalste Verfahren (sofern es dieses gibt) zur Erstellung von Geländereiefs und -modellen herauszufinden.

### **1.4 Methodik und Problemlösungsweg**

Zu Beginn der Arbeit werden in einem theoretischen Teil das Themengebiet im wissenschaftlichen Kontext der Kartographie eingeordnet und wichtige Begriffe definiert und abgegrenzt. Mittels Literaturrecherche sollen die historische Entwicklung im Reliefbau seit dem 16. Jahrhundert bis heute sowie aktuelle Entwicklungen aufgearbeitet und besondere Reliefkünstler vorgestellt werden. Bevor näher auf die Herstellungsverfahren eingegangen werden kann, müssen noch die zu Grunde liegenden Geodaten beschrieben werden. Nachdem nun die möglichen Datenquellen bekannt sind, wird deren Veredelung bzw. Weiterverarbeitung im Kapitel der Herstellungsverfahren aufgezeigt. Sowohl die Vor- und Nachteile als auch die Anwendungsbereiche der einzelnen Herstellungsverfahren werden ausgearbeitet. In einem praktischen Teil werden mittels deskriptiver Analyse die „Klassiker“ unter den Geländereiefs präsentiert und mit Modellen die auf dem neusten Stand der Technik basieren verglichen.

## 2 Begriffsdefinitionen und Abgrenzung des Themas

Das zentrale Thema dieser Arbeit sind Geländereiefs, die den kartenverwandten Ausdrucksformen zuzuordnen sind. Um die Inhalte abgrenzen zu können, werden im folgenden Kapitel wichtige Begriffe definiert und das Themengebiet im Kontext der Kartographie eingeordnet.

### 2.1 Kartographie

Die Kartographie hat ihre Ursprünge bereits im Altertum, allerdings sind nur wenige Darstellungen aus dieser Zeit überliefert. Im Laufe der Zeit änderten sich nicht nur die Techniken in der Kartographie und die damit verbundenen Darstellungsformen, sondern auch deren Aufgaben sowie die einhergehende Definition dieser Wissenschaft. Emil Meynen (1902-1994) definierte im Jahr 1949 die Kartographie wie folgt:

*„Der Begriff Kartographie, wie er heute in Anwendung ist, umfasst alle Arbeiten, die mit der kartographischen Bearbeitung der topographischen Aufnahme und kartenmäßigen Umarbeitung in kleinere Maßstäbe, mit der Zeichnung und Vervielfältigung von Karten und **kartenähnlichen Darstellungen** zusammenhängen. Kartographische Arbeit setzt geodätische Messung, die wissenschaftlichen mathematischen Grundlagen der Kartenprojektionen und topographische Erkundungen bei großmaßstäblichen Karten bzw. geographische Landesforschung bei kleinmaßstäblichen Karten voraus [KRI-09: Kap.1: 1].“*

Meynen führte lediglich topographische Erkundungen und geographische Landesforschung an. Die Aspekte der thematischen Kartographie erwähnte er nicht. Er unterschied jedoch zwischen Karten und kartenähnlichen Darstellungen. Im Gegensatz zur UNO (United Nations Organization). Die Organisation der Vereinten Nationen führte in ihrer Definition aus dem Jahr 1949 lediglich Karten und Pläne an, kartenähnlichen Darstellungen bzw. kartenverwandte Ausdrucksformen wurden hier nicht berücksichtigt. Außerdem endet der kartographische Arbeitsprozess laut dieser Definition mit dem Druck von Kartenblättern. Somit wäre der Bau von Reliefs nicht der Kartographie zugehörig:

*„Die Kartographie wird als die Wissenschaft der Herstellung aller Arten von Karten und Plänen angesehen; sie umfasst jede Tätigkeit von der Originalaufnahme an bis zum endgültigen Druck von Kartenblättern [WIT-79: 301].“*

Wilfried Krallert (1912-1969) definierte im Jahr 1963 den Begriff der Kartographie äußerst knapp und bezog sich ebenfalls lediglich auf die Karte:

*„Kartographie ist die Kunst und Technik der Kartenherstellung [WIT-79: 302].“*

Heinz Schmidt-Falkenberg schloss hingegen in seiner Definition aus dem Jahr 1964 wieder die kartographischen Ausdrucksformen mit ein. Auch der thematischen Kartographie

schenkte er indirekt durch die Worte „Beobachtungs- und Forschungsergebnisse der einzelnen Fachwissenschaften“ Beachtung, (dem Raumbezug dieser Ergebnisse jedoch nicht):

*„Die Kartographie ist eine Wissenschaft, die sich mit der graphischen Darstellung von Beobachtungs- und Forschungsergebnissen befasst... In Karten und in allen anderen **kartographischen Ausdrucksformen** kommen Beobachtungs- und Forschungsergebnisse der einzelnen Fachwissenschaften zur Darstellung. Die Entwicklung von Grundsätzen, nach denen diese Darstellung erfolgen soll, ist die grundlegendste Aufgabe der Kartographie [WIT-79: 302].“*

Auch Konstantin Alexejewitsch Salichtchev (1905-1988) bezog sich in seiner Definition aus dem Jahr 1967 sowohl auf Karten als auch auf kartographische Darstellungen und schloss erstmals auch die Benutzung dieser kartographischen Produkte mit ein:

*„Gegenstand der Kartographie sind die Karten und überhaupt die **kartographischen Darstellungen** als besonderes Verfahren der Abbildung der Wirklichkeit. Die Kartographie schließt in ihre Hauptaufgaben die allseitige Untersuchung des Wesens der Karten ein sowie die Erarbeitung von Methoden und Prozessen bei ihrer Schaffung und Benutzung [WIT-79: 302].“*

Erik Arnberger (1917-1987) definierte im Jahr 1975 den Begriff der Kartographie als...

*„...die Lehre von der Logik, Methodik und Technik der Konstruktion, Herstellung und Ausdeutung von Karten und anderen **kartographischen Ausdrucksformen**, die geeignet sind, eine räumlich richtige Vorstellung von der Wirklichkeit zu erwecken [WIT-79: 302].“*

Auch Arnberger erwähnte in seiner Definition neben der Karte, die kartographischen Ausdrucksformen. Sprach Salichtchev erstmals von der „Abbildung der Wirklichkeit“, so ging Arnberger einen Schritt weiter und verlangte der Kartographie eine „**räumlich richtige** Vorstellung von der Wirklichkeit zu erwecken“ ab. Die ICA (International Cartographic Association, deutsch: Internationale Kartographische Vereinigung (IKV)) veröffentlichte im Jahr 1967 folgende Definition von Kartographie:

*„Theorie, Facherfahrung und Technik der Kartenherstellung, des Inhaltes und der graphischen Gestaltung von Karten und **kartenverwandten Erzeugnissen** sowie die Lehre von Kartenbenutzung und Kartengeschichte [KRI-09: Kap.1: 2].“*

Wurden in dieser Definition sowohl Karten als auch kartenverwandten Erzeugnisse beachtet, so wurde in der aktualisierten Definition aus dem Jahr 1995 wieder darauf verzichtet:

*„Cartography is the discipline dealing with the conception, production, dissemination and study of maps [ica-14].“*



Demnach beschäftigt sich die Kartographie mit der Konzeption, Produktion und Veröffentlichung von Karten sowie mit der Lehre vom Gebrauch dieser Karten. Auch die aktuellste Definition aus dem Jahr 2003 geht nicht auf kartenverwandte Ausdrucksformen ein:

*„Cartography is the discipline dealing with the art, science and technology of making and using maps [ica-14].“*

Wie an den vorangegangenen Beispielen ersichtlich ist, gibt es keine einheitliche, allumfassende Definition für den Begriff Kartographie. Falls der Aspekt der kartenverwandten Darstellungen beachtet wurde, so wurden über die letzten sieben Jahrzehnte hinweg, die verschiedensten Ausdrücke, wie etwa kartenähnliche Darstellungen, kartographische Ausdrucksformen, kartographische Darstellungen oder kartenverwandte Erzeugnisse, dafür verwendet. Angesichts der Tatsache, dass die Wissenschaft und vor allem jene der Kartographie, eine sich ständig entwickelnde Disziplin darstellt, kann die Kartographie gegenwärtig als „...ein Fachgebiet, das sich befasst mit dem Sammeln, Verarbeiten, Speichern, und Auswerten raumbezogener Informationen sowie in besonderer Weise mit deren Veranschaulichung durch kartographische Darstellungen“ beschrieben werden [HAK-02: 3]. Infolge neuer Techniken wird die Vielfalt der kartographischen Darstellungen stetig um neue Ausdrucks- und Anwendungsmöglichkeiten erweitert. Auch die Möglichkeiten der multimedialen Präsentation nehmen zu. Sei es in Form von Animationen, akustischen Erweiterungen, Bildschirmpräsentationen oder interaktiven Gestaltungsmöglichkeiten. [vgl. HAK-02: 4] Das folgende Kapitel widmet sich der Fülle an kartenähnlichen Darstellungen.

## **2.2 Kartenverwandte Ausdrucksformen**

Unter kartenverwandten Darstellungen oder auch Ausdrucksformen sind im Allgemeinen alle kartographischen Darstellungen, die es neben der Karte gibt, zu verstehen. Kartenverwandte Ausdrucksformen lassen sich in ebene (zweidimensionale) und körperhafte (dreidimensionale) Darstellungen gliedern. Es sind sowohl statische als auch dynamische Darstellungen möglich [HAK-02: 31]. Bei den zweidimensionalen kartenverwandten Ausdrucksformen sind Luft- und Satellitenbilder, Vogel- und Satellitenperspektiven, Panoramen, Blockbilder, Axonometrien, Profile, Stereodarstellungen sowie kartographische Anamorphosen zu nennen. Reliefs und Globen sind den dreidimensionalen Darstellungen zuzuordnen. Die graphische Darstellung reicht von der exakten Strichzeichnung (Profil) über Fotos (Luftbild), bildhaft-künstlerische Darstellungen (Vogelperspektive) bis zur plastischen Nachbildung der Erdoberfläche (Relief). Karten und kartenverwandte Ausdrucksformen ergänzen einander und bieten somit einem breiten Benutzerkreis die Möglichkeit das Raumverständnis zu vertiefen. Gemeinsamkeiten zwischen Karte und kartenverwandten Darstellungen bestehen hinsichtlich des Objekt- und Maßstabbereiches. Die Objektinformationen können unter

anderem aus vorhandenen Karten, Fotos, digitalen Daten oder Satellitenbildern stammen und in Kombination mit Tabellen, Texten oder akustischen Ergänzungen zu kartenverwandten Ausdrucksformen weiterverarbeitet werden. Kapitel 4 gibt einen genaueren Einblick darüber, welche Geodaten sich als Quell- bzw. Inputdaten eignen. Unterschiede zur Karte bestehen hinsichtlich:

- geometrischer Eigenschaften (Kartenprojektion und Kartenanamorphose),
- verwendeter Darstellungsdimension (ebene, körperliche und bewegte Darstellung),
- der Gestaltungsstile (abstrakte und fotorealistische Darstellungen),
- der Gestaltungsmedien (monomediale und multimediale Darstellungen) oder
- medienbedingter Wahrnehmungsformen (sensorisch, motorsensorisch und nicht-sensorisch). [vgl. HAK-02: 31, 175f.]

Vor allem der geometrische Unterschied hinsichtlich der Projektion und der Lage der Abbildungsebene ist hervorzuheben. Eine Karte entsteht als senkrechte Parallelprojektion (Grundrissbild) auf eine horizontal gedachte Bezugsfläche und deren anschließende Abbildung in die Ebene, was einer senkrechten Axonometrie entspricht. Angaben zur Höhe bzw. der dritten Dimension (z-Koordinate) können nur indirekt durch Zahlen oder Isolinien gemacht werden. [vgl. HAK-02: 25f., 88] Ebene kartenverwandte Darstellungen basieren entweder auf einer Parallel- oder einer Zentralprojektion. Die Projektionsebene kann sowohl horizontal, vertikal als auch schräg vorliegen. Je nach Projektion und Lage der Bildebene ergeben sich verschiedene ebene kartenverwandte Darstellungen (siehe Tabelle 1).

GLIEDERUNG DER EBENEN KARTENVERWANDTEN AUSDRUCKSFORMEN			
Projektionsart	Lage der Bildebene		
	horizontal	schräg	vertikal
Parallelprojektion senkrechte Axonometrie ( <i>senkrecht zur Projektionsebene</i> )	Karte, Stereodarstellung	Blockbild	Profil
schiefe Axonometrie ( <i>schräg zur Projektionsebene</i> )	Militärperspektive	-	Kavaliersperspektive
Zentralprojektion	Senkrecht-Luftbild	Schräg-Luftbild, Vogelperspektive	Panorama

Tabelle 1: Gliederung der ebenen kartenverwandten Ausdrucksformen nach Hake [2002: 176] und Kriz [2013: Kap.4: 15ff.]

In der Veranschaulichung der Erdoberflächenformen sind die körperhaften bzw. dreidimensionalen kartenverwandten Ausdrucksformen den ebenen überlegen (siehe Abbildung 1). Selbst bei den räumlich wirkenden Stereobildern kann es durch visuelle Effekte zu Täuschungen bzw. Fehlinterpretationen des Bildes kommen.

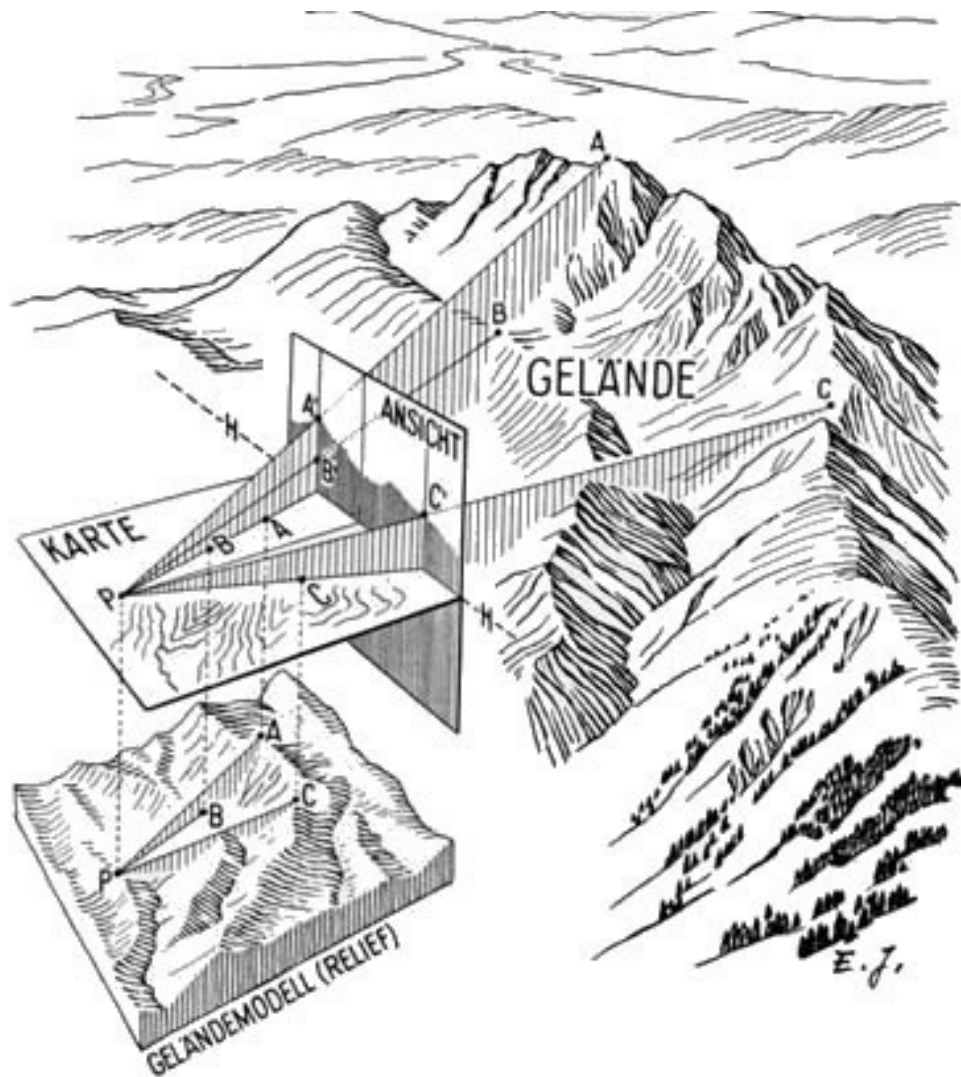


Abbildung 1: Gelände - Karte - Relief [IMH-63:55]

Abgesehen davon ist nicht jeder Mensch in der Lage (auf Grund von Fehlsichtigkeit), Stereodarstellungen auch dreidimensional erkennen zu können. Außerdem sind der Beobachtungsstandort sowie die Betrachtungs- und Beleuchtungsrichtung fix vorgegeben. Relief und Globus können hingegen aus jeder beliebigen Richtung betrachtet werden. Globen können in Kartengloben und Reliefgloben unterschieden werden. Beim Kartenglobus wird die Oberflächenform der Erde oder eines anderen Himmelskörpers als zweidimensionale ebene Karte, die in Meridianstreifen geteilt ist, auf einen dreidimensionalen Körper in Form einer Kugel abgebildet. Im Gegensatz dazu bildet der Reliefglobus auch die Oberflächenform in dreidimensionaler Gestalt ab. Aufgrund des eher kleinen Kugeldurchmessers wird die Oberfläche von Reliefgloben meist stark überhöht dargestellt. Die Globuskugel kann zum Beispiel aus Pappe, Glas, Kunststoff oder Metall hergestellt werden. Globen sind völlig verzerrungsfrei und an jeder Stelle flächen-, winkel- und streckentreu. Sie entstehen geometrisch als zusammengefügte Abbildung von

sphärischen Zweiecken oder durch thermoplastische Verformung. Reliefs hingegen entstehen geometrisch als geschlossene Abbildung durch eine senkrechte Parallelprojektion auf eine horizontale Ebene. [vgl. ARN-66: 403ff.] [HAK-02: 31, 88, 95, 195ff.] [IMH-72: 289ff., 298ff.]

Abbildung 1 zeigt unter anderem ein Relief. Hier wird deutlich sichtbar, dass das Geländemodell eine verkleinerte plastische dreidimensionale Nachbildung des Geländes darstellt. Auch die Strahlen der Parallelprojektion sind zu erkennen. Die von Imhof erstellte Abbildung veranschaulicht in schematischer Form weitere kartographische Ausdrucksformen. Oberhalb des Reliefs ist etwa eine Karte sichtbar. Diese stellt die Erdoberfläche als eine zweidimensionale konstruktiv-zeichnerische Abbildung dar. Sowohl bei Relief als auch Karte liegt die Bildebene horizontal vor. [vgl. IMH-63: 55] Des Weiteren wird zwischen der Karte und dem Gelände ein Ausschnitt einer Panoramaansicht mit vertikaler Bildebene abgebildet. Auch die Strahlen der Zentralprojektion sind hier zu erkennen. Da das Geländemodell in der Grafik nur in zweidimensionaler Form wiedergegeben werden kann, ist es zugleich ein Beispiel für ein Blockbild, welches genauso wie die Karte und das Relief mithilfe einer Parallelprojektion erstellt werden kann. Das folgende Kapitel geht näher auf die Eigenschaften und Charakteristiken von Reliefs ein.

## 2.3 Reliefs

Das Wort Relief kommt aus dem Französischen und bedeutet „plastisch herausgearbeitetes Bild [MAI-06: 11].“ Darunter versteht man eine dreidimensionale, verkleinerte, naturgetreue plastische Nachbildung eines Teils der Erdoberfläche, die im Grundriss maßstabsgetreu ist. Das Relief kann aus allen Richtungen und unter wechselnder Beleuchtung betrachtet werden. Der Betrachtungsstandort kann schneller und einfacher gewechselt werden als in der Natur selbst. Im geographischen Sinn versteht man unter dem Begriff Relief aber auch die Gesamtheit der kontinentalen und submarinen Oberflächenformen der Erde. Daher werden synonym für das Relief als kartographische Ausdrucksform auch die Begriffe Geländereief, Landschaftsrelief, Geländemodell, Landschaftsmodell, Reliefmodell, Raummodell, Hochbild oder Geoplastik (im 19. Jahrhundert) in der deutschsprachigen Literatur angeführt. Mair definierte das Landschaftsrelief als...

*„...die gegenständliche, dreidimensionale Darstellung eines Landschaftsausschnitts, der in Maßstab, Gestaltung der Morphologie und geographisch-inhaltlicher Ergänzung der Natur entspricht oder die geologische Situation beinhaltet [MAI-06: 11].“*

Das Relief ist somit die anschaulichste kartographische Abbildung der Erdoberfläche. Je nach inhaltlicher Oberflächengestaltung ergeben sich zwei Typen von Reliefs - das topographische Relief und das geologische Relief. Das **topographische Relief** bildet die Landschaft am naturgetreuesten ab, wodurch der Betrachter das Gefühl bekommt, er könne das Gelände wie von einem Flugzeug aus beobachten. Die Morphologie ist originalgetreu

nachgebildet. Es werden topographische Inhalte, wie Gewässer, Gletscher und Vegetation, sowie kulturlandschaftliche Objekte, wie Siedlungen, Straßen oder Felder, abgebildet und naturähnlich bemalt. Auch bei den **geologischen Reliefs** wird die Morphologie exakt ausgeführt. Die natürlich gestaltete Oberfläche wie sie in der Natur zu sehen ist, allerdings nicht - mit Ausnahme von Gewässern und Gletschern. Stattdessen wird die Landschaft je nach Gesteinsart, die unterhalb von Boden und Vegetation zu sehen wäre, bemalt. Ähnlich wie in geologischen Karten werden auch hier tektonische Grenzen gekennzeichnet. Eine weitere Art ist das **Typenrelief** oder auch **Unterrichtsrelief** genannt. Dabei handelt es sich um einen Ausschnitt eines Landschaftselementes. In vereinfachter Form und ohne bestimmten Maßstab werden zum Beispiel Gletscher, Vulkane oder Canyons dargestellt. [vgl. IMH-68: 17] [IMH-72: 298] [KRE-86: 659] [MAI-06: 11] [WIL-90: 21] [WIT-79: 492] [spe-01: Reliefmodell]

Nach Imhof lassen sich Geländereliefs in sechs unterschiedliche Typen je nach plastischer oder zeichnerisch-malerischer Oberflächengestaltung unterscheiden (siehe Abbildungen 2-7):

- Horizontalplatten- oder Treppenstufenreliefs (=Stufenreliefs)
- Vertikal- oder Profilplattenreliefs
- Ausmodellerte Reliefs ohne Darstellung der Oberflächenbedeckung
- Reliefs mit Oberflächenbedeckung und naturähnlich bemalt (=topographische Reliefs)
- Reliefs mit aufgezeichneten oder aufgedruckten Karten (=Kartenreliefs)
- Thematisch bemalte Reliefs (=geologische Reliefs) [vgl. IMH-63: 87f.]

Einige dieser Relieftypen überschneiden sich mit jenen von Mair, jedoch zählt das (Treppen)**Stufenrelief** für ihn nicht zu den Geländereliefs, da es „diese Art von Landschaft, nämlich eine mit gleichmäßigen Stufen, nicht gibt [MAI-06: 11].“ Gleiches gilt für **Profilplattenreliefs**. Nach Penck sind Stufenreliefs „Gerippe, denen das Fleisch fehlt“ und denen man „den Rang von wirklichen Nachbildungen der Erdoberfläche nicht anerkennen könnte [PEN-04: 38].“ Auch Gyax ist ähnlicher Meinung betreffend der Stufenreliefs; hierbei handelt es sich „um Hochbilder, die nicht ausmodelliert sind, sondern einzig das kartographische Gerüst zeigen [GYG-37: 12].“ Außerdem fügt Gyax der Gruppe der topographischen Reliefs, noch die **Aufnahmereliefs** hinzu. Darunter ist eine völlig ausmodellerte Reliefarbeit, die allerdings ohne kartographische Unterlagen direkt nach der Natur erstellt wurde, zu verstehen. [vgl. GYG-37: 11] Neben den topographischen Reliefs (inklusive Aufnahmereliefs) und den Stufenreliefs führt er noch die Gruppe der **Kartenreliefs** an. Nach Gyax, Imhof und Mair sind darunter Geoplastiken mit aufgezeichneten, -geklebten oder -gedruckten topographischen Karten zu verstehen. Gyax [1937: 81] beschreibt diese Reliefs als „... ungenau und erreichen bei weitem nicht den Grad der Naturtreue und Vollkommenheit, den die zweidimensionale, nicht plastische Karte im gleichen Maßstab aufweisen kann.“ Er stellt somit in Frage, ob es sinnvoll ist ein rein orographisch gehaltenes Gipsrelief mit der entsprechenden topographischen Karte zu

überkleben. In der Literatur wird außerdem darauf hingewiesen, dass die Bezeichnung irreführend ist, da sie leicht mit dem Begriff Reliefkarte verwechselt wird. Die Reliefkarte steht allgemein für eine zweidimensionale topographische Karte mit Schummerung der Geländedarstellung. [vgl. MAI-06: 11f.] [GYG-37: 12] Witt hingegen verwendet die Begriffe Kartenreliefs und Reliefkarte synonym und beschreibt damit eine Kunststoffolie, auf die eine Karte aufgedruckt ist (siehe Abbildung 8). Die Folie wird im Vakuum gegen ein Modell gepresst um dessen Form anzunehmen. [vgl. WIT-79: 493] Auf die verschiedenen Herstellungsverfahren wird dann in Kapitel 5 ausführlich eingegangen. Nachdem nun die geometrischen Eigenschaften von Karte und Relief bekannt sind sowie deren Definitionen diskutiert wurden, wird im folgenden Kapitel der Frage nachgegangen, wo die Unterschiede bzw. Vorzüge zwischen dreidimensionalem Geländereief und zweidimensionaler Karte liegen.

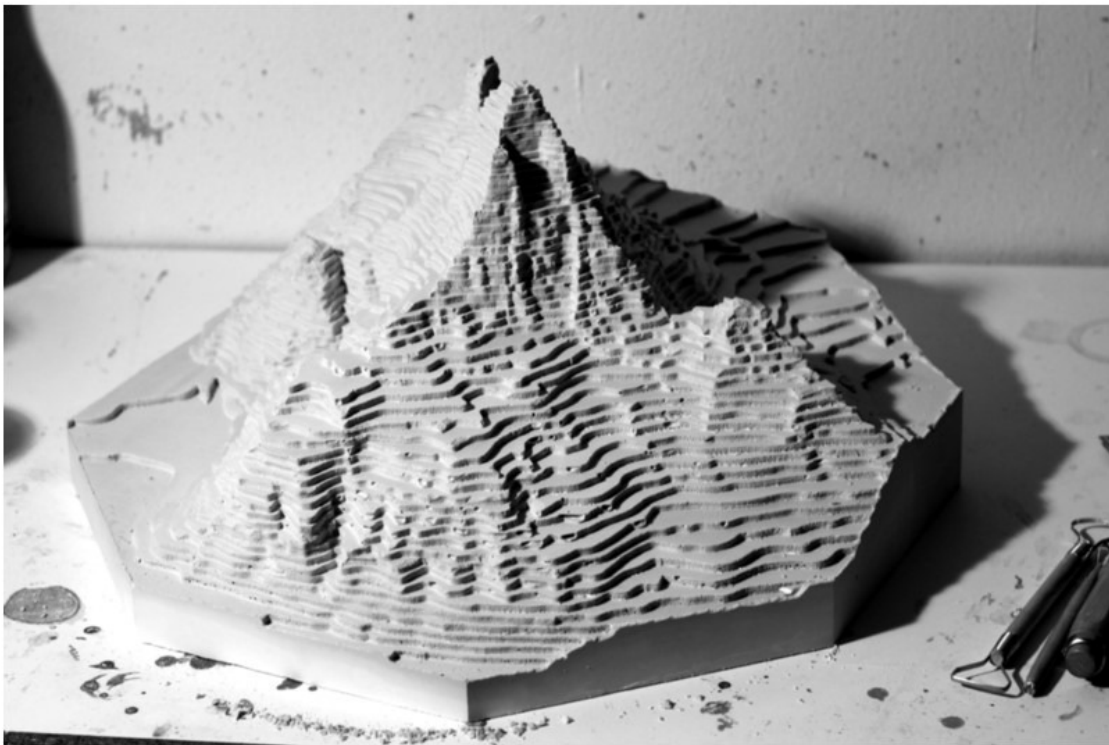


Abbildung 2: Treppenstufenmodell des Shivling (6.543 m Höhe) im Garhwal Himal in Indien im Maßstab 1:10.000, 50 x 50 cm, Achteck [pus-18a]



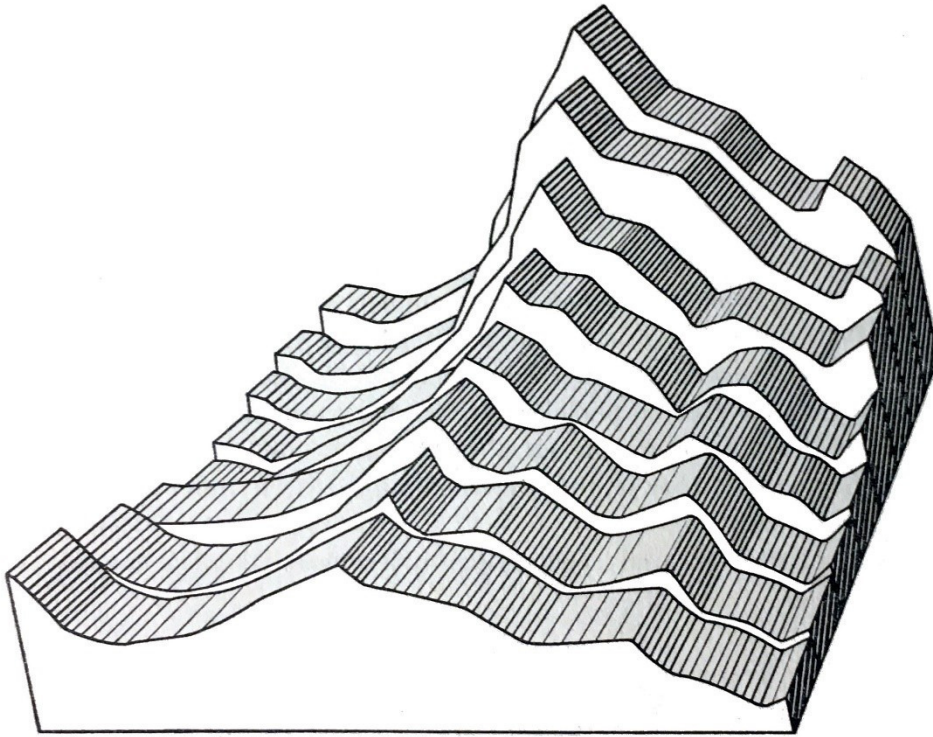


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Vertikal- oder Profilplattenreliefs [IMH-63: 88]

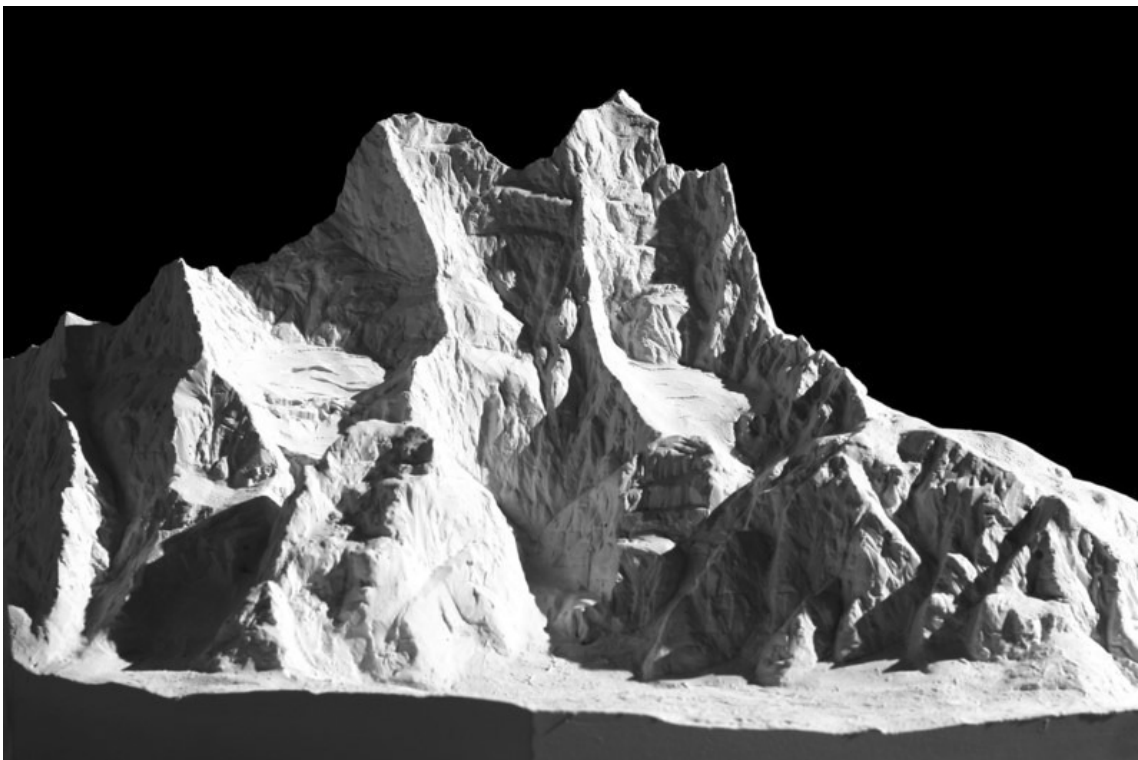


Abbildung 4: Ausmodelliertes Relief ohne Darstellung der Oberflächenbedeckung des Shivling (6.543 m Höhe) im Garhwal Himal in Indien im Maßstab 1:10.000, 50 x 50 cm, Achteck [pus-18a]



Abbildung 5: Relief mit Oberflächenbedeckung und naturähnlich bemalt (=topographische Reliefs) des Shivling (6.543 m Höhe) im Garhwal Himal in Indien im Maßstab 1:10.000, 50 x 50 cm, Achteck [pus-18a]

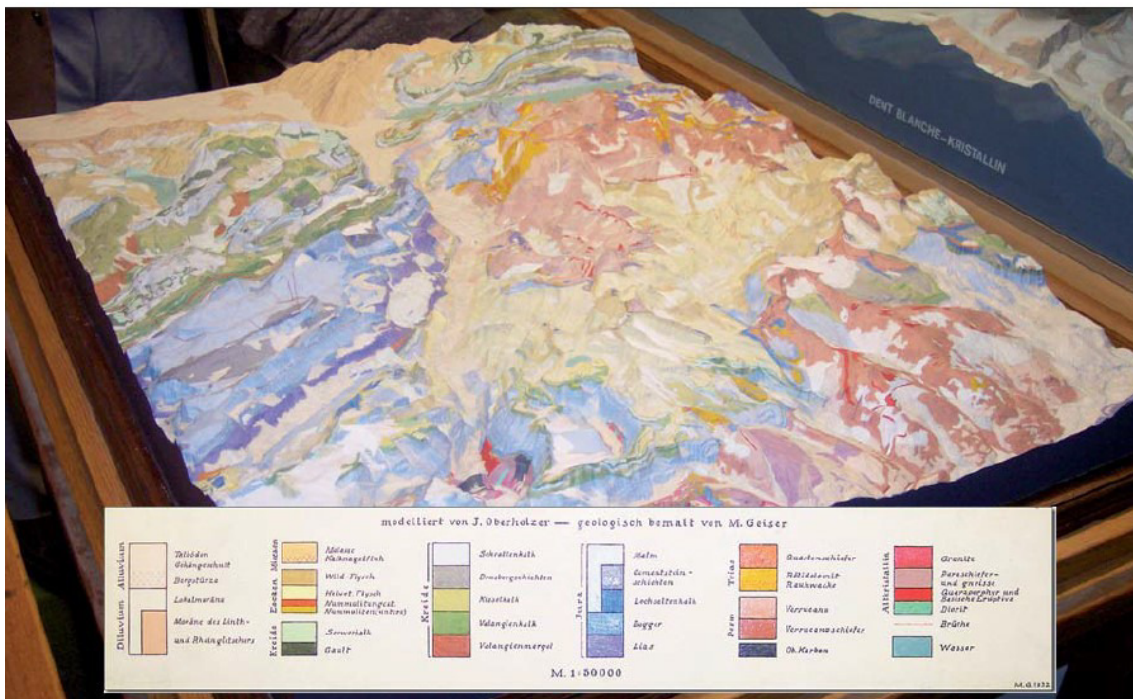


Abbildung 6: Thematisch bemaltes Relief (=Geologisches Relief) der Glarner Alpen von Jakob Oberholzer, 1911, im Maßstab 1:50.000, 70,5 x 95 cm, geologisch bemalt von Max R. Geiser samt Legende, Fotomontur von Stefan Räber [RÄB-08: 189]





Abbildung 7: Kartenrelief mit aufgedruckter Karte. Ausschnitt des Eiger, Mönch und Jungfraureliefs von Ernst Schefer, Maßstab 1:15.000, Masse: 86 x 96 cm, Äquidistanz 20 m [ern-18]





Abbildung 8: Reliefkarte nach Witt: Kunststofffolie, auf die eine Karte aufgedruckt ist und mittels Vakuum geformt wurde, Salzammergut im Maßstab: 1:300.000, 385 x 290 x 15 cm, Überhöhungsfaktor: 1,4 [ger-18]

## 2.4 Gegenüberstellung Karte - Relief / 2D vs. 3D

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, kann die Erdoberfläche sowohl in zweidimensionaler als auch dreidimensionaler Form mittels kartographischer Darstellung wiedergegeben werden. Den zweidimensionalen Darstellungen sind neben der Karte eine Vielzahl an kartenverwandten Darstellungen zuzuordnen (siehe Tabelle 1). Die Vielfalt der echten dreidimensionalen kartographischen Darstellungen ist mit Globus und Relief sehr überschaubar. Allerdings gibt es noch einige andere Darstellungsmöglichkeiten, die einen dreidimensionalen Eindruck der Erdoberfläche vermitteln und an dieser Stelle aus Gründen der Vollständigkeit genannt werden sollen: Anaglyphenbilder, Holographien, sowie virtuelle dreidimensionale Modelle, wie etwa in (Computer-)Animationen, Google Earth oder Virtual Reality Brillen. Im Folgenden sollen die Vor- und Nachteile bzw. Unterschiede von zwei- und dreidimensionalen Darstellungen respektive Karte und Relief aufgezeigt werden. Aus geometrischer Sicht entstehen sowohl Karte als auch Relief als senkrechte Parallelprojektion auf eine horizontale Ebene (siehe Abbildung 9). [vgl. HAK-02: 88]

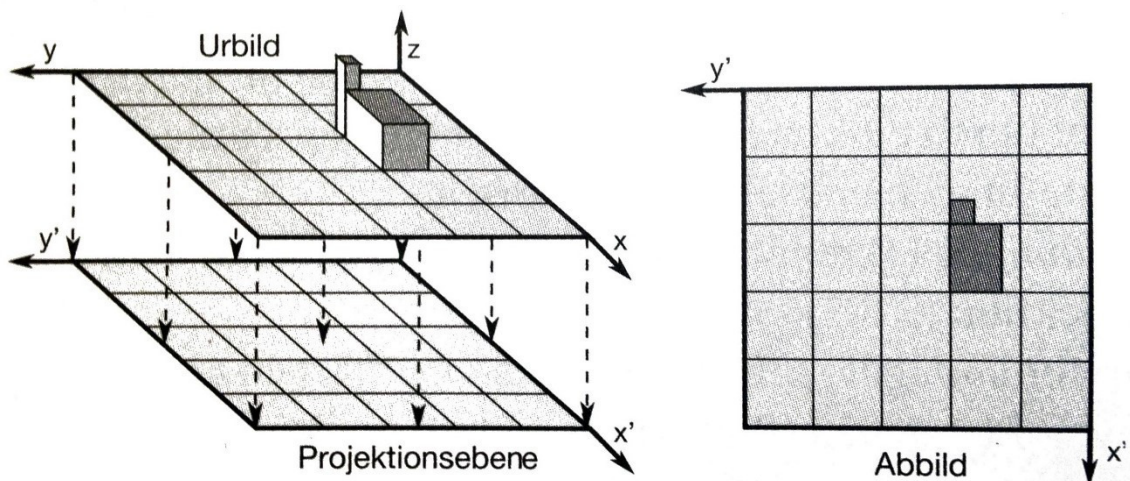


Abbildung 9: Senkrechte Parallelprojektion auf eine Horizontalebene [HAK-02: 88]

Räumliche Objekte werden dabei als orthogonale Parallelperspektive abgebildet, die Objektkoordinaten  $x, y, z$  als senkrechte Axonometrie [HAK-02: 88]. Objekte werden grundrisstreu in der  $x, y$ -Ebene (längen-, flächen- und winkeltreu) dargestellt, in der Karte in abstrakter Form, im Relief als naturgetreue Nachbildung.  $Z$ -Koordinaten werden in der Karte nur indirekt durch Zahlen oder Isolinien abgebildet. Im Relief sind die Höhenunterschiede im gleichen Verhältnis wie in der Natur bzw. maßstäblich verkleinert wiedergegeben. In seltenen Fällen kommt es zur Reliefüberhöhung. Diese ist nach Imhof und Mair allerdings nur für außeralpine Reliefs in kleinen Maßstäben zulässig. Eine Überhöhung widerspricht der Naturgetreue und erzeugt merkwürdige morphologische Formen. Für Reliefs die flache Gebiete in einem kleinen Maßstab abbilden, kann eine Überhöhung aus visuellen Gründen notwendig sein und sollte bei Maßstäben zwischen 1:100.000 und 1:500.000 das Zweifache nicht überschreiten. Für Mair ist die „Unsitte“ des Überhöhens erst ab einem Maßstab von 1:500.000 und kleiner zulässig. [vgl. HAK-02: 88] [IMH-72: 299] [MAI-06: 85]

In der Hochgebirgskartographie ist sicherlich die zweidimensionale topographische Karte die am häufigsten verwendete Darstellungsform. Aber ist sie auch die anschaulichste und naturgetreueste Form? Besonders in gebirgigen Regionen ist eine exakte zweidimensionale Darstellung der Erdoberfläche nur bedingt möglich. In steilem Gelände mit senkrechten Wänden bzw. großem Böschungswinkel, wie etwa am Watzmann in den Berchtesgadener Alpen (siehe Abbildung 10) kann eine zweidimensionale Karte die Felsformationen nur schematisch wiedergeben. Ausdehnung und Grundriss der Gebirgsstöcke bleiben dabei erhalten und sind geometrisch genau übertragbar. Überhänge oder Vorsprünge im Fels gehen allerdings verloren. Eine exakte zweidimensionale Darstellung von steil geneigten Formen im Grundriss ist umso weniger durchführbar, je größere Böschungswinkel vorhanden sind. Der höchste abbildbare Böschungswinkel steht eng in Beziehung zum Kartenmaßstab. Für nahezu senkrechte Felswände bleibt die Karte (unabhängig vom Maßstab) aber immer schematisch. Eine vollkommene Gesamtvorstellung der Geländeform



ist lediglich durch eine plastische Darstellung, wie durch ein Hochbild oder Relief erreichbar.  
[vgl. GYG-37: 6] [PEN-04: 26]



Abbildung 10: Watzmann und Königssee, Foto mit Blickrichtung Südwesten [geo-11]



Abbildung 11: Ausschnitt rund um den Watzmann aus der ÖK50 [ama-18]



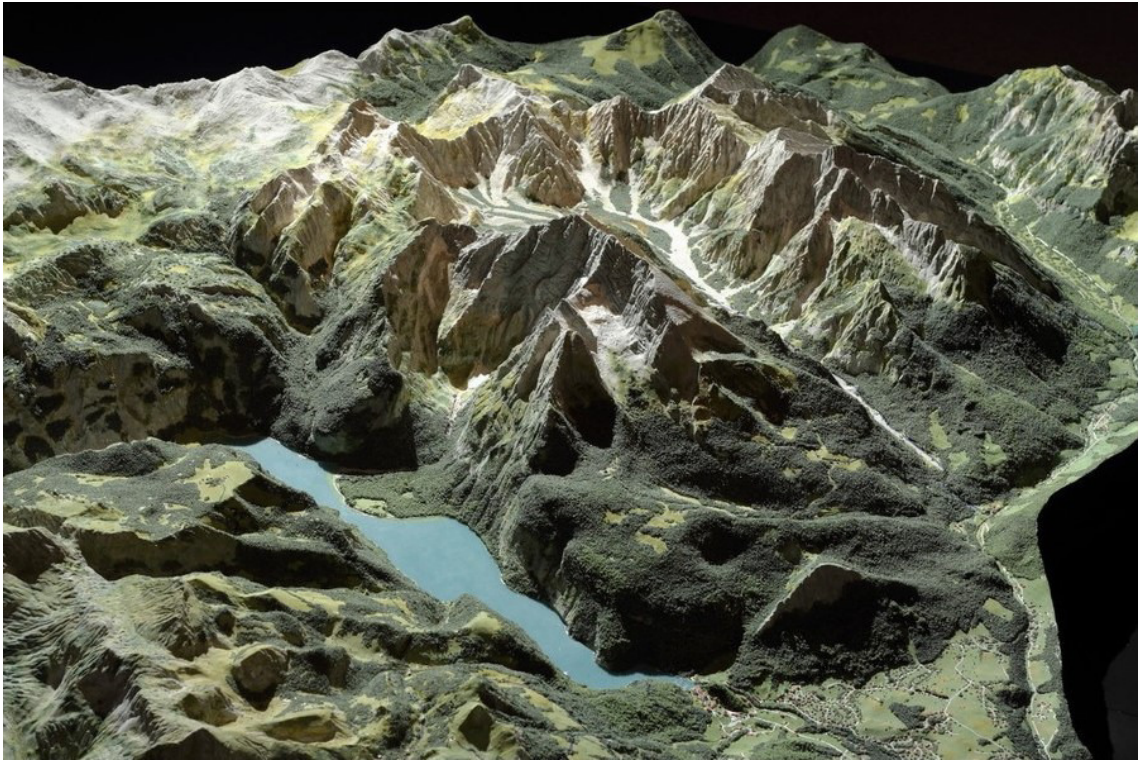


Abbildung 12: Watzmann Modell von Wolfgang Pusch [pus-18b]

In älteren Karten kamen daher des Öfteren Aufrisszeichnungen zum Einsatz. Diese eher ungenauen Zeichnungen wurden seit dem 19. Jahrhundert von Höhen- und Tiefenlinien, Höhenpunkten, Bruchkanten und Formlinien abgelöst um den Hochgebirgskarten einen plastischeren Eindruck zu vermitteln (siehe Abbildung 11).

Eine naturgetreue Nachbildung der Geländeoberfläche ist allerdings nur mittels echter plastischer Darstellung, durch Einbeziehung und Umsetzung der dritten Dimension möglich (siehe Abbildung 12). Die Abbildungen 10-12 zeigen den Unterschied zwischen realer Landschaft (bzw. in diesem Fall einem Foto), Hochgebirgskarte und naturgetreuer Nachbildung in Form eines Geländereiefs. Während zweidimensionale Darstellungen, wie etwa topographische Karten, zur Orientierung im Gelände herangezogen werden können, geben dreidimensionale Reliefmodelle lediglich einen Überblick über das Gelände und dessen Formenschatz. Auf Grund ihrer Maße und ihres Gewichts können sie im Gegensatz zur Karte nicht mit ins Feld genommen werden. Aus praktischer Sicht ist also die Karte dem Relief überlegen. Nicht nur hinsichtlich des Transports, auch die Vervielfältigung und die damit verbundenen Kosten sind um einiges geringer. Der Anschauungswert ist jedoch beim Relief höher und eindrucksvoller. Es ermöglicht ein fast gleichzeitiges Erfassen aller Geländeformen; Täler und Berge können von allen Seiten betrachtet werden. Dienten Reliefs anfänglich noch als Grundlage zur Kartenerstellung, für militärische Zwecke oder Grenzfestlegungen, so kommen sie heute in Schulen und Universitäten zum Einsatz oder werden in Museen, touristischen Einrichtungen oder Nationalparkzentren ausgestellt. Reliefs sind also weit mehr als eine Orientierungshilfe, sie dienen auch als Anschauungs- und

Kunstobjekt. [vgl. MAI-06: 13ff.] [GYG-37: 6ff.] Auch wenn der Satz: „Die Kunst ist eine Tochter der Freiheit.“ von Friedrich Schiller wohl häufig Zustimmung findet, so gibt es in der Reliefkunst doch einige Grenzen und Vorgaben, die sich auch in dieser Arbeit widerspiegeln und im folgenden Kapitel abgesteckt werden.

## **2.5 Abgrenzung des Themas**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vorrangig mit topographischen Reliefs im Alpen Raum mit Spezialisierung auf Modelle im großen Maßstab (bis 1:50.000). Kartenreliefs sind nicht der vorrangige Inhalt dieser Arbeit. Neben den in Kapitel 2.3 genannten Relieftypen, lassen sich Geländemodelle auch nach deren Herstellungsmethode (manuell, maschinell oder digital) unterscheiden, welche in Kapitel 5 erläutert werden. Für die Analyse und Gegenüberstellung der Geländereliefs werden ausschließlich physische Modelle herangezogen. Auf virtuelle Modelle und Darstellungen wird in der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen. Nachdem die Inhalte dieser Arbeit so gut wie möglich eingegrenzt wurden, kann sich das folgende Kapitel nun der Geschichte der Kartographie und der historischen Entwicklung des Reliefbaues widmen.

### 3 Historische Entwicklung des Reliefbaus

Die Entwicklung des Reliefbaus von den Anfangsstunden bis heute soll auf den kommenden Seiten anhand von beispielhaft ausgewählten Reliefbauern erläutert werden. Neben der Vorstellung einiger großartiger Relieftarbeiten wird auch ein Überblick über die Veränderung der Bedeutung und des Zwecks der Modelle in den vergangenen Jahrhunderten geboten. Doch vorab soll ein kurzer geschichtlicher Abriss über die allgemeine Entwicklung der Kartographie näher zum Thema hinführen.

Als die ältesten uns bekannten kartographischen Darstellungen gelten jene um ca. 3800 v. Chr. aus Babylonien. [vgl. HUR-99: 67ff.] Auf einer dieser mesopotamischen Tafeln aus Ton sind der Euphrat und sein Nebenfluss dargestellt. Die meisten dieser frühen Kartierungen haben wohl dem Zweck gedient, territoriale Besitzansprüche festzulegen. Seit dieser Zeit bis einschließlich heute haben sich nicht nur die Beweggründe der Kartierung geändert, sondern auch die angewandten Techniken und Darstellungsformen stetig weiterentwickelt. Dabei wurden vor allem der Darstellung und Übermittlung von dreidimensionalen Informationen besondere Bedeutung geschenkt. Waren genaue Breiten- und Längengradmessungen sowie die anschließende Abbildung dieser durch sich stetig weiterentwickelnde Messtechniken schon weitaus früher möglich, so brachte die exakte graphische Wiedergabe von Höhen- und Tiefeninformationen etwas mehr Schwierigkeiten mit sich. Den immer präziser werdenden zweidimensionalen Grundrissdarstellungen standen die stark vereinfachten Aufrisszeichnungen der Gebirgszüge gegenüber wodurch die Diskrepanz zwischen Wirklichkeit und Abbild stark sichtbar war. [vgl. HUR-99: 67ff.] [SCH-87: 157f.]

Auf einer Tonplättchenkarte, die das nördliche Mesopotamien um 2400-2200 v. Chr. darstellt, wurden die Berge etwa als Maulwurfshaufen in Seitenansicht eingeritzt. [vgl. IMH-65: 3f.] Die Maulwurfshaufen wurden dabei in Reihen angeordnet und jeweils senkrecht zur Talachse nach rechts oder links umgeklappt, also so wie man sie vom Tal aus sehen würde. Auch in Form von Sägezähnen versuchte man das Relief schemenhaft darzustellen und über vorhandene Gebirgszüge zu informieren. Genaue Formen sowie Höhenverhältnisse blieben dabei noch unberücksichtigt. [vgl. SCH-87: 158]

Die Methode der Maulwurfshaufen war bis ins Mittelalter die am häufigsten gebrauchte, auch wenn die Bergfiguren oftmals nur zur Dekoration leerer Flächen dienten. Durch ungenaues Kopieren der Maulwurfshügelketten entstanden in weiterer Folge zusammengefasste schraffierte Bänder oder Wülste, die freilich noch keinen dreidimensionalen Eindruck vermitteln konnten. Im Spätmittelalter wurde das Gebirge neben steinhauanartigen Gebilden vor allem durch übereinandergeschichtete Platten oder Tafeln dargestellt. Im 15. Jahrhundert nahm dann auch die Darstellung der umgeklappten Bergsignaturenreihen ab und wurde durch Anordnung derselben in Blickrichtung des Betrachters ersetzt. Zu den einzelnen Maulwurfshügeln und -ketten kamen flächenhafte Anhäufungen für große Gebirgszüge hinzu, wodurch sich die Fischschuppendarstellung

entwickelte. Diese Methode wurde dann durch kegelförmige und gezackte Maulwurfshaufen verbessert. Durch Variation von Form und Größe der Signaturen konnte man bereits Hoch- und Mittelgebirge grob unterscheiden. [vgl. IMH-65: 3f.]

Für Karten von Österreich klassifizierte Bernleithner nachfolgende Entwicklungsphasen der Geländedarstellung seit dem 4. bis zum 19. Jahrhundert. Die erste Entwicklungsstufe stellten buschartige Bergformen im 4. Jahrhundert dar. Um 1451 bis 1491 kamen vor allem Zackenberge im Aufriss zum Einsatz. Ab 1493 setzte die „Maulwurfshügelmanier“ ein. Diese wurde gefolgt von Schraffen (ab 1654) und Schummerung (ab 1761). Ab 1773 setzte die Terraindarstellung in Grundrissmanier, zum Teil mit Schrägbeleuchtung in licht gehaltenen Kreuzschraffen und Schwungstrichen, ein. Daraus entwickelte sich dann die Schraffenmanier mit senkrecht beleuchtetem Gelände (um 1813). Isolinien kamen zwar schon im 16. Jahrhundert erstmalig zum Einsatz, konnten sich aber nicht so kontinuierlich weiterentwickeln wie die Schraffenmethode. Erst während des 19. Jahrhunderts fand die Isolinienmethoden ihren festen Platz in der Kartographie und in weiterer Folge im Reliefbau. [vgl. SCH-87: 158]

Gegen Ende des 15. Jahrhunderts nahm das Verlangen nach inhaltsreicheren kartographischen Darstellungen (in größeren Maßstäben) zu. Durch die Erkundung der Berge durch Naturforscher und Maler konnten die Reliefformen individueller und zeichnerisch differenzierter wiedergegeben werden. Außerdem wurden nicht mehr nur einzelne Berge oder Bergketten isoliert dargestellt, sondern die gesamte Geländeoberfläche zusammenhängend samt Talformen, Wäldern und Ackerflurkonturen wiedergegeben. Die Seitenansicht bzw. Aufrisszeichnungen der Maulwurfshügel und Bergfiguren wurden langsam durch eine schräge vogelschauartige Abbildung abgelöst. Einen echten dreidimensionalen Eindruck konnte man allerdings auch hiermit noch nicht erzielen, da diese bildliche Darstellung nur die Ansicht von einem bestimmten Punkt aus wiedergab. [vgl. PEN-04: 26]

So beschäftigte man sich seit der Neuzeit mit dem Bau von Geländereiefs. Bis heute hat sich das Verhältnis zwischen Relief und Karte mehrfach verschoben. Wurden anfangs einige (Hochgebirgs)karten auf Basis von Geländereiefs erstellt, so dienten im 19. Jahrhundert vor allem Karten als Grundlage für die Erstellung von Reliefs. Modernere Herstellungsverfahren wie etwa der 3D-Druck bedienen sich an DGMs als Datengrundlage. Die folgenden Seiten sollen die historischen Entwicklungen im Reliefbau seit dem 16. Jahrhundert bis heute näher beleuchten.

### **3.1 Die Anfänge des Reliefbaus im 16. bis 18. Jahrhundert**

„Der Gedanke, ein bergiges Stück der Erdoberfläche bildlich darzustellen, ist an verschiedenen Orten unabhängig aufgetaucht und verwirklicht worden [GYG-37: 14].“ Mitte des 16. Jahrhunderts wurde Paul Dax (1506 - 1561), ein Innsbrucker Kunstmaler, von Kaiser Maximilian I. (1459 – 1519) auf Grund von Grenzstreitigkeiten zwischen der Grafschaft Tirol



und dem Herzogtum Bayern beauftragt kartographische Aufnahmen in diesem Gebiet durchzuführen. [vgl. ZEM-86: 28] Er stellte zunächst zwei kartographische Visualisierungen nach eigenen Beobachtungen und Vermessungen, für die er etwa 18 Tage lang im Gelände unterwegs war, her und brachte seine Aufnahmen zusätzlich „zu mehrem Verständniss und zu noch mehrem Verstand in eine sonderliche Visirung, aus dem Grund gezogen, erhebt von Lehm gestrichen und ausgeführt [SCH-65: 328].“ Dies dürfte der erste Hinweis auf den Bau eines Geländereliefs im alpinen Raum sein.

In seinem „Führer durch das Alpine Museum in München“ erwähnt Museumsdirektor Bühler, dass sich „die ältesten existierenden Reliefs überhaupt“ in der Sammlung des Museums befinden. Er spricht dabei drei Reliefs an, die von Kaiser Maximilian in Auftrag gegeben wurden und um das Jahr 1540 entstanden sein sollen. Also 21 Jahre nach dem Tod Maximilians. Der Hersteller ist ihm allerdings unbekannt. [vgl. BÜH-41: 52f.] Nach Zemann [1986: 28] lag Daxs Arbeitsbereich zwischen 1544 und 1554 im bayrisch-tirolerischen Grenzgebiet.



Abbildung 13: Unbekannt, Wetterstein, Maßstab: unbekannt, Relief, Holzfundament mit gestärkter Leinwand überzogen, bemalt, Datierung: ca. 15./16. Jh. (wahrscheinlich das älteste Relief der Alpen), Maße: 170 x 70 cm ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823 (Darstellung auf diesem Relief: Von der Zugspitze bis zum Ferchensee)

Da die Reliefs das Wettersteingebirge, die Grenzberge am Ammerwald sowie am Tegernsee darstellen und somit in Daxs Arbeitsgebiet liegen, ist seine Urheberschaft höchst wahrscheinlich aber nicht bewiesen. [vgl. ZEM-86: 28] Die beiden letzteren Modelle wurden in einem Maßstab zwischen 1:30.000 und 1:50.000 gebaut und während des Zweiten Weltkriegs zerstört. Gygax erwähnt in seinem Werk „Das topographische Relief in der

Schweiz“ ein weiteres bzw. viertes Relief vom Risserkogel aus dieser Zeit, welches im Museumsführer allerdings fehlt. [vgl. GYG-37: 14] Da das Museum durch einen Bombenangriff im Zweiten Weltkrieg fast vollständig zerstört wurde, lässt sich nicht mehr nachvollziehen was mit diesem Modell passiert ist. [vgl. MAI-06: 29] Das einzig erhalten gebliebene Wettersteinrelief (siehe Abbildung 13) im ungefähren Verhältnis von 1:10.000 wurde im Gegensatz zu den anderen Modellen aus Holz geschnitzt und mit gestärkter Leinwand überzogen. Anschließend wurde die angeleimte Leinwand landschaftlich bemalt und einzelne Bäume aus Draht aufgesteckt. Außerdem wurden Papierstreifen mit Flur- und Bergnamen aufgeklebt (Abbildung 14). Nach Gygax [1937: 14] weisen die Hauptgebirgszüge, die durch gerundete wallartige Erhebungen dargestellt sind sowie die größeren Täler erstaunlich genaue Richtungsverhältnisse auf. Das Relief deckt das Gebiet von der Zugspitze bis zum Ferchensee ab und hat die Maße 170 x 70 cm (an der breitesten Stelle). Es befindet sich in der zurzeit nicht öffentlich zugänglichen Sammlung des Alpenvereins Museum in Innsbruck. [vgl. his-16]



Abbildung 14: Ausschnitt Wetterstein: Drahtbäume, Flur- und Bergnamen auf Papierzettel ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823

Knapp zwei Jahrhunderte mussten vergehen, ehe die Reliefherstellung weitere Modelle verspricht. Das Interesse der Naturwissenschaften am Alpenraum nahm zu, Ortsfremde durchreisten vermehrt die Länder und verlangten dabei nach brauchbaren Orientierungshilfen. In der Schweiz erkannte man schon früh, dass gute Arbeit, Präzision und Zuverlässigkeit äußerst gefragt sind. So finden sich auch in der Schweiz die ersten Nachfolgearbeiten seit dem 16. Jahrhundert wieder. Vor allem Franz Ludwig Pfyffer von Wyer (1716-1802) beeinflusste die Kartographie der damaligen Zeit mit seinen Reliefarbeiten nachhaltig. Er war Generalleutnant unter dem französischen König Ludwig XV. und ließ sich in seinem Ruhestand ab dem Jahr 1769 in seiner Heimatstadt Luzern nieder.

[vgl. CAM-03: 38] Bereits während seiner Offiziersausbildung kam er zum ersten Mal mit Reliefdarstellungen in Berührung. Nämlich durch die von König Ludwig XIV. angelegte und kontinuierlich ausgebauten Sammlung von Festungsreliefs, welche zur Planung von Angriff und Verteidigung hergestellt wurden. Die Festungsmodelle stellen exakte Nachbildungen der Gebäude als auch des umliegenden Gebiets samt Böschungen und Gräben dar. Diese Modelle weckten bei Pfyffer großes Interesse und dürften ihn auf die Idee gebracht haben, seine heimatliche Bergwelt auf dieselbe Weise darzustellen. [vgl. CAV-98: 11] Er ließ sich in Paris in der Modellierkunst unterrichten und lernte während seiner militärischen Laufbahn die Grundlagen der praktischen Vermessung kennen. [vgl. NIE-05: 8] Den didaktischen Hintergrund zu seinem Schaffen hat Pfyffer also in Frankreich erhalten, wo bereits weite Teile nach modernen Gesichtspunkten vermessen waren. [vgl. CAV-98: 11] In der Schweiz war dem nicht so. Zwischen seinen Feldzügen und Aufenthalten in Luzern, wo er neue Gardisten anwarb, schaffte es Pfyffer immer wieder sich der Vermessung zu widmen, die zugleich seine größte Leidenschaft war. Schließlich fertigte er im Jahr 1750 sein erstes Relief und zugleich das erste auf Schweizerboden, welches die Gegend um den Pilatus von Hergiswald bis Alpnach abbildet, an. Es besteht aus Wachs und Pappdeckeln und hat in etwa die Maße von 2,25 x 1,65 m und eine Höhe von 0,45 - 0,60 m. Wälder, Weiden, Alphütten, Felsen, Gewässer, Wege sowie die verschiedenen Gesteinsarten und rund 60 Gipfel sind dargestellt. [vgl. GYG-37: 16] Über den Verbleib des Pilatusreliefs existieren keine gesicherten Nachrichten. Gyax ging 1937 in seinem Werk „Das topographische Relief in der Schweiz“ noch davon aus, dass das Relief „...später in seinem (Anm.: Pfyffers) großen Relief der Urschweiz aufgegangen ist [GYG-37: 16].“ Auch Ottiger nahm an, dass „das Relief vom Pilatusgebiet vermutlich später ins Relief der Urschweiz integriert wurde [OTT-73: 76].“ Die Tatsache, dass es nicht mehr aufgefunden werden kann, unterstützt diese Theorie. Doch aus den nachträglich durchgeführten Untersuchungen im Rahmen der Restaurierung des Reliefs zwischen März 1998 und November 2001 geht hervor, dass dies auf Grund von unterschiedlichen Maßstäben nicht der Fall sein kann. [vgl. CAV-98: 16] [NIE-02: 31] Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass beide Reliefs auf den gleichen von Pfyffer durchgeführten Triangulationen beruhen. Pfyffer begann bereits gegen Ende der 1740er Jahre mit seinen Feldarbeiten und konnte sich nach seinem Ausscheiden aus dem französischen Dienst 1769 zur Gänze seiner Vermessungsarbeit widmen. [vgl. NIE-05: 10] Er war der Erste der das Prinzip der Landesvermessung und dreidimensionalen Landschaftsdarstellung auf einen großen Teil der Schweiz angewandt hatte. [vgl. NIE-02:31] Zwischen 1766 und 1785 fertigte er das Relief der Urschweiz, das erste historisch bekannte und noch erhaltene Relief der Schweiz, an (siehe Abbildung 15). Dieses „epochemachende“ Relief wie es Gyax bezeichnete, ist rechteckig und hat die Maße von ca. 3,90 x 6,70 m. [vgl. GYG-37: 15] Es bildet die Kantone Luzern, Zug, Ob- und Nidwalden sowie angrenzende Kantonsteile von Uri, Schwyz und Bern in einem Maßstab von etwa 1:11.500 ab und besteht aus 136 Teilen in den unterschiedlichsten Formaten. Als Vorbild dienten ihm neben den französischen Festungsreliefs plastische Darstellungen von Weihnachtskrippen aus dem süddeutschen Raum, Tirol und Italien. [vgl. CAV-98: 16] Das Relief basiert auf Vermessungen, die Pfyffer

jeweils in den Sommermonaten vornahm. Von seinen Touren brachte er Skizzen mit, die topographische Informationen enthielten und die wichtigsten Geländemerkmale darstellten. Diese Zeichnungen kolorierte er naturgetreu. 94 dieser Landschaftszeichnungen sind heute bekannt und werden in der Zentralbibliothek Luzern aufbewahrt; die ursprüngliche Anzahl ist nicht bekannt. [vgl. BÜR-98: 5] [NIE-05: 158] Niederöst geht davon aus, dass Pfyffer seine graphischen und numerischen Unterlagen bei schlechter Witterung und im Winter auf eine Karte übertrug und erst nachdem er mit dieser ebenen Darstellung zufrieden war, sich dem Reliefbau widmete. [vgl. NIE-05: 154]



*Abbildung 15: Ansicht des Reliefs der Urschweiz von Franz Ludwig Pfyffer. Die Abbildung zeigt Teile des Zuger und Vierwaldstätter Sees. ©Jana Niederöst [NIE-05: 3]*

Das Grundgerüst besteht aus einem Holzaufbau. Um den Verlauf der Bergketten und die Höhe der Gipfel zu markieren, setzte er senkrechte Rundholzstäbchen in die Bodenplatten ein. Anders als bei den späteren Gipsreliefs kamen für die Modellierung des Geländes die verschiedensten Materialien wie Holzlatten, Ziegelsteinstücke, Holzkohlereste, Kartonstücke, Lehm oder Talkstein zum Einsatz (siehe Abbildung 16). Die Oberfläche ist mit einer Gips-Sandmasse gestaltet und mit einer dünnen Schicht Bienenwachs überzogen. Die Wälder sind aus Wachskrümeln modelliert und in hellen und dunklen Grüntönen bemalt, die Häuser ragen als rote Hügelchen aus der Oberfläche heraus. Die (Verkehrs-)Wege sind durch von Nagel zu Nagel gespannte Hanfschnüre und die Bäche und Flüsse durch wellenförmig gedrehte Drähte veranschaulicht. [vgl. NIE-05: 11, 154ff.] Als besondere Merkwürdigkeit ist zu erwähnen, dass die höchsten Bergerhebungen des Reliefs aus natürlichen Felsbruchstücken der betreffenden Gipfel bestehen. Zum Schluss wurde das Relief mit Öl- oder Temperafarben koloriert. [vgl. GYG-37: 16] Eine Genauigkeitsanalyse ergab eine durchschnittliche Abweichung in 51 Messpunkten um 180 m in der Lage und 63 m in der Höhe von der Schweizer Landeskarte. Dies entspricht etwa 1,6 bzw. 0,5 cm im Relief. Wenn man bedenkt, dass Pfyffer sein Relief fast 100 Jahre vor dem ersten modernen



schweizerischen Kartenwerk von Guillaume-Henri Dufour erstellt, ist seine Leistung in vermessungstechnischer Hinsicht hervorragend. Das rund 26 Quadratmeter große Relief ist somit ein Meilenstein für die schweizerische Kartographie und das wichtigste kulturhistorische Ausstellungsobjekt im Gletschergarten Museum Luzern. [vgl. NIE-02: 31f] An dieser Stelle darf auf Jana Niederösts Dissertation „Das Relief der Urschweiz von Franz Ludwig Pfyffer (1716-1802): 3D-Rekonstruktion, Analyse und Interpretation“ an der ETH Zürich aus dem Jahr 2005 verwiesen werden, welche das Geländerelief aus den verschiedensten Blickwinkeln aufarbeitet. Sämtliche Details zur Vermessung, Ausführung, Genauigkeit sowie historische Hintergründe finden sich in diesem Werk. Eine weitere Diskussion des Reliefs an dieser Stelle würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen und andere herausragende Reliefkünstler vernachlässigen. Wie etwa Joachim Eugen Müller (1752-1833).

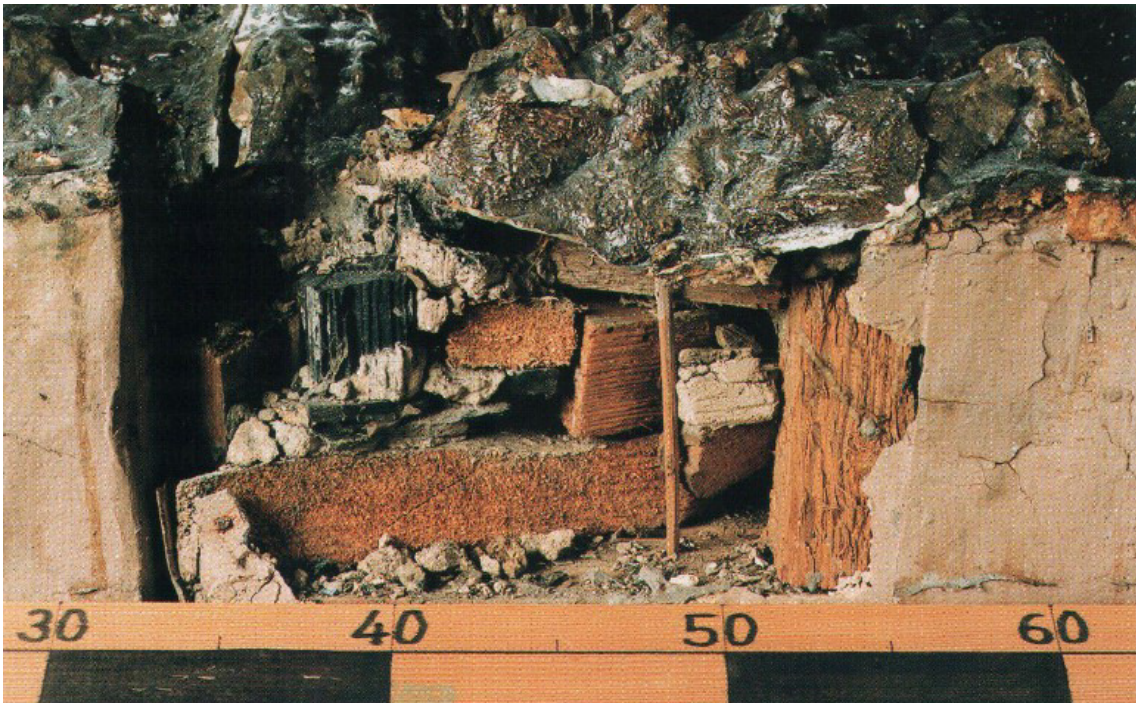


Abbildung 16: Das Innenleben des Reliefs der Urschweiz. ©Georg Anderhub, Luzern [CAV-98: 16]

Müller, gelernter Zimmermann, wurde im Jahr 1788 von dem Industriellen Johann Rudolf Meyer (1739-1813), nachdem er auf Pfyffers Relief aufmerksam wurde, beauftragt, ein Relief der gesamten Schweiz zu erstellen. Dieses sollte als Vorlage für die Erstellung einer Karte bzw. des ersten Atlas der Schweiz dienen. Als Grundlage dienten Basismessungen eines Berner Professors. Diese wurden durch ausführliche Messungen und topographische Aufnahmen von dem Straßburger Geometer Johann Heinrich Weiss (1758-1826) und Müller ergänzt. Müller modellierte einerseits nach Ansichtszeichnungen und zum Teil auch direkt nach der Natur mit Gips. Im Jahr 1797 stellte er das Relief, das die Schweiz vom Genfersee bis zum Bodensee abdeckt, im Maßstab 1:60.000 fertig. Nach diesem Relief zeichnete Weiss dann sechs von sechzehn Kartenblätter des „Atlas général de la Suisse“ im Maßstab

1:120.000, auch Meyer'scher Atlas genannt, der im Jahr 1802 erschienen ist und über 50 Jahre lang, bis zum Erscheinen der Dufourkarte, als das beste Kartenwerk der Schweiz galt. Auf Drängen von Napoleon wurde das Relief nach Frankreich verkauft und vermutlich im Jahr 1903 zerstört. [vgl. CAM-03: 42] [ODE-29] [PEA-08] Nach Imhof [1939: 287] modellierte Müller seine Reliefs mit einer Genauigkeit und Naturtreue, die alles Frühere in den Schatten stellte. Als Baumaterial nutzte er eine Masse aus Gips, Sand, Kalk, Wachs und Harz. Im Gegensatz zu anderen Reliefbauern, begann er bei seinen Reliefs zuerst die Gipfelregionen auszumodellieren und arbeitete sich dann in die Tiefe. Auf diese Weise erstellte er über 20 Geländereliefs und zählte zu den bedeutendsten Reliefbauern gegen Ende des 18. Jahrhunderts. [vgl. GRÜ-86: 659] [GYG-37: 26]

### **3.2 Die Hochblüte des Reliefbaus seit dem 19. Jahrhundert**

Zwischen 1845 und 1865 wurde mit der Dufourkarte das älteste amtliche Kartenwerk der Schweiz herausgegeben. Das Gelände bildete man damals noch mittels Schraffen ab. Nach dem Vorliegen von topographischen Kartenwerken konnten fortan Reliefs nach diesen hergestellt werden. Das Verhältnis zwischen Reliefmodell und Karte wurde also umgekehrt. Nachdem im Siegfried-Atlas (ab 1870) zum ersten Mal Höhenlinien für die Darstellung des Geländes zum Einsatz kamen, konnte auch die Genauigkeit der daraus resultierenden Geländereliefs gesteigert werden. Mittels Höhenkurven konnten nun Treppenstufenmodelle aufgebaut werden, von denen im Anschluss Gipsabgüsse erstellt wurden um diese weiterbearbeiten zu können. [vgl. MAI-06: 40f.]

Charles-Eugène Perron (1837-1909) erstellte zwischen 1890 und 1900 sein Relief der Schweiz im Maßstab 1:100.000 auf Basis des Siegfried-Atlas. Dabei bediente er sich eines Pantografen mit angeschlossener Fräse und schnitt entsprechend der Karte die Höhenschichtlinien aus Gipsplatten aus. Diese baute er anschließend aufeinander auf. Die Geländeformen modellierte er in das Stufenmodell fast ausschließlich nach der Vorlage der Dufourkarte ohne ausführliche Geländebegehungen durch zu führen. [vgl. GYG-37: 65f.] [HAM-97: 17] Näheres zu den Herstellungsmethoden findet sich in Kapitel 5.

Begründer einer neuen schweizerischen Reliefschule war Albert Heim (1849-1937). Er war langjähriger Professor der Geologie an der ETH Zürich und an der Universität Zürich. Er selbst hat nach Imhof [1939: 288] zwar eigenhändig nur wenige und eher mittelmäßige Geländereliefs geschaffen, die eigentlich als geomorphologische Typenreliefs einzustufen sind, allerdings gilt er als Lehrmeister für einige der bekanntesten Reliefbauer zwischen den Jahren 1880 und 1930. [GYG-37: 41] Unter seiner Anleitung und Beeinflussung schufen etwa Xaver Imfeld (1853–1909), Fridolin Becker (1854–1922) und Simon Simon (1857–1927) ihre Meisterwerke. Sie sind allesamt unter dem Begriff der Zürcher Reliefschule bekannt und bedienten sich allesamt dem selben Herstellungsverfahren. Ihre Geländemodelle basierten auf den Karten des Siegfried-Atlas im Maßstab 1:25.000 bzw. 1:50.000, welche je nach Bedarf auf das bis zu fünffache vergrößert wurden. [vgl. GYG-37: 41]

Zwischen 1898 und 1903 schuf Heim gemeinsam mit Carl Meili (1871–1919), Schüler und Assistent von Imfeld, das Säntisrelief im Maßstab 1:5.000. Das 185 cm lange und 190 cm breite Relief hat eine Höhe von 37 cm und wurde in vier Teilstücken erstellt. [vgl. GYG-37: 40ff.] [HAM-97: 17] [IMH-39: 288ff.] Nach Gygax [1937: 44] ist es das beste existierende Gebirgsrelief überhaupt, mit einer bis ins feinste detailgehenden Felsdarstellung (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: Säntisrelief von Albert Heim und Carl Meili im Maßstab 1:5.000, 1903 [ter-15a]

Als unerreichter Meister der Reliefkunst, wie ihn Imhof [1939: 288] beschreibt, ist Xaver Imfeld anzuführen. Zu Beginn seiner Tätigkeit, modellierte er seine Reliefs in den Maßstäben 1:50.000, wie etwa den Pilatus oder die Gotthardgruppe, oder 1:25.000 wie das Zermattergebiet und die kleine Jungfraugruppe. Er war auch einer der ersten in der Schweiz, der mithilfe der Messtischphotogrammetrie topographische Aufnahmen ausführte, um in weiterer Folge Geländereliefs in größeren Maßstäben herstellen zu können. Wie etwa das Matterhorn im Maßstab 1:5.000 (siehe auch Kapitel 6.2) oder auch die große Jungfraugruppe im Maßstab 1:2.500 (siehe Abbildung 18). Beide Reliefs schuf er, um den Bau von Bergbahnen auf die Gipfel zu bewerben. Neben Reliefs konstruierte er auch Panoramen und arbeitete am Siegfried-Atlas mit, wovon er 21 Blätter zeichnete. [vgl. GYG-37: 47ff.] [IMH-39: 288ff.] Das besondere an Imfelds Arbeiten war, dass er zwar ausgezeichnet modellieren konnte, die Bemalung seiner Reliefs, bis auf seine ersten Arbeiten, überließ er aber lieber anderen, da für ihn die Modellierung an sich vollkommen genug gewesen ist. [vgl. PEN-04: 29] So bemalte etwa Fridolin Becker das im Jahr 1900 fertiggestellte große Jungfraurelief. Das Modell war im Besitz des Alpinen Museum in München, wurde aber im Zweiten Weltkrieg zerstört. Fridolin Becker, Studien- und Berufskollege von Imfeld, war als Ingenieur-Topograph tätig und arbeitete später als Professor für Kartographie, Plan- und Kartenzeichnen an der ETH Zürich. Er beherrschte nicht nur die Kunst der Reliefbemalung, sondern baute auch selbst Reliefmodelle. Er schuf etwa Geländemodelle der Glarner Alpen, des Gotthardgebirges oder von der Gegend von



Montreux. [vgl. GYG-37: 67ff.] Nach Imhof [1939: 289] sind seine Arbeiten allerdings nicht in der Qualität mit jenen von Imfeld vergleichbar.

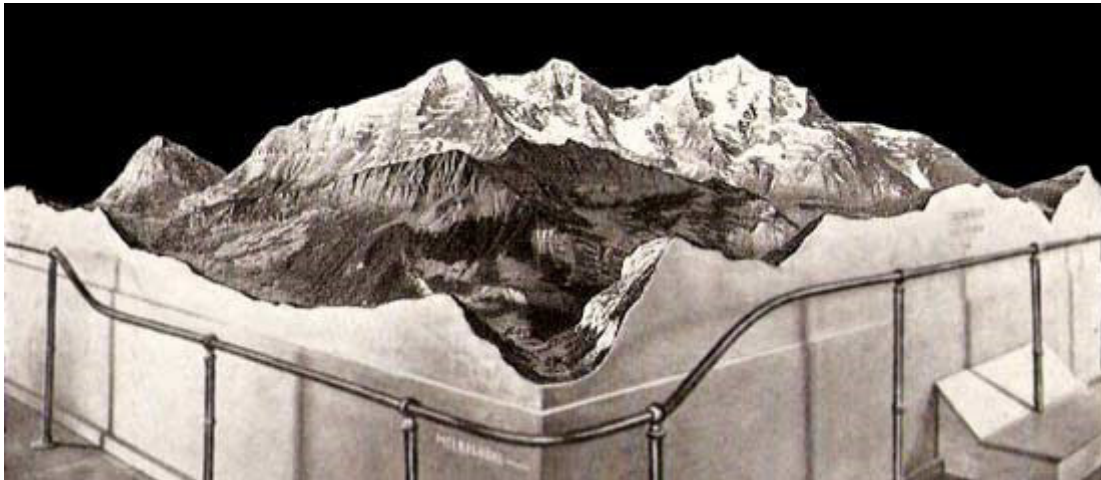


Abbildung 18: Jungfraugruppe von Xaver Imfeld im Maßstab 1:2.500, 1900, bemalt von Fridolin Becker 1902. [ter-15b]

Imfelds letzte Relieffarbe war ein weiteres Modell des Pilatus im Maßstab 1:10.000. Dieses konnte er allerdings nur bis zum Treppenstufenmodell anfertigen. Nach seinem Tod im Jahr 1909, machten sich Meili und Hans Hürlimann unter Anleitung von Heim daran, es fertig zu stellen (siehe Abbildung 19). [vgl. GYG-37: 47]

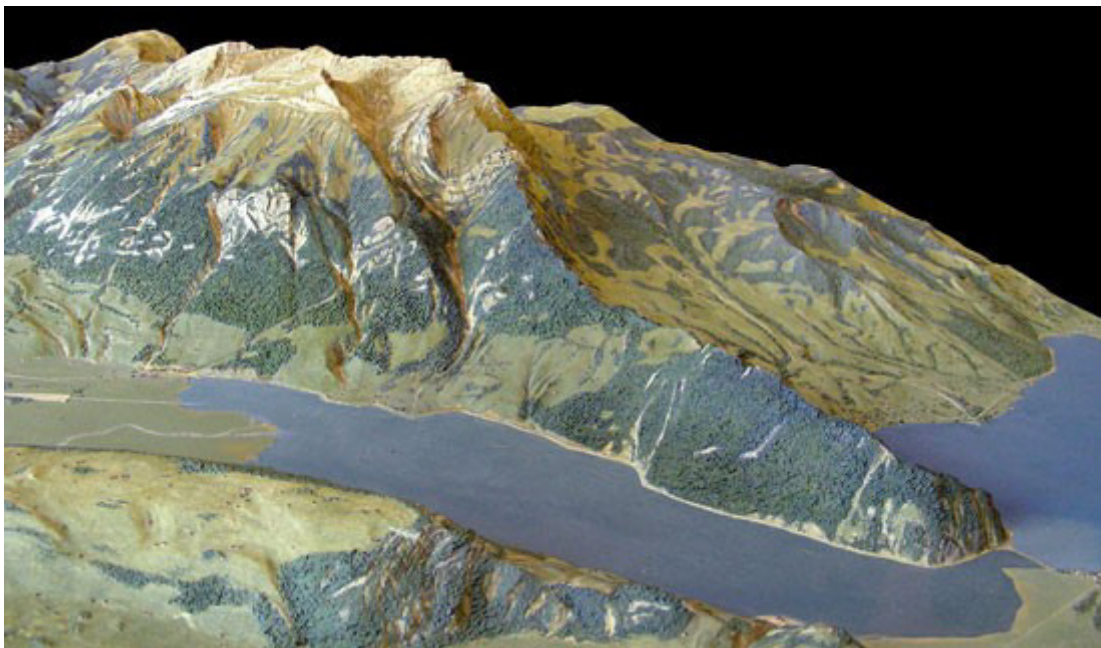


Abbildung 19: Pilatus, 1:10.000, 85 x 126 cm, 1908–1913, Xaver Imfeld, Fertigstellung: Carl Meili, Hans Hürlimann unter Anleitung von Albert Heim. [ter-15c]

Simon Simon, ebenfalls Schüler von Heim und Kollege von Imfeld und Becker, machte auf sich aufmerksam indem er ein 25 Quadratmeter großes Relief des Berner Oberlandes schuf. Dieses baute er auf Basis des Siegfried-Atlas in einem Maßstab von 1:10.000. 28 Jahre vergingen bis er das Modell im Jahr 1914 fertig stellen konnte. Unter anderem mit der Hilfe



von Joseph Reichlin (1872-1927). Wie man sieht, kommen durch jedes vorgestellte Relief neue Namen von Reliefbauern und ihren Schülern oder Assistenten auf, die selbst mit der Zeit begannen ihre eigenen mehr oder weniger gelungenen Geländemodelle zu erstellen. Eine ausführliche Abhandlung über die Schweizer Reliefbauer findet sich in Gygaxs Werk: „Das topographische Relief in der Schweiz: ein Beitrag zur Geschichte der schweizerischen Kartographie“ aus dem Jahr 1937 wieder.



Abbildung 20: Große Windgällen von Eduard Imhof im Maßstab 1:2.000, 163 x 307 cm, 1938. [ter-15d]

Ein Schweizer Reliefkünstler darf an dieser Stelle aber nicht fehlen: Eduard Imhof (1895-1986). Nach Mair [2006: 54] gilt er als Vater der modernen, akademischen Kartographie. Er war Begründer des Kartographischen Instituts an der ETH Zürich im Jahr 1925 und prägte ein halbes Jahrhundert lang nicht nur die Schweizer Kartographie, sondern erlangte auch internationales Ansehen. Sein Fachgebiet stellte die Reliefdarstellung im Hochgebirge dar. [vgl. HAM-97: 23] Als erstes Relief erstellte er eine Nachbildung des Mürtenstock im Maßstab 1:10.000, welches er so exakt ausführte, dass es jahrelang als Anschauungsmodell an der ETH Zürich diente. Seine besondere Beobachtungsgabe schlug sich vor allem in zwei seiner Arbeiten nieder, die er anlässlich der Landesausstellung in Zürich im Jahr 1939 erstellte. Innerhalb von zwei Jahren modellierte er die Große Windgällen und das Bietschhorn im Maßstab 1:2.000 mit Unterstützung von einigen seiner Studenten (siehe Abbildungen 20 & 21). Ersteres erstellte er in eineinhalb Jahren, zweiteres in weniger als einem Jahr. Bei beiden Reliefs konnte er erstmals photogrammetrisch ausgewertete Aufnahmen nutzen. Des Weiteren dienten ihm terrestrische photogrammetrische

Aufnahmen, extra für sein Projekt angefertigte Luftbilder, eigens erstellte Zeichnungen, Photographien sowie geologische Karten als Grundlage. [vgl. HAM-97: 23] [MAI-06: 54f.] [ter-15d] Nach Hammer [1997: 23] sind die beiden Reliefs in Genauigkeit, Naturähnlichkeit und Farbgebung unerreicht.



Abbildung 21: Bietschhorn von Eduard Imhof im Maßstab 1:2.000, 137 x 170 cm, 1938. [ter-15d]

In Österreich waren durch die Dritte Landesaufnahme von 1869-1887 erstmals Höhenlinien in den staatlichen Karten verfügbar. Ab 1875 entstanden erste Reliefarbeiten auf Basis dieser Landesaufnahme. Zuvor schuf Franz Keil (1822-1876) erste wissenschaftlich fundierte Reliefs. Als Grundlage dienten ihm Höhenbestimmungen aus Militärtriangulationen und Katastertriangulierungen, die er durch eigene Aufnahmen ergänzte und zu Isohypsenplänen verarbeitete. Mit zusätzlichen Profilzeichnungen und Geländeskizzen baute er sein erstes Relief, welches heute leider verschollen ist. Das Geländereief stellte er 1856 fertig und deckt das obere Draugebiet im Maßstab 1:144.000 ab. Das Stufenrelief, bestehend aus Pappe, wurde mit einer Masse aus Gummi und Kreide überzogen und ausmodelliert. Die Bemalung erfolgte nach Kulturgrenzen. Im selben Jahr fertigt er auch ein Glocknermodell im Maßstab 1:48.000 an. Weitere Arbeiten in den Lienzer Dolomiten, ein Glockner-Schober-Hochstadl-Relief oder etwa ein Relief von Reichenau und Umgebung folgten. [vgl. ZEM-86: 40ff.]

Neben Keil zählen auch Gustav Edler Pelikan (1840-1919) und Paul Oberlercher (1859-1915) zu den bedeutendsten Geoplastikern Österreichs. Pelikan war als Topograph beim k. k. Militärgeographischen Institut tätig. Erst in seinem Ruhestand widmete er sich dem Reliefbau. Seine erste Arbeit sollte eine Ergänzung zu einem von Keil begonnenen Relief des Landes Salzburg werden, die er 1895 fertig stellte. Weitere Arbeiten wie etwa ein Relief von Berchtesgaden, von Abbazia, vom Dachstein (bei dem er bereits auf erste photogrammetrische Aufnahmen zugreifen konnte), vom Triglav oder der Tatra folgten. Neben der Geoplastik beschäftigte er sich auch mit der photomechanischen Schummerung und erstellte eine Reliefkarte des Salzkammergutes. [vgl. ZEM-86: 51ff.]



Abbildung 22: Großglockner von Paul Oberlercher im Maßstab 1:2.000, 1893, Abguss des Mittelstückes; eigene Aufnahme

Mit Paul Oberlercher (1859–1915) konnten erstmals Geländereliefs entstehen, die in ihrer Qualität mit den Schweizer Modellen vergleichbar sind. Vor allem im Ostalpenraum schuf er beeindruckende Werke. Da das Kartenmaterial im Hochgebirge noch immer einige Unzulänglichkeiten aufwies, musste der Volksschullehrer aus Kärnten eigene topographische Aufnahmen vornehmen. Seine ersten beiden Reliefarbeiten aus dem Jahr 1885, vom Liesertal und von Böhmen, gelten als verschollen. Es folgten Reliefs des Maltatales, der Ankogel- und Hochalmgruppe, der Ortlergruppe oder etwa auch des Vesuvs oder Hawaiis. Seine Hauptarbeit stellte allerdings das Glocknerrelief dar. Hierfür nahm er ab Sommer 1890 Triangulierungsarbeiten vor, fotografierte und skizzierte das Gelände. Als Vorarbeit entstand eine Karte im Maßstab 1:2.000. Das Geländerelief modellierte er bis 1893 fertig aus. Es ist ebenfalls im Maßstab 1:2.000 gebaut und hat eine Größe von 24,5 Quadratmetern. Das Modell steht im Landesmuseum in Klagenfurt. Ein Abguss des



Mittelstückes befindet sich außerdem im Besitz des Alpenvereinmuseums (siehe Abbildung 22). [vgl. ZEM-86: 64ff.]

Neben Oberlercher, seien auch noch die Alpenvereinstopographen Fritz Ebster (1901-1979) und Leo Ägerter (1875-1953) genannt sowie Otto Raab, Siegfried Hirth und J. Dinges, die unter anderem für den Alpenverein tätig waren und eine Vielzahl an Geländemodellen geschaffen haben. An dieser Stelle darf auf die Diplomarbeit „Reliefbau in Österreich“ von Zemmann an der Universität Wien aus dem 1986 verwiesen werden, die einen sehr ausführlichen Einblick in die Entwicklung des Reliefbaus in Österreich gibt und dabei eine Vielzahl an Geoplasten der jeweiligen Zeit samt ihrer Werke vorstellt. [vgl. ZEM-86: 70.]

Während des Ersten Weltkrieges entwickelte Karl Wenschow (1884–1947) in München eine Reliefschneidemaschine die den Bau von Geländereiefs beschleunigen sollte. Durch Beleuchtung und fotografische Aufnahme dieser Reliefs wurden auch Geländedarstellungen für Karten erzeugt. Auch das Wenschow-Verfahren nutzte als Datengrundlage Höhenlinien. Des Weiteren machte er sich einer Prägemaschine zu Nutze, mit deren Hilfe leichte Kunststoffreliefs mit Kartenbild erstellt werden konnten. Seine Firma war so erfolgreich, dass er Ende des Zweiten Weltkrieges 24 Schneidemaschinen und zwei Prägemaschinen besaß. [vgl. ARN-66: 405]

Besonders nach 1920 erhielt der Reliefbau erneut starke Impulse, weswegen 1932 am Institut für Geographie der Universität Wien ein Lektorat für den Reliefbau eingerichtet wurde. Dieses wurde von Franz Bibiza geführt und bestand bis 1953. [vgl. ARN-66: 404]

### **3.3 Der moderne Reliefbau seit Ende des 20. Jahrhundert bis heute**

Auch im modernen Reliefbau dienen Höhenlinien als Datengrundlage. Höhenlinien kommen seither nicht nur im manuellen bzw. maschinellen Reliefbau zum Einsatz, sondern auch beim Bau computergestützter Reliefs. Mit Toni Mair (1940–2015) und Wolfgang Pusch dürfen an dieser Stelle zwei Reliefbauer der neueren Zeit vorgestellt werden. Beide erstellen ihre Reliefarbeiten in Handarbeit, obwohl sie bereits auf computergestützte Verfahren zugreifen könnten. Vor allem Mair war ein vehementer Gegner von computergenerierten Reliefs. [vgl. MAI-09] Der Geographielehrer begann bereits während seines Studiums mit seinen ersten Reliefversuchen. 15 Jahre später erzielte er einen ersten Erfolg mit seinem Relief der Berninagruppe, welches er gleich für vier Museen anfertigen sollte. Mair schuf knapp 50 Geländemodelle. Sein Arbeitsgebiet beschränkte sich nicht nur auf die Gipfel der Alpen, sondern auch auf Neuseeland, Nordamerika oder Äthiopien. Seine Arbeiten stellen hervorragende Nachbildungen des Geländes dar und sind mit einer Liebe zum Detail ausgestattet, die seines gleichen sucht. Eines seiner Meisterwerke stellt das 23 Quadratmeter große Relief des Kanton Aargau im Maßstab 1:10.000 dar, welches er 2001 fertig stellte (siehe Abbildung 23). Neben der Erstellung seiner eigenen Werke, widmete er sich auch der Restaurierung von Modellen anderer Reliefbauer, wie etwa dem Bietschhorn und der Großen Windgällen von Eduard Imhof. [vgl. mai-14] [ter-18]

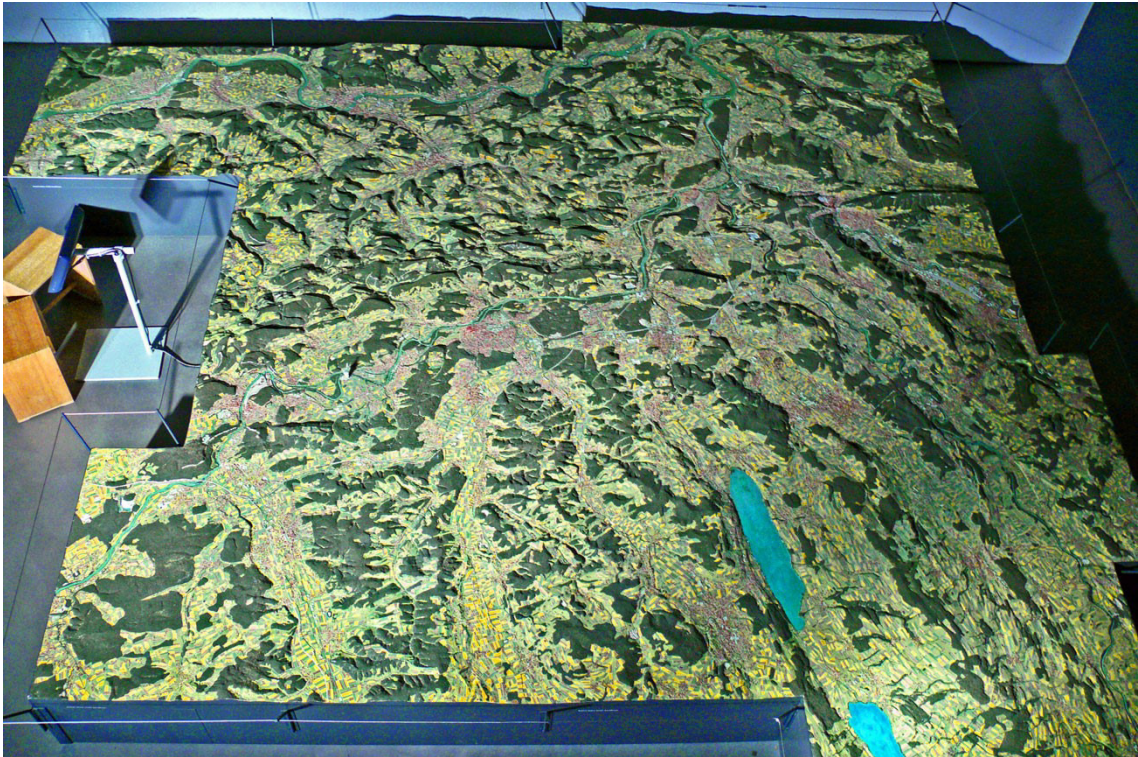


Abbildung 23: Kanton Aargau von Toni Mair im Maßstab 1:10.000, 23m<sup>2</sup>, 2001 [mai-04]

Wolfgang Pusch, 1975 in München geboren, erstellt seine Reliefs ebenfalls manuell, bedient sich aber digitaler Möglichkeiten bei der Planungsphase. So werden etwa die Höhenlinien direkt aus einem digitalen Geländemodell erzeugt und zu einem Treppenstufenmodell, von dem dann ein Gipsabguss erstellt wird, weiterverarbeitet. Auch die Bemalung erfolgt händisch, obwohl dies bereits mittels computergesteuerter Tintenstrahldüse möglich wäre. Die Qualität ist allerdings nicht vergleichbar mit der händischen Koloration. Auf diese Weise erstellt er Geländereliefs der Alpen, des Himalayas oder aber auch des Aconcaguas. Neben individuellen Einzelstücken, erstellt er auch kleine etwas kostengünstigere Modelle in Serie. Eine seiner letzten Arbeiten, ist die Abbildung aller 14 Achttausender der Erde. In sieben Reliefs im Maßstab 1:25.000 werden auf insgesamt 14 Quadratmetern die höchsten Gipfel dargestellt. Zu sehen ist dieses Projekt im Messner Mountain Museum im Schloss Sigmundskron (siehe Abbildung 24). [vgl. pus-18e]

Mit dem Aufkommen von digitalen Geländemodellen wurde es auch möglich Geländemodelle computergestützt bzw. mittels Rapid Prototyping Verfahren herzustellen. Diese Technik ermöglicht nun auch nicht geübten Reliefbauern Geländemodelle rasch und kostengünstig zu erstellen. Die verschiedenen Verfahren und Techniken werden in Kapitel 5.3 ausführlich behandelt.



Abbildung 24: Reliefs der 14 Achttausender von Wolfgang Pusch im Maßstab 1:25.000, 2018, ausgestellt im Messner Mountain Museum [pus-18e]

### 3.4 Bedeutung und Nutzen im Wandel der Zeit

Nicht nur das Verhältnis Karte zu Relief hat sich in den letzten Jahrhunderten immer wieder verschoben auch der Zweck eines Reliefs hat sich geändert. Wurden die ersten Reliefs aus militärischer Sicht bzw. bei Grenzstreitigkeiten oder um territoriale Besitzansprüche festzustellen, angefertigt, so entwickelte sich daraus eine wunderbare Vorlage für die Erstellung von Karten oder ganzen Atlanten. Aber auch für die Generierung von Geländedarstellungen in Karten können Geländemodelle unter bestimmter Beleuchtung photogrammetrisch abgebildet werden. Auch für Unterrichtszwecke eignen sich Reliefs hervorragend. Sie können Schülern als Einstiegshilfe in das Lesen von Karten, vor allem im Gebirgsraum, dienen. Geländemodelle wurden aber auch als Forschungsobjekt und Hilfsmittel der Geowissenschaften herangezogen. In Schulen oder Universitäten stand also der wissenschaftliche Aspekt im Vordergrund. Dienen Reliefs als Ausstellungsobjekt oder Werbemittel im Tourismus, so assoziiert man in Museen oder touristischen Einrichtungen eher den künstlerischen Aspekt. In gewissen Ausstellungen oder z.B. Nationalparkzentren können Geländemodelle auch nur als Eye Catcher fungieren. Gleich welchen Zweck oder Bedeutung ein Relief erfüllt, sollte es immer folgenden Kriterien genügen: messbar, konstruierbar, nachvollziehbar, funktional, kommunikativ, ästhetisch, harmonisch, schön, emotional [KRI-13: Kap. 1: 8]. Außerdem steht auch immer die kartographische Kommunikationsvermittlung im Vordergrund, welche auf kartographischen Daten beruht.

---

## 4 Datengrundlagen im Reliefbau

Um ein Relief, eine plastische natur- und maßstabsgetreue Nachbildung eines Teils der Erdoberfläche zu bauen, braucht es eine (Daten)Grundlage nach der gebaut bzw. auf die aufgebaut werden kann. Der ausgewählte darzustellende Landschaftsausschnitt muss also vorab durch geometrische und inhaltliche Attribute beschrieben werden. Dies geschieht durch die Erfassung von Geodaten. Geodaten weisen immer einen Raumbezug auf, über den ein Lagebezug zur Erdoberfläche hergestellt werden kann. Dieser beruht in der Regel auf zwei- oder dreidimensionalen Koordinaten. Geodaten unterliegen auch immer einer **Datenqualität**, welche auf dem zugrundeliegenden **Erfassungsverfahren (originär oder sekundär)** basiert [vgl. spe-01: Geodaten]. Die **Datenqualität** beschreibt Merkmale von (Geo-)Daten hinsichtlich ihrer Weiterverarbeitung und subsummiert unterschiedliche Kriterien wie Genauigkeit, Aktualität, Fehlerfreiheit, erforderliche Detailtreue (Modellauflösung) und Vollständigkeit [vgl. HAK-02: 299] [spe-01: Datenqualität]. In den **Metadaten** wird die Datenqualität neben Datenquelle, Angaben zu Erfassungs- und Auswertungsmethoden sowie zu Möglichkeiten der Weiterverarbeitung oder den Zugriffsmöglichkeiten angeführt. Dabei lassen sich Metadaten in folgende Gruppen unterteilen: Modell, d. h. das konzeptionelle Modell als Ergebnis des Prozesses der Modellierung; Herkunft, die beispielsweise Informationen zum Urheber, zu den verwendeten Erfassungsmethoden oder den Datenquellen enthält; Qualität, wobei üblicherweise Informationen zu den Qualitätskriterien Vollständigkeit, Richtigkeit, Konsistenz und Genauigkeit gegeben sein sollten; Verfügbarkeit, mit Angaben zu Abgabeformaten, Kosten, Nutzungsrechten usw.; Referenzanwendungen, aus denen der Nutzer erkennen kann wie und für welche Zwecke die Daten einsetzbar sind [vgl. spe-01: Metadaten].

Die **Erfassungsverfahren** von Geodaten können in **originäre** und **sekundäre** Erfassungsmethoden gegliedert werden. Bei der originären Datenerfassung werden die Daten durch Schätzen, Zählen oder Messen direkt der Realität entnommen, während bei der sekundären Datenerfassung bereits erfasste und gegebenenfalls aufbereitete Datenquellen verwendet werden. Die aus den originären und sekundären Quellen gewonnenen Daten dienen in der Kartographie als Ausgangsinformationen zum Aufbau von Geodatenbanken und Geoinformationssystemen, zur Kartenerstellung sowie zur Generierung von digitalen Geländemodellen, die alle in weiterer Folge für die Erstellung von Geländereiefs herangezogen werden können [vgl. HAK-02: 299] [spe-01: Datenerfassung].

### 4.1 Methoden der originären Datenerfassung im Reliefbau

Die originäre Erfassung von Daten kann auf Grundlage von **terrestrisch-topographischen Vermessungen**, **hydrographischen** Methoden oder durch natur- und sozialwissenschaftliche **Kartierungen** im Gelände sowie durch **photogrammetrische** Methoden und **Fernerkundungsverfahren** erfolgen. Die Datenerfassung erfolgt dabei direkt



am Objekt selbst oder an dessen unverarbeitetem Abbild. Die dadurch erhaltenen Primärdaten wurden kaum einer Veränderung durch den Anwender unterzogen. [vgl. HAK-02: 299ff.] [spe-01: Datenerfassung]

#### 4.1.1 Terrestrische Vermessung

Die ursprünglichste und einfachste Form der Datenaufnahme ist jene der Beobachtung und Beschreibung. Dabei können aber keine geometrischen Messgrößen aufgenommen, sondern lediglich Skizzierungen erstellt werden. Diese Methode ist demnach sehr ungenau. Im 16. Jahrhundert kamen bereits genauere Messmethoden zum Einsatz. Mittels Kompass oder Bussole konnten Winkelmessungen, mittels Schrittzählung oder Zeitmaß Entfernungsmessungen und mittels Quecksilberbarometer Höhenmessungen durchgeführt werden. Das Ergebnis waren meist Routenaufnahmen bzw. in weiterer Folge linienhafte topographische Karten. [vgl. WIL-90: 127ff.] Ende des 16. Jahrhunderts kam die Messtischaufnahme auf, welche zwei Aufnahmeverfahren ermöglichte. [vgl. spe-01: Messtischaufnahme] Beim graphischen Verfahren wurde durch das Prinzip des graphischen Einschneidens der Standpunkt und alle Geländepunkte mittels Kippregel eingemessen. Die Zielpunktrichtungen zeichnete man mit dem Kippregellineal sogleich auf. Beim Verfahren der Messtischtachymetrie wurden die Entfernungen mit einem Fadendistanzmesser und die Richtungen der Geländepunkte graphisch bestimmt (siehe Abbildung 25). Bei beiden Verfahren nahm man das Gelände aus Sicht von einem Standpunkt aus und auf Grundlage eingemessener Punkte auf. Ergebnis war ein Messtischblatt mit z.B. einem Maßstab von 1:25.000. [vgl. IMH-68: 113ff.] [WIL-90: 127ff.] Dieses Verfahren, mit dem bereits flächenhafte Ergebnisse erzielt werden konnten, blieb bis etwa zur Mitte des 20. Jahrhunderts in vielen Staaten die Standardmethode für topographische Karten mit einem Maßstab zwischen 1:10.000 und 1:50.000. [vgl. spe-01: Messtischaufnahme]

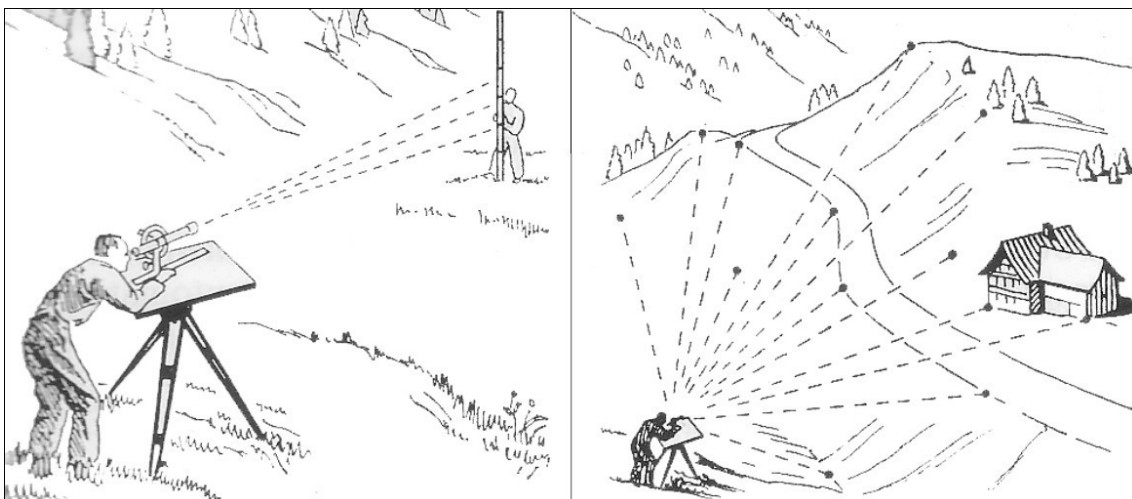


Abbildung 25: Messtischaufnahme – Lage und Höhe umliegender Punkte werden aufgenommen und auf das Messtischblatt aufgetragen [IMH-68: 120]



Seit dem 19. Jahrhundert sind aber auch numerische Methoden im Vermessungswesen praktikabel. Die Tachymetrie erlaubt die gleichzeitige Erfassung von Lage und Höhe von Punkten für z.B. großmaßstäbige Karten. Bei der Lageaufnahme werden Richtungen und Distanzen gemessen. Das Ergebnis sind Polarkoordinaten. Die Höhenaufnahme erfolgt mittels trigonometrischer Bestimmung aus Distanz und Höhenwinkel. Die Höhenmessung kann neben der trigonometrischen Messung auch barometrisch oder mittels Nivellement erfolgen. Sowohl Lage- als auch Höhenmessungen sind stark von der Begehbarkeit des Geländes abhängig. Außerdem ist eine rechnerische Nachbearbeitung sowie kartenmäßige Auswertung erforderlich. Durch Triangulation von Lagefestpunkten kann in weiterer Folge ein größerer Teil der Erdoberfläche vermessen werden. Die damit verbundene Aufteilung einer Fläche in Dreiecksnetze und deren Ausmessung ist Basis der Landesaufnahme. Als Messinstrumente in der Tachymetrie können Theodolit, Tachymeter oder elektronischer Tachymeter (=Totalstation) herangezogen werden (siehe Abbildung 26). [vgl. spe-01: Tachymetrie, Vermessung]



Abbildung 26: Theodolit vs. digitales Tachymeter [arc-18b] [ver-15]

Der Theodolit dient zur Bestimmung von Horizontalwinkel und Zenit- bzw. Vertikalwinkel. Diesem bereits etwas veraltetem Winkelmessgerät folgte das Tachymeter. Es bietet neben der Möglichkeit die Horizontalrichtung und den Vertikalwinkel zu messen auch eine Funktion zur Messung von schrägen Distanzen, also Höhenunterschieden zwischen Standpunkt und Geländepunkt. Auch die Funktionsweise des Tachymeters wurde weiterentwickelt. Mittlerweile kommen elektronische multifunktionale Video-Tachymeter mit automatischer Zielverfolgung zum Einsatz. Diese Totalstationen sind bereits mit einem integriertem GPS und 3D-Laserscanner ausgestattet. [vgl. spe-01: Tachymetrie, Vermessung] Die Vermessungen mit diesen Tachymetern sind vor allem dann sinnvoll, wenn

das Aufnahmegebiet relativ klein ist, die Aktualisierungsarbeiten von begrenztem Umfang sind, ein Bildflug samt anschließender Auswertung zu kostenintensiv ist, die Witterungsverhältnisse bei Termindruck keinen Bildflug zulassen, Luftbildauswertungen terrestrisch geprüft werden müssen oder weitläufige Waldgebiete eine Luftbildauswertung nicht gestatten. [vgl. HAK-02: 310ff.] Das Gelände wird punktweise erfasst. Bei topographischen Objekte, wie z.B. Gewässern, werden die zu messenden Punkte umrissartig verteilt. Bei den Geländelinien, wie z.B. Gerippe-, Fall-, Form- und Kantenlinien liegen die vermessenen Geländepunkte genau darüber. Die Anzahl der aufgenommenen Punkte ist von den Geländebeziehungen, Genauigkeitsansprüchen und dem Kartenmaßstab abhängig. Bei einem Maßstab von 1:5.000 kann man von etwa 300 - 700 Punkten je Quadratkilometer ausgehen. [vgl. HAK-02: 311] Im Gegensatz zu den (elektronischen) Tachymetern bei denen die Koordinaten der gemessenen Geländepunkte aus polaren Messergebnissen berechnet werden müssen, werden bei der satellitengestützten Punktbestimmung die Koordinaten direkt bestimmt. Die so gewonnenen Ergebnisse sind allerdings noch zu wenig um ein Relief zu bauen, fließen aber in den Prozess der Kartenerstellung bzw. der Bildung digitaler Geländemodelle (näheres zum Aufbau von DGMs weiter unten) ein. Nachdem nun die terrestrische Vermessungsweise der Lage und Höhe von Geländepunkten bekannt ist, wird in den nachfolgenden Kapiteln ein Überblick über die Datenaufnahme und -auswertung in der Photogrammetrie und Fernerkundung gegeben. [vgl. spe-01: Tachymetrie, Vermessung]

#### **4.1.2 Hydrographische Vermessung**

Hydrographische Vermessungen beziehen sich auf die vom Wasser bedeckte Erdoberfläche, Inseln, Häfen, Uferbefestigungen, Riffe, Seezeichen, Leuchtfeuer, Wracks, usw. und sind im Reliefbau von Bedeutung falls Meeresküsten oder in Bezug auf diese Arbeit, Seen im darzustellenden Geländeausschnitt liegen. Hydrographische Vermessungen bestehen aus Tiefen- und Lagemessungen sowie deren Korrektur und Zuordnung. Die Tiefenmessung (Lotung) nutzt Echolote nach dem Schallprinzip und erfolgt punktweise. Dabei wird die Laufzeit abgestrahlter Ultraschallimpulse zwischen dem fahrenden Schiff und dem Gewässerboden registriert und als Tiefenangabe gespeichert oder als Bodenprofil gezeichnet. Temperatur und Salzgehalt des Wassers haben Einfluss auf den Schall und müssen vorab bekannt sein. Um statt der Erfassung von Bodenprofilen flächenhafte Ergebnisse zu erzielen, werden Bodenkartenschreiber oder Fächerecholote eingesetzt. Erstere erlauben durch die Aufnahme einer größeren Anzahl an Echoloten, die an Auslegern auf dem Schiff befestigt sind, eine bandförmige Flächenerfassung. Bei der Fächerecholot-Methode schwenken diese senkrecht zur Fahrtrichtung hin und her. Lasermessungen sind auf Grund der Trübung des Wassers nur bis zu einer Tiefe von 50 m möglich. [vgl. HAK-02: 313f.] Lagemessungen (Ortungen) bei Binnengewässern und in Küstennähe bedienen sich den selben Methoden wie die terrestrische Vermessung. Auf hoher See kommt vor allem die GPS-gestützte Positionsbestimmung zum Einsatz. Bei der Korrektur (Beschickung) der Daten muss die gemessene Tiefe die sich auf die reale Wasseroberfläche bezieht, auf eine

Höhenbezugsfläche, meist der Landeshorizont, umgerechnet werden. Bei der Verknüpfung (Zuordnung) von Lotung und Ortung, wird jeder Tiefenmessung eine bestimmte Schiffsposition durch simultane Zeitmessung zugeordnet. Die anschließende Darstellung von Tiefenlinien beruht auf digitalen Rechentechniken, die bei speziellen Vermessungsschiffen bereits an Bord möglich sind. [vgl. HAK-02: 313f.]

### 4.1.3 Photogrammetrie

Die ISPRS (=International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) definiert die Photogrammetrie wie folgt:

*„Photogrammetry is the science and technology of extracting reliable three-dimensional geometric and thematic information, often over time, of objects and scenes from image and range data [isp-16].“*

Photogrammetrische Verfahren haben gegenüber der terrestrischen Vermessung den Vorteil auch in schwer zugänglichem Gelände präzise Ergebnisse zu liefern. Bei der **terrestrischen Photogrammetrie** werden Fotografien von Bodenstandorten, bei der **Aerophotogrammetrie** durch fernerkundliche Messungen (näheres dazu in Kapitel 4.1.4) vom Flugzeug aus aufgenommen. Die terrestrische Photogrammetrie eignet sich vor allem im Hochgebirge für die Aufnahme von Grundriss- und Höhenmessungen. Von einem nach Lage und Höhe aus bekannten Standpunkt wird das Gelände in festgelegter Richtung fotografiert. Auf einer vorab genau ausgemessenen Standlinie können beliebig viele Standpunkte gewählt werden. Für die nachfolgende Auswertung am Arbeitsplatz werden zwei nahe beieinander gelegene und in parallele Richtung aufgenommene Messbilder herangezogen und zuerst entzerrt. [vgl. IMH- 68: 121ff.] [WILL-90: 136] Beschränkt sich die Auswertung auf eine reine Bildinterpretation, genügt für die Betrachtung ein Stereoskop, welches einen räumlich-körperlichen Eindruck des Fotopaars entstehen lässt. Für Bildmessungen und die Erstellung von Höhenlinien bedarf es einem Stereoautographen. Da die reine analoge stereoskopische Auswertung von terrestrischen Aufnahmen mittlerweile überholt ist, kann bei analogen Bildern auch mittels analytischem Auswertegerät gearbeitet werden. [vgl. HAK-02: 325ff.] Die Messwerte werden mit Hilfe von Analog-Digital-Wandlern vom Rechner des Systems eingelesen und in die zugeordneten Bildkoordinaten transformiert. Das Ergebnis der Auswertung ist eine digitale Kartierung, die auf dem Bildschirm visualisiert und für die weitere Verarbeitung abgespeichert wird. [vgl. spe-01: analytisches Auswertegerät] Werden die analogen Bildaufnahmen vorab gescannt oder liegen bereits digitale Aufnahmen vor, können diese mit einem digitalen Auswertegerät, einer sogenannten Photogrammetrischen Workstation, weiterverarbeitet werden. In der Aerophotogrammetrie kommen vorwiegend Luftbildmesskameras aufgrund ihrer hohen geometrischen Auflösung zum Einsatz. Seit dem Jahr 2000 wird auch der Einsatz digitaler Luftbildkameras in der Aerophotogrammetrie erprobt. In der terrestrischen Photogrammetrie stehen seit etwa 1990 leistungsfähige digitale Kameras zur Verfügung.

[vgl. spe-01: Photogrammetrie] Um die Objekte optimal erfassen zu können, werden überwiegend Waagrechtbilder mit horizontaler Aufnahmeachse aufgenommen. Es können aber auch Steil- und Schrägbilder aufgenommen werden. [vgl. HAKE: 318f.; 326f.] [IMH- 68: 123]

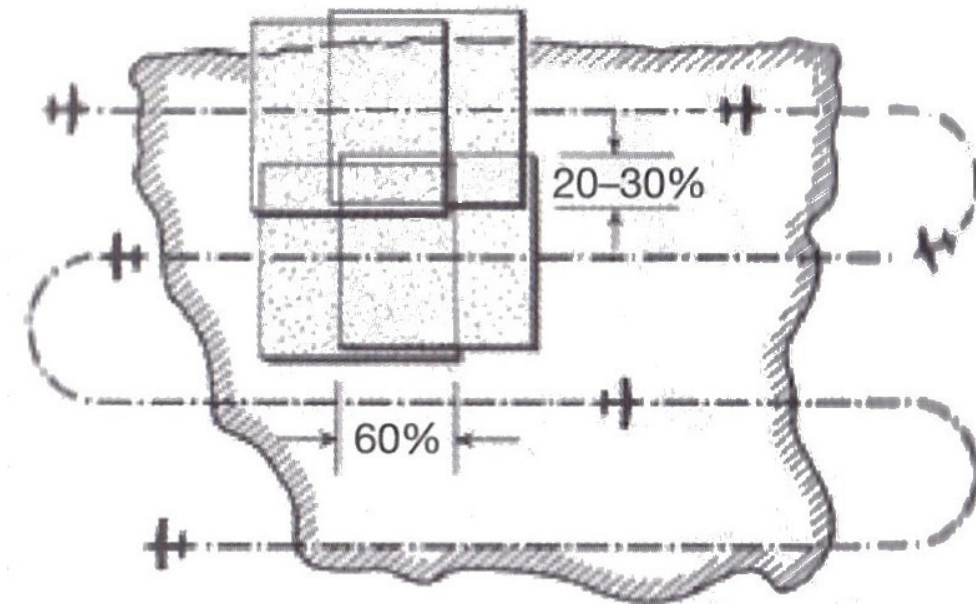


Abbildung 27: Anordnung eines Bildfluges [HAK-02: 319]

In der Aerophotogrammetrie werden die Bilder streifenweise und sich stückweise überlappend aufgenommen. Die Flugstreifen verlaufen bevorzugt parallel in Ost-West- oder Nord-Süd-Richtung. Zwischen den Streifen besteht eine Querüberdeckung von 20-30%. Die einzelnen Bilder innerhalb der Flugstreifen überlappen sich mindestens zu 60% (siehe Abbildung 27). Die Steilbilder werden mit genähert lotrechte Aufnahmeachse der Kamera gemacht. Das Bildformat beträgt 23 x 23 cm. Die Flughöhe liegt meistens zwischen 300 und 7500 m. [vgl. HAKE: 318f.; 326f.] [IMH- 68: 123]

Zu den Hauptanwendungsgebieten der Photogrammetrie zählen die Generierung von geodätischen Basisdaten für die Herstellung und Aktualisierung topographischer und thematischer Karten sowie ihrer Derivate in Geoinformationssystemen, die Bestimmung von Objektkoordinaten für diskrete Punkte des aufgenommenen Objektes, die Erzeugung von Luftbildkarten sowie die Gewinnung Digitaler Höhenmodelle. Die damit verbundene photogrammetrische Bildauswertung erfolgt anwendungsbezogen und entsprechend der Anzahl der in die Auswertung einfließenden Bilder. Es ergibt sich somit das Verfahren der **Einbild-, Zweibild- und Mehrbildauswertung** (siehe Abbildung 28). [vgl. spe-01: Photogrammetrie; photogrammetrische Bildauswertung]

Während bei der Einbildauswertung nur zweidimensionale Informationen erfasst werden können (z. B. der Grundriss eines Geländeabschnitts), gestattet die gemeinsame Auswertung von mehreren Bildern eine dreidimensionale Messung der aufgenommenen Objekte. [vgl. spe-01: Photogrammetrie; photogrammetrische Bildauswertung]

Die **Einbildauswertung** beseitigt die Verzerrung in den Steilaufnahmen durch optische Projektion oder numerische Transformation der Einzelbilder unter Einbeziehung von Höheninformationen des erfassten Geländeabschnitts. Gleichzeitig wird auch ein einheitlicher runder Bildmaßstab erreicht. Das Ergebnis sind entzerrte Einzelbilder, Orthophotos, Bildpläne, Orthophotokarten oder analoge bzw. digitale Kartierungen eines Geländeabschnitts durch z.B. Monoplotting. [vgl. spe-01: Photogrammetrie; photogrammetrische Bildauswertung]

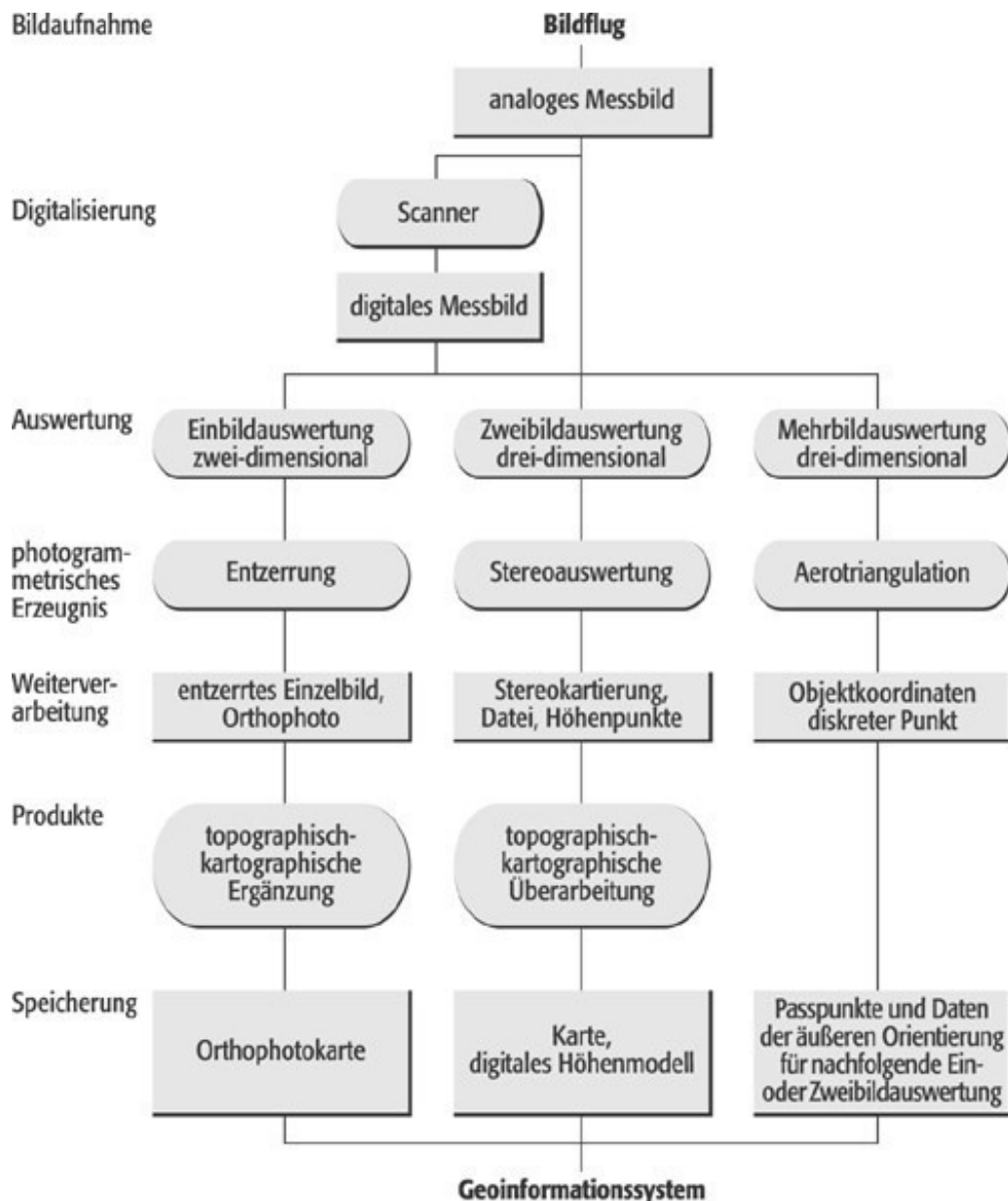


Abbildung 28: Ablauf in der Photogrammetrie [spe-01: Phtogrammetrie]

Mithilfe der meist stereoskopischen **Zweibildauswertung** durch einen Operateur können dreidimensionale geometrische Informationen aus Bildpaaren mit einer entsprechenden



Bildüberdeckung gewonnen werden. Dreidimensionale Objekte können punkt- oder linienweise vermessen sowie graphisch ausgegeben oder als digitale Kartierung visualisiert und gespeichert werden. Die Ableitung digitaler Höhenmodelle der Geländeoberfläche erfolgt in analytischen Auswertegeräten visuell durch automatisches lagemäßiges Anfahren der Geländepunkte mit einer Messmarke. Bei Vorliegen digitaler Bilder erfolgt die Orientierung dieser durch Methoden der digitalen Bildzuordnung weitgehend automatisch. Auch die dreidimensionale Aufnahme von Punkten der Geländeoberfläche erfolgt automatisch und kann zur Generierung eines digitalen Höhenmodells genutzt werden. [vgl. spe-01: Photogrammetrie; photogrammetrische Bildauswertung]

Bei der **Mehrbildauswertung** wird mit reihenweise aufgenommenen Luftbildern, die eine entsprechende Bildüberdeckung mitbringen, gearbeitet. Dabei werden durch Aerotriangulation alle in die Rechnung einbezogenen photographischen oder digitalen Messbilder eines Bildblockes mathematisch zusammengeschlossen. Die Triangulation erfolgt in Form der Modell- oder Bündeltriangulation. Als Ergebnis erhält man die Objektkoordinaten aller in die Triangulation einbezogenen Bildpasspunkte sowie die Daten der äußeren Orientierung der Messbilder. In der Aerophotogrammetrie werden die ausgewählten und gemessenen Punkte als Passpunkte für die Orientierung der Bilder bei der Ein- und Zweibildauswertung genutzt. In der terrestrischen Photogrammetrie wird dieses Auswertungsverfahren direkt zur Bestimmung der dreidimensionalen Objektkoordinaten diskreter Punkte genutzt. So kann das aufgenommene Objekt geometrisch rekonstruiert werden. [vgl. spe-01: Photogrammetrie; photogrammetrische Bildauswertung]

Die Vorteile der Photogrammetrie gegenüber der terrestrischen Vermessung sind die Einsparung zeit- und kostenintensiver geodätischer Feldarbeit, die Möglichkeit schwer zugängliche Gebiete erfassen zu können sowie die äußerst exakte Erfassung des Reliefs. Werden Höhenlinien durch analoge Stereoauswertung generiert, so sind diese geometrisch genauer und formtypischer als bei tachymetrischen Messungen. Photogrammetrische Verfahren sind bis zu einem Kartenmaßstab von etwa 1:100.000 anwendbar und eignen sich auch für die Aufnahme von kartographisch wenig erschlossenen Gebieten, sowie zur Kartenaktualisierung die gleichzeitig auf verschiedene Maßstäbe anwendbar ist. Außerdem ist die häusliche Ausmessung der Luftbilder wetterunabhängig. Die Aufnahme der Luftbilder ist hingegen wetterabhängig. Es müssen geeignete Witterungsverhältnisse für eine Befliegung herrschen und bewaldete Gebiete sollten nach Laubabwurf überflogen und aufgenommen werden. [vgl. HAK-02:328f.] [WILL-90: 137f.] In der Fernerkundung gibt es aber auch wetterunabhängige Aufnahmeverfahren, die im nächsten Kapitel vorgestellt werden.

#### 4.1.4 Fernerkundung

Der Begriff Fernerkundung „umfasst den Komplex der berührungsfreien quantitativen und qualitativen Aufzeichnung, Speicherung, thematischen Verarbeitung und Interpretation bzw. Klassifikation von objektbeschreibender elektromagnetischer Strahlung mittels geeigneter abbildender oder nichtabbildender Sensoren, analoger oder digitaler Datenträger und analoger oder digitaler Bildanalyse“ [spe-01: Fernerkundung]. Die ISPRS definiert die Fernerkundung (engl. remote sensing) wie folgt:

*„Remote sensing is the science and technology of capturing, processing and analysing imagery, in conjunction with other physical data of the Earth and the planets, from sensors in space, in the air and on the ground [isp-16].“*

Dabei „werden sowohl analoge als auch digitale Erfassungs- und Verarbeitungsmethoden eingesetzt. Fernerkundungssensoren werden an Bord von Flugzeugen und Satelliten mitgeführt. Die Fernerkundung bietet die Möglichkeit, große Gebiete relativ schnell zu erfassen und Daten i.d.R. in Rasterform bereitzustellen. Zu den bekanntesten Vertretern unter den Satellitenfernerkundungssensoren zählen etwa SPOT, LANDSAT und Sentinel [ros-01: Fernerkundung].“

Nach Hake herrscht in der Photogrammetrie die geometrische Bildmessung in analoger Form oder im digitalen Vektormodus vor, in der Fernerkundung im Rastermodus [vgl. HAK-02: 317]. Ein weiteres Unterscheidungs- bzw. Abgrenzungsmerkmal ist, dass in der Photogrammetrie in der Regel ein bestehender Zustand erfasst wird, während sich die Fernerkundung oft mit der Beschreibung dynamischer Vorgänge (multitemporale Anwendungen, change detection) beschäftigt. [vgl. qui-18]

Historisch hat die Fernerkundung bereits eine fast zweijahrhundertwährende Geschichte. Das erste dokumentierte photographische Luftbild nahm Gaspard Félix Tournachon (genannt Nadar, 1820-1910) im Jahr 1858 in der Nähe von Paris von einem Ballon aus auf. Das erste Luftbild aus dem Flugzeug stammt von Wilbur Wright (1867-1912) und wurde im Jahr 1909 aufgenommen. Das erste photographische Satellitenbild stammt von der amerikanischen Explorer-6-Mission im Jahre 1959 (Corona). Das erste digitale Satellitenbild für Erderkundungszwecke wurde im Jahr 1972 von dem Scanner an Bord des amerikanischen ERTS-1-Satelliten (Earth Resources Technology Satellite, ab 1975 LANDSAT) aufgenommen. [vgl. ALB-09: 3] [spe-01: Fernerkundung]

Fernerkundungssensoren können in **Kameras** für photographische Aufnahmen, **optische Sensoren bzw. Scanner** zur Datenaufnahme durch Abtastung, **abbildende Spektrometer**, **Mikrowellen- bzw. Radarsysteme** zur Aufnahme nach dem Radarprinzip sowie **Laserscanningsysteme** unterschieden werden.

Bei den optischen Sensoren lassen sich zwei digitale bildgebende Sensoren unterscheiden: **Rotationsscanner (optisch-mechanisches System)** und **Zeilenscanner (optisch-elektronisches System, z. B. SPOT, IRS)**. Der Rotationsscanner nimmt die Bilder mit einem

rotierenden Spiegel quer zur Flugrichtung auf. Eine Umdrehung des Scanners ergibt eine Bildzeile. Der Zeilenscanner nimmt die Bilder in Flugrichtung auf. Da während der Bildaufnahme keine mechanische Bewegung stattfindet, ergibt sich eine höhere geometrische und radiometrische Auflösung als beim Rotationsscanner. Außerdem hat der Zeilenscanner eine geringere Größe und wiegt weniger. Obwohl der optomechanische Scanner eine höhere spektrale Auflösung aufweist, überwiegen die Vorteile des Zeilenscanners wodurch dieser heute als Standardsystem gilt. Die **geometrische Auflösung** kennzeichnet die entsprechende Ausdehnung eines Bildelements (Pixel) auf der Erdoberfläche. Hochauflösende Aufnahmen wie jene die mittels GeoEye-1 Sensor aufgenommen wurden, erreichen eine geometrische Auflösung von bis zu 41 cm. Abbildung 29 gibt einen Überblick über die geometrische Auflösung der verschiedenen Fernerkundungssatelliten. [vgl. ALB-09] [spe-01: Fernerkundung]

Sensor	Pan	Blau	Grün	Rot	NIR	MIR	MIR	Thermal
Landsat MSS			80	80	80	80		
Landsat TM		30	30	30	30	30	30	120
Landsat ETM+	15	30	30	30	30	30	30	60
SPOT HRV	10		20	20	20			
SPOT HRVIR	10		20	20	20	20		
SPOT HRG	5		10	10	10	20		
IRS LISS	6		24	24	24	70		
Ikonos	1	4	4	4	4			
Quickbird	0.6	2.6	2.6	2.6	2.6			
GeoEye-1	0.4	1.6	1.6	1.6	1.6			

x räumliche Auflösung in m

Abbildung 29: Geometrische Auflösung von Fernerkundungssatelliten [AUB-11]

Die **spektrale Auflösung** gibt die Anzahl und Bandbreite der Spektralkanäle an, die der Sensor differenzieren kann. Panchromatische Sensoren sind beispielsweise nur für ein breites Spektrum empfindlich und bilden einen Kanal ab. Multispektral-Scanner registrieren mehrere kleinere Ausschnitte des Spektrums und weisen drei bis sieben Kanäle auf, während Hyperspektral-Scanner über 100 Kanäle abbilden können. Die **radiometrische Auflösung** beschreibt das Differenzierungsvermögen innerhalb eines Spektralkanals und gibt an mit wie vielen Graustufen ein Bildelement dargestellt wird. Die radiometrische Auflösung wird in Bit (Bildtiefe) angegeben und ist von der geometrischen und spektralen Auflösung abhängig (1 Bit = 2 Graustufen, 8 Bit = 256 Graustufen). Im Allgemeinen besitzen

photographische Systeme eine hohe geometrische und geringe spektrale Auflösung, während nichtphotographische Systeme eine hohe spektrale aber geringere geometrische Auflösung aufweisen. [vgl. ALB-09] [spe-01: Fernerkundung]

Messbildkameras nehmen photographische (analoge) Bilder mit spektraler Auflösung im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts und im nahen Infrarot (0,4 - 1,0  $\mu\text{m}$ ) auf. Zur Gewinnung von digitalen Bildern in Form von zeilen- und spaltenweise angeordneten grauwertkodierte Bildelementen dienen die oben genannten Rotations- und Zeilenscanner sowie abbildende Spektrometer und Radiometer. Diese haben ihre spektrale Auflösung im sichtbaren Bereich, im nahen, mittleren und thermischen Infrarot sowie im Mikrowellenbereich. Radarantennen haben ihre spektrale Auflösung im Mikrowellenbereich. Die Wellenlänge von Laserscanningsystemen liegt meist im nahen Infrarotbereich (0,8 - 1,5  $\mu\text{m}$ ). Abbildung 30 gibt einen Überblick über die Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums. [vgl. ALB-09] [spe-01: Fernerkundung]

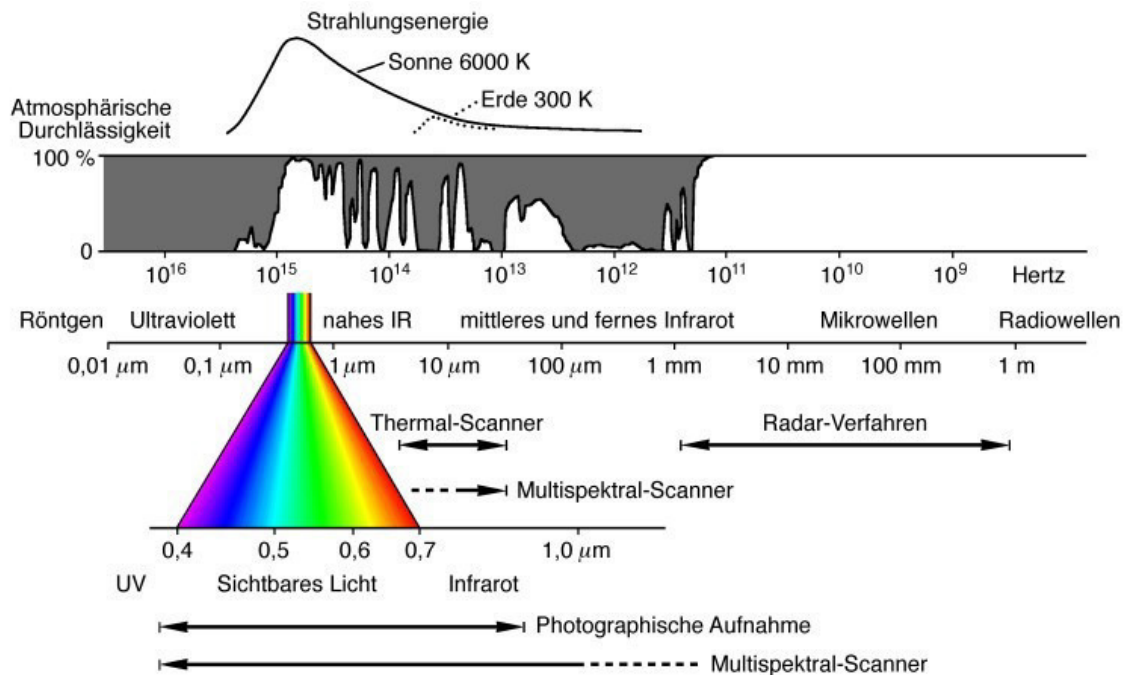


Abbildung 30: Elektromagnetisches Spektrum [ALB-09: 11]

Die Fernerkundungssensoren arbeiten passiv oder aktiv. **Passive Fernerkundungssysteme** zeichnen die in der Natur vorhandene elektromagnetische Strahlung auf. Dabei kann Sonnenstrahlung von der Erdoberfläche bzw. von dem zu beobachtendem Objekt reflektiert oder Eigenstrahlung die ein Körper aufgrund seiner Oberflächentemperatur (Thermalstrahlung) abgibt, aufgenommen werden. Zu den passiven Systemen zählen etwa LANDSAT, SPOT, IKONOS, QuickBird, IRS, GeoEye-1 sowie photographische Aufnahmesysteme. **Aktive Fernerkundungssysteme** wie Radar oder Laser (Lidar) senden kohärente Strahlungspulse aus und zeichnen die Laufzeit der von der Erdoberfläche rückgestreuten Signale auf. Hierbei wird das zu erkundende Objekt oder die Oberfläche von



einem Sender aus mit Mikrowellen oder Strahlung anderer Wellenlängenbereiche bestrahlt und deren Rückstreuung über eine Antenne empfangen. Aktive Fernerkundungsverfahren operieren im Gegensatz zu passiven Fernerkundungssystemen unabhängig von den natürlichen Bestrahlungsverhältnissen der Atmosphäre und sind zum größten Teil wetterunabhängig. Sie finden häufig Anwendung in der Ozeanographie (Wellenmuster, Meereisbedeckung, Ölverschmutzungen), Glaziologie, Geologie (Tektonik), Hydrologie (Bodenfeuchte, Hochwasser, Schneebedeckung) und der Meteorologie. Für Landnutzungs- und Vegetationsklassifikationen gewinnen sie vor allem in Gebieten mit hoher Bewölkung an Bedeutung. [vgl. ldf-17: aktives System] [spe-01: Satellitenbild]

**Mikrowellensysteme** nehmen Daten mit Wellenlängen im mm- bis m-Bereich auf und können selbst auch in **aktive und passive Systeme** unterschieden werden. Mikrowellenradiometer arbeiten mit passiven Sensoren. Da die Signale von geringer Intensität sind, lassen sie sich nur in grober geometrischer Auflösung erfassen. Als Folge können durch passive Mikrowellen-Fernerkundung keine zur Interpretation geeigneten Bilder erzeugt werden. Diese Radiometer kommen vorwiegend in der Ozeanographie, Meteorologie und Hydrologie zum Einsatz, da sie die Strahlung von Schnee, Eis, Wolken, Wasserkörpern, der Erdoberfläche und der Sonne messen können. **Aktive Mikrowellensysteme** (Radar - Radio detection and ranging) lassen sich in bildgebende und nicht-bildgebende (Altimeter, Scatterometer, Niederschlagsradar oder Wetterradar am Boden) unterscheiden. Aktive bildgebende Mikrowellensysteme nehmen Strahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen 1 und 100 cm auf und liefern detaillierte Bildwiedergaben. Da die Mikrowellen leichten Regen, Dunst, Rauch und Wolken fast ungestört durchdringen können, ist diese Methode der Datenaufnahme wetterunabhängig. Die Strahlung wird vom Systemträger aus schräg auf die Erdoberfläche abgestrahlt und die reflektierten Signale in Bilddaten umgesetzt. Zu den aktiven Sensoren zählt etwa das Side Looking Airborne Radar (SLAR), bei dem der Mikrowellenimpuls von einem am Flugzeug getragenen Sender aus abgestrahlt wird. Um Radarsysteme von Satelliten aus zu betreiben, müssen diese mittels Synthetischer Apertur (engl. Syntetic Aperture Radar = SAR) ausgestattet sein, wie etwa das Shuttle Imaging Radar (SIR-A, SIR-B) oder der European Remote Sensing Satellite (ERS-1, ERS-2). Ein weiterer Fortschritt in der Radartechnologie ist der Einsatz der Radarinterferometrie (eng. Interferometric Synthetic Aperture Radar = InSAR). Dabei wird das Gelände von zwei unterschiedlich positionierten Sensoren aufgenommen. Die vom Gelände reflektierte Strahlung wird von zwei nebeneinander angeordneten Antennen empfangen. Da die Strahlung kohärent ist, wird nicht nur die Intensität der Reflexion, sondern auch Phaseninformationen, die von der Entfernung zwischen Geländepunkt und Sensor abhängen, gemessen. Aus den Phasendifferenzen können Informationen über die Topographie des Geländes gewonnen werden und in weiterer Folge kann die Höhe eines Geländepunktes berechnet werden. Bei der Radarinterferometrie gibt es zwei Aufnahmemethoden. Die Single-Pass-Interferometrie und die Repeat-Pass-Interferometrie. Bei der Single-Pass-Methode findet die Aufzeichnung mit einer Sende- und Empfangsantenne und einer zweiten, um einige Dezimeter versetzten

Antenne statt. Das Aufnahmegebiet muss dabei nur einmal mit dem Flugzeug überflogen werden. Soll die Radarinterferometrie in Satellitenhöhe zum Einsatz kommen, bedingt es größerer Abstände zwischen den beiden Antennen. Hierfür muss das Aufnahmegebiet nacheinander und aus einer geringfügig anderen Bahn erfasst werden. Daher wird das Verfahren auch Repeat-Pass-Interferometrie genannt. Der räumliche Abstand der Bahnen liegt etwa zwischen 80 und 300 m. Sind die Aufnahmen zeitlich um etwa 24 Stunden versetzt, können Veränderungen der Atmosphäre, wie Wind, Niederschläge, etc. die Radarsignale beeinflussen und Ergebnisse verfälschen. Daher wurden bei der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) im Februar 2000 zusätzlich zu den Hauptantennen weitere Empfangsantennen an einem 60 m langen Masten angebracht. Aus den aufgezeichneten Daten konnten dann nach umfangreichen Berechnungen Digitale Höhenmodell für weite Teile der Erdoberfläche in einem einheitlichen Bezugssystem gewonnen werden. [vgl. ALB-09: 55ff.] [ldf-17: Mikrowellen-Fernerkundung] Seit dem 7. August 2015 sind die kompletten SRTM-Daten mit einer Auflösung von 1 Bogensekunde (ca. 30 m) frei verfügbar.

Neben diesen Radarsystemen sind vor allem Lasersysteme zur Erzeugung hochauflösender digitaler Geländemodelle ein wichtiger Prozess der Datengewinnung. Bei der Aufnahme mit einem **Laserscanner** bzw. auch **Lidar** (Light Detection and Ranging, in Anlehnung an Radar) genannt, wird die Geländeoberfläche von einem Flugzeug aus punktwise erfasst. Dabei tastet ein rotierender Laserstrahl die Erdoberfläche ab (aktives System). Über Laufzeitmessung wird die Distanz zwischen dem Sensor am Flugzeug und einem Punkt auf der Erdoberfläche bestimmt. Es wird also primär kein Bild, sondern eine 3D-Punktwolke, die die Geländeoberfläche geometrisch beschreibt, erzeugt. Um die räumliche Lage der gemessenen Punkte exakt bestimmen zu können, wird die Orientierung des Sensors fortlaufend mittels GPS/INS (Global Positioning System/Inertial Navigation System, inertiales Navigationssystem) ermittelt. Die punktdichte hängt von der Flughöhe und dem Sensortyp ab (0,25 - 20 Punkte/m<sup>2</sup>). Die Höhengenaugigkeiten können bei unter 10 cm liegen. Das Ergebnis sind die Raumkoordinaten x, y, z von einer Vielzahl an Punkten, mit deren Hilfe ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) erstellt werden kann. Da die Messungen auch Gebäude, Bäume, Masten, etc. miteinschließen, müssen diese Messwerte rechnerisch eliminiert werden um ein Digitales Geländemodell (DGM) generieren zu können. Ausgesandte Laserimpulse können zu mehreren Reflexionssignalen führen. Bei Baumbeständen kann z. B. ein erstes Echo von der Krone und ein zweites Echo vom Boden aus abgesandt werden. So können beide Oberflächen modelliert werden. Bei abbildenden Laserscannern wird neben der Distanzmessung auch die Intensität des zurückkommenden Signals gemessen, wodurch ein Grauwertbild abgeleitet werden kann. Das so gewonnene Bild dient als ergänzende Information über das Aufnahmegebiet. [vgl. ALB-09: 53ff.]

Abbildung 31 gibt einen Überblick über die verschiedenen Laserscanningverfahren gegliedert nach der Entfernung zwischen Aufnahmegerät und erfasster Gelände- bzw. Objektoberfläche.

Wird das Gelände nicht von einem im Flugzeug befindlichen Laserscanner, wie beim eben beschriebenen Airborne Laserscanning (ALS), sondern von einem am Boden befindlichen Laserscanner abgetastet, spricht man vom Terrestrischen Laserscanning (TLS). Beim ALS wird das Gelände bei einer Flughöhe von etwa 1000 m überflogen. Beim TLS weist der Laserscanner eine Reichweite von bis zu 500 m auf. Eine weitere Möglichkeit der Datenaufnahme mittels TLS wäre das Mobile Laserscanning von z.B. einem Auto oder Roboter aus. Beim Laserscanning im extremen Nahbereich beträgt die Entfernung zwischen Scanner und Objekt nur einige Dezimeter bis etwa zwei Meter. Dieses Verfahren kommt vor allem bei der Aufnahme von Kunstgegenständen oder in der Archäologie zum Einsatz. Die letzteren Laserscanning-Varianten (TLS, Mobil und Nahbereich) finden bei der Erstellung von DGMs kaum und kommen vor allem bei architektonischen oder raumplanerischen Fragestellungen oder in der Industrie zum Einsatz. TLS kann aber auch in der Lawinenforschung oder bei der Erforschung anderer Naturkatastrophen genutzt werden. [vgl. Idf-17: Airborne Laserscanning]



Abbildung 31: Laserscanning Verfahren [KRA-04: 450, 486]

#### 4.1.5 Erfassung aus originären Daten

Zu den originären Erfassungsmethoden gehört auch die Ableitung von Daten aus den Messergebnissen der oben genannten Mess- und Aufnahmemethoden bzw. deren Weiterverarbeitung. Im Reliefbau sind vor allem die Auswertung von Karten sowie digitalen Geodatenmodellen und anderen Datenquellen wie etwa Fotoaufnahmen von Bedeutung.

##### 4.1.5.1 Karten

Eine der wichtigsten, wenn nicht sogar die wichtigste Bezugsquelle für Daten bei der Erstellung von Geländereiefs, ist die Karte. Topographische Karten beinhalten die Situation (Siedlungen, Verkehrswege und -objekte, Gewässer, Bodenbedeckung, etc.), Höhendarstellungen (Höhenlinien und -punkte), Geländedarstellung, Kartenschrift sowie vereinzelte thematische Inhalte wie etwa Grenzen. Im alpinen Gelände sind vor allem die amtlichen Kartenwerke wie beispielsweise des Bundesamtes für Eich- und

Vermessungswesen (BEV), die ÖK50 und deren Vergrößerung, die ÖK25, oder etwa die LK25 des Bundesamtes für Landestopographie in der Schweiz (swisstopo) von hoher Qualität und besonderer Bedeutung im Reliefbau. Die ÖK50 bezieht sich auf Originaldaten, die bei der Ersterfassung bzw. Neuaufnahme durch photogrammetrische Auswertungen im Maßstab 1:10.000 sowie terrestrischen Ergänzungen gewonnen und anschließend für den Maßstab 1:50.000 generalisiert wurden. Die Zeichengenauigkeit der ÖK50 beträgt 0,1 mm, dies entspricht 5 m in der Natur. Der Minimalabstand zwischen zwei Signaturen beträgt 0,2 mm, dies entspricht 10 m in der Natur. [vgl. bev-18: 1] Analog erstellte Geländereliefs werden seit dem 19. Jahrhundert auf Basis von Höhenlinien angefertigt. Die Äquidistanz der Höhenschichtlinien in der ÖK50 beträgt 20 m. Alle 100 m werden Zähllinien eingefügt. Nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Äquidistanzen der Höhenlinien in anderen amtlichen topographischen Hochgebirgskarten im Alpenraum:

<b>ÄQUIDISTANZEN AMTLICHER HOCHGEBIRGSKARTEN</b>			
	<b>ÖK50</b> (Österreich)	<b>LK25</b> (Schweiz)	<b>TOP25</b> (Frankreich)
<b>Äquidistanzen</b>			
Hauptlinien	20 m	20 m	10 m
Zähllinien	100 m	100 m	50 m
Zwischenlinien	10 m	5/10 m	bei Bedarf
<b>Farbgebung</b>			
Braun	Vegetation, Fels	Vegetation	Vegetation, Fels
Blau	Gletscher	Gletscher	Gletscher
Schwarz	-	Fels	-
<b>Darstellung im Fels</b>	Hauptlinien durchgezogen	Zähllinien durchgezogen	Zähl- & Hauptlinien teilweise durchgezogen

Tabelle 2: Vergleich der Äquidistanzen in amtlichen topographischen Hochgebirgskarten

#### 4.1.5.2 Digitale Geodatenmodelle

Auch aus **digitalen Geodaten- bzw. Oberflächenmodellen** können für den Reliefbau relevante Daten gewonnen werden. Etwa für die Generierung von Höhenschichtlinien. Bei der Herstellung von computergenerierten Geländereliefs dienen digitale Geodatenmodelle direkt als Input-Daten. In der Literatur findet sich eine Vielzahl an verschiedenen Begriffen und Definitionen der einzelnen digitalen Datenmodelle. Das **digitale Oberflächenmodell (DOM, engl. digital surface model)** wird als das allgemeinste digitale Modell beschrieben. Darunter wird eine Anzahl von Werten  $z$  als Funktionen ihrer Lagekoordinaten  $x$  und  $y$  verstanden, die eine beliebige darzustellende Oberfläche beschreiben. [vgl. AUM-94: 8] Hake [2002: 343] definiert ein digitales Oberflächenmodell, als ein Modell, welches die zum Zeitpunkt der Befliegung tatsächlich vorhandene Landschaft mit zusätzlich allen festen und beweglichen Objekten, die nicht zur Geländeoberfläche zählen, wie etwa Wälder und Bauwerke (Gebäude, Brücken und Hochspannungsleitungen) sowie der ruhende und



fließende Verkehr, beschreibt. Das **digitale Landschaftsmodell (DLM**, engl. digital landscape model) definiert er als eine spezielle Art davon. [vgl. HAK-02: 343] [ldf-17: digitales Oberflächenmodell] Dieses ist im Wesentlichen mit dem Inhalt topographischer Karten kongruent und erfasst primär Objekte auf und an der Erdoberfläche sowie diese selbst [spe-01: digitales Landschaftsmodell]. Es lässt sich weiters in **digitale Situationsmodelle (DSM)** und **digitale Geländemodelle (DGM**, engl. digital terrain model (DTM)) unterscheiden. DSMs beschreiben alle diskreten Objekte mit zweidimensionalen Vektordaten. DGMs geben die Morphologie des Reliefs durch einen dreidimensionalen Punkthaufen wieder. [vgl. HAK-02: 343] Sie speichern die räumlichen Koordinaten eines Ausschnittes der Erdoberfläche. Ein DGM ist also ein Datensatz von Höhenwerten und weiteren Linienelementen, wie z. B. Bruchkanten, die einem übergeordneten Koordinatensystem zugeordnet sind und die die Geländestruktur hinreichend repräsentieren. [vgl. ldf-17: digitales Geländemodell] Weiters unterscheidet man das **digitale Höhenmodell (DHM**, engl. digital elevation model (DEM)). Darunter versteht man einen Datensatz von Höhenwerten, die einem übergeordneten Koordinatensystem zugeordnet sind, die die Höhenstruktur des Objektes, z. B. des Geländes, hinreichend repräsentieren. [vgl. ldf-17: digitales Höhenmodell] Das DGM beschreibt also die Geländestruktur, während das DHM die Höhenstruktur beschreibt. Man könnte meinen, dass ein DGM einem veredelten DHM entspricht, da neben Massenpunkten (Knoten im Dreiecksnetz oder im regulären Gitter) auch attributierte Objektklassen, wie z. B. Bruchkanten, markante Höhenpunkte sowie Struktur- bzw. Gerippelinien darin abgelegt sind. [vgl. spe-01: digitales Höhenmodell] Aumann [1994: 8] unterscheidet neben dem allgemeinen digitalen Oberflächenmodell, das digitale Höhenmodell, wenn Höhenangaben vorhanden sind, das digitale Geländemodell, wenn die Höhenangaben für Punkte auf der Geländeoberfläche gelten und das digitale Landschaftsmodell, wenn außer der Geländeoberfläche auch noch andere Erscheinungsformen der Landschaft, wie etwa die Situation daraus zu entnehmen sind [AUM-94: 8].

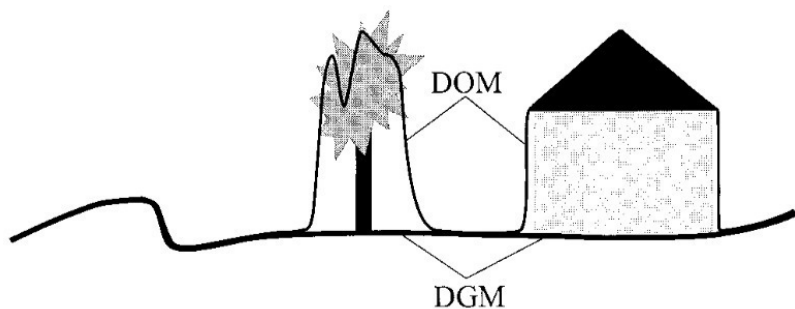


Abbildung 32: Digitales Geländemodell (DGM) und Oberflächenmodell (DOM) [KRA-04: 354]

Kraus [2004: 354] unterscheidet das allgemeine digitale topographische Modell in das digitale Geländemodell (DGM; engl. digital terrain model, DTM), welches die Geländeoberfläche ohne Vegetation und künstliche Bauten beschreibt und das digitale Oberflächenmodell (DOM; engl. digital surface model, DSM), welches die Oberfläche samt

Vegetation und Bebauung beschreibt (siehe Abbildung 32). Weiters unterscheidet er das digitale Gebäudemodell, welches die Gebäude beschreibt, das digitale Straßenmodell, welches die Straßen beschreibt, usw. [KRA-04: 354]

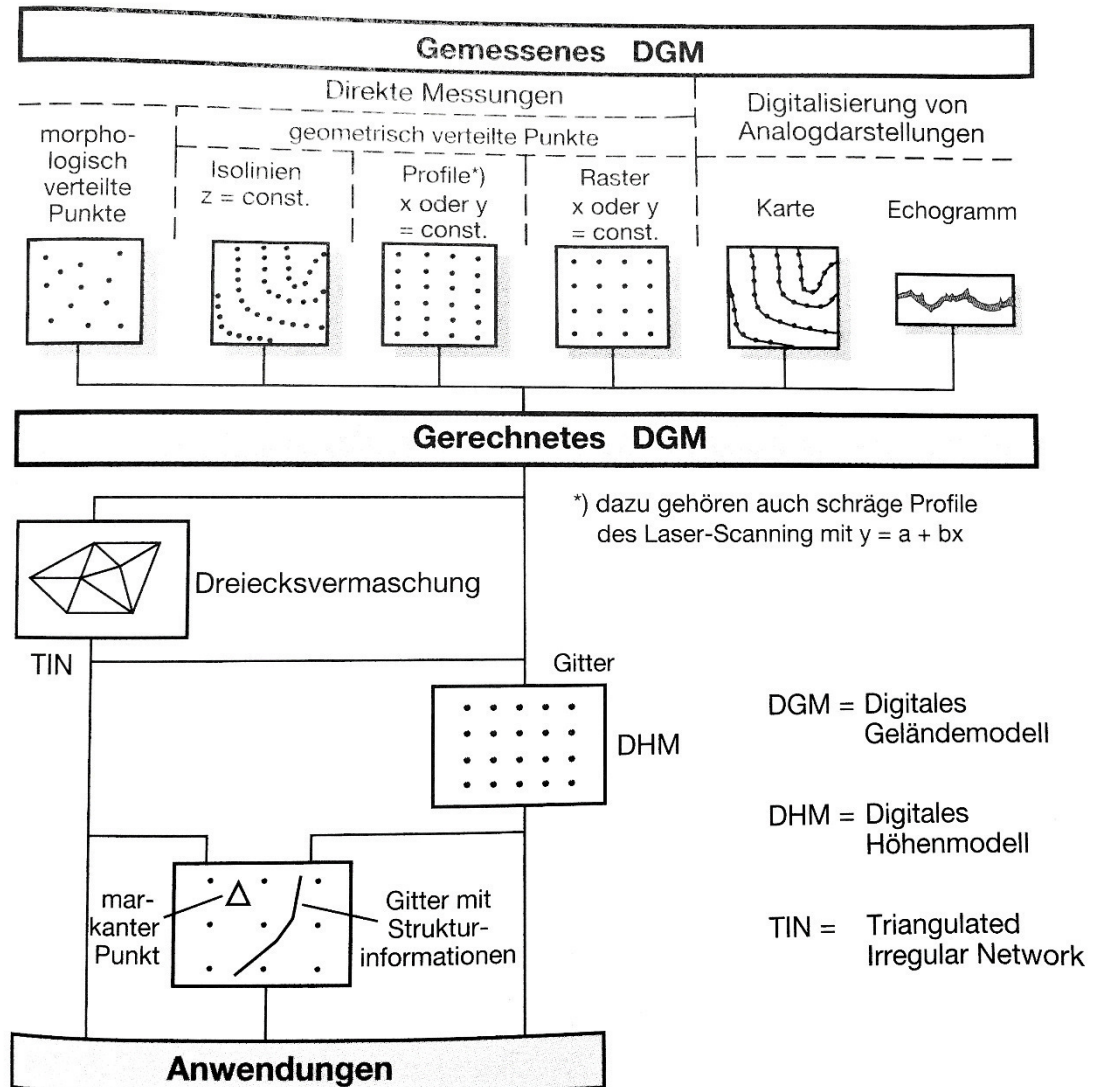


Abbildung 33: Gemessenes und gerechnetes DGM [HAK-02: 345]

Wie man sieht, finden sich in der Literatur eine große Anzahl an Begrifflichkeiten für digitale Geodatenmodelle wieder, die zum Teil auch gleichzeitig benutzt werden bzw. wird ein und das selbe Modell unterschiedlich definiert. Die einzelnen digitalen Modelle lassen sich also nicht unbedingt scharf voneinander abgrenzen. Im Kontext der vorliegenden Thematik ist aber vor allem das digitale Höhenmodell (DHM) und das digitale Geländemodell (DGM) von großer Bedeutung. Letzteres lässt sich wie folgt definieren: „Ein DGM ist eine digitale, dreidimensionale, thematische Deskription des Geländes und besitzt in der Regel neben einem Höhenmodell, eine thematische Oberflächenbeschreibung und zusätzlich geländespezifische, topographische Informationen, wie beispielsweise Strukturlinien,

Höhenpunkte, Gratlinien, Tiefenlinien u.v.m.“ [GRU-98: 76f.]. Das DGM beinhaltet also die Daten des DHM. Zur Herstellung digitaler Geodatenmodelle gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es können alle Quellen dienen, die explizit dreidimensionale Oberflächenelemente enthalten, wie etwa Karten oder Messverfahren, welche die Ableitung dreidimensionaler Koordinaten ermöglichen (z. B. Tachymetrie, Photogrammetrie und Radargrammetrie, LIDAR oder GPS). [vgl. spe-01: digitales Höhenmodell] Alle bereits oben genannten Erfassungsmethoden, liefern Daten die zur Erstellung herangezogen werden können. Aus diesem können in weiterer Folge Höhenlinien in jeder gewünschten Äquidistanz für den Bau eines Reliefs abgeleitet werden.

Für die Erstellung von DGMs gibt es mehrere Möglichkeiten. Bei der photogrammetrischen Erfassung entsteht ein aus Profilen oder Rastern bestehendes gemessenes DGM. Bei der terrestrischen Vermessung ergibt sich ein gemessenes DGM, welches aus unregelmäßig verteilten morphologischen Reliefpunkten besteht. Bei der (automatisierten) Digitalisierung von Höhenlinien aus topographischen Karten ergibt sich eine inhomogene Verteilung der Stützpunkte. Dabei ist die Punktdichte entlang der digitalisierten Höhenlinien weitaus höher als in Richtung der Falllinien. Bei allen Methoden entsteht also zuerst ein sogenanntes gemessenes DGM, welches das Relief durch ein dreidimensionales Stützpunktfeld beschreibt. Einen Überblick über die Punkteverteilung gibt Abbildung 33. Für die weitere Verarbeitung der Stützpunkthaufen zu einem gerechneten DGM wird je nach Struktur entweder eine Triangulation (Dreiecksnetz) oder eine Approximation (Gitternetz) durchgeführt. [vgl. HAK-02: 345]

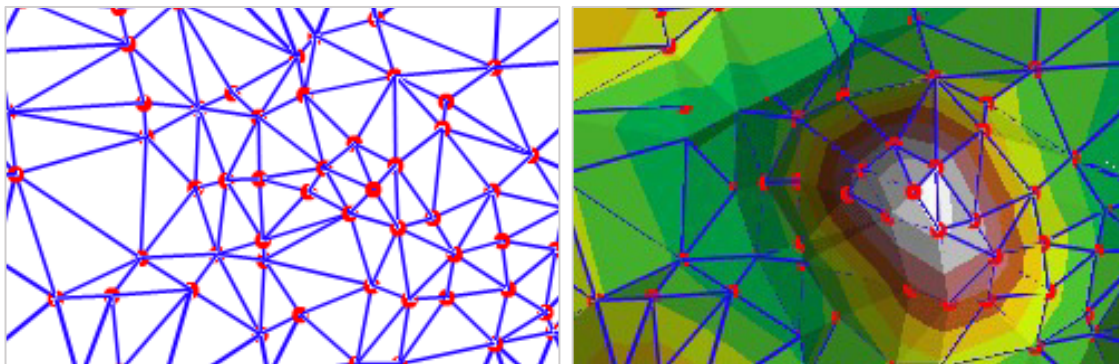


Abbildung 34: Knoten und Kanten eines Triangulated Irregular Network (TIN) [arc-18a]

Bei der Strukturierung mittels Triangulation kann bei ausreichend dichtem Stützpunktfeld eine morphologisch richtige Beschreibung des Geländes erzielt werden. [vgl. HAK-02: 345] Das Dreiecksnetz setzt sich aus einer Menge unregelmäßig geformter Dreiecke zusammen. Die Eckpunkte dieser Dreiecke entsprechen den aus der Datenerfassung stammenden Messpunkten. Der Aufbau eines solchen Dreiecksnetzes kann etwa mit der Delaunay-Methode erfolgen. [vgl. AUM-94: 11] Dabei werden die Dreiecksseiten von den Strukturlinien des Reliefs gebildet. [vgl. HAK-02: 345] Außerdem wird sichergestellt, dass kein Stützpunkt im Inneren eines Umkreises der Dreiecke liegt. Das Ergebnis stellt dann ein Triangulated Irregular Network (TIN) dar (siehe Abbildung 34). [vgl. arc-18a]

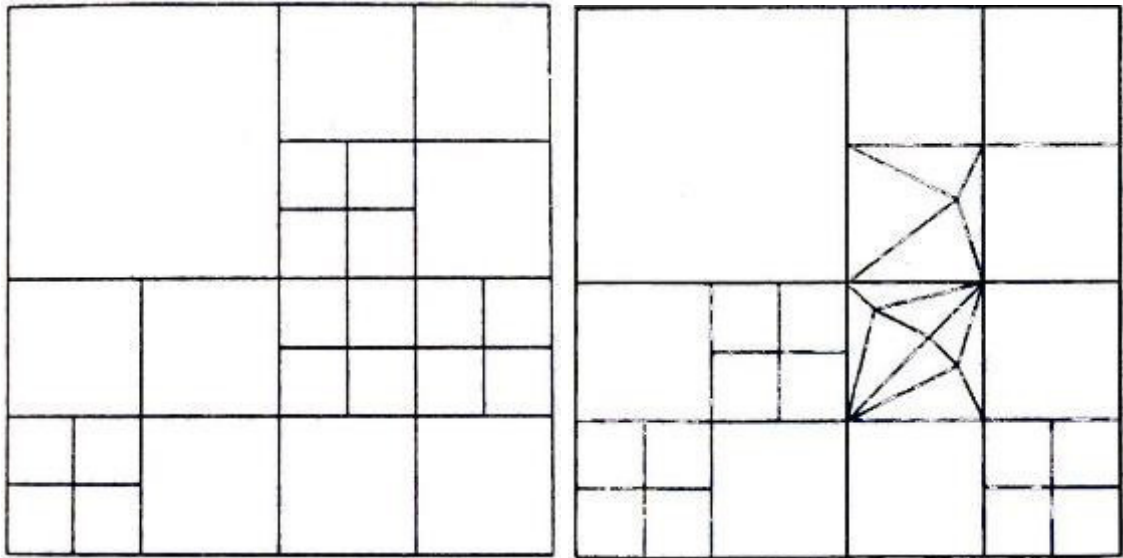


Abbildung 35: Strukturierung mittels Gitternetz (links) und Strukturierung mittels hybridem Netz (Gitternetz und Dreiecksvermaschung) (rechts) [AUM-94: 11]

Bei der Strukturierung mittels Approximation durch Flächenfunktionen ergibt sich ein für die Weiterverarbeitung und Speicherung günstiges rasterförmiges DGM. Dieses besteht aus einem Punktraster (siehe Abbildung 35). Die gitterförmig angeordneten DGM-Punkte werden durch Interpolation oder Approximation berechnet. Somit sind die Primär- bzw. Ausgangsdaten nicht mehr im DGM-Gitter enthalten. Die Maschenweite des Gitternetzes kann je nach Rauigkeit des Geländes variiert werden, außerdem bestimmt sie die Genauigkeit der Reliefapproximation sowie den Rechen- und Speicheraufwand. Um ein morphologisch korrektes DGM zu erzeugen, werden nicht nur Geländepunkte, sondern auch -linien bei der Interpolation berücksichtigt. Dadurch ergibt sich ein hybrides Netz mit zusätzlichen Dreiecksvermaschungen (siehe Abbildung 35). [vgl. AUM-94:11] [HAK-02: 345f.]

#### 4.1.5.3 Andere Datenquellen

Im Reliefbau können aber auch andere, nicht-messende Methoden für die Gewinnung von Informationen herangezogen werden, wie z.B. Photographien. Fotoaufnahmen von verschiedenen Standorten aus geben einen Überblick über die Struktur, Charakteristik und Eigenheiten von Felsformationen und -wänden um diese so naturgetreu wie möglich nachbilden zu können. Es können aber auch Filmaufnahmen, wie etwa Naturfilme oder Dokumentationen über Erstbesteigungen oder besondere Kletterrouten helfen, die Felswände und Bergspitzen im Reliefmodell zu formen. Genauso wie Postkarten, Berg- und Reiseführer oder etwa andere bereits bestehende Modelle des entsprechenden Gebietes.

---

## 4.2 Methoden der sekundären Datenerfassung im Reliefbau

Die sekundäre Datenaufnahme liefert abgeleitete Daten aus bereits bestehenden (Geo)Informationen, etwa durch Digitalisierung aus generalisierten Karten oder aus Tabellen, Diagrammen, etc. Im Reliefbau ist vor allem die Digitalisierung von Bedeutung. Möchte man beispielweise ein Geländereief von einem Gebiet erstellen, das von Luftbildern weniger gut abgedeckt ist oder weisen die Luftbilder eine schlechte Qualität oder nicht ausreichende Auflösung auf, so können die Höhenlinien aus bestehenden topographische Karten digitalisiert werden um im Anschluss ein DGM erstellen zu können. Aus diesem können dann wiederum Höhenlinien im gewünschten Maßstab bzw. mit geeigneter Äquidistanz extrahiert werden und als Vorlage im Reliefbau dienen.

## 4.3 Gegenüberstellung der relevanten Geodaten

Aus den oben genannten originären und sekundären Erfassungsmethoden ergeben sich nun folgende für die Relieferstellung relevanten Mess-Ergebnisse: **topographische Karten und DGMs** für die geometrisch richtige Erstellung der Gebirgsmassive sowie **Orthofotos, Luft- und Satellitenbilder** als gestalterische Vorlage um die Morphologie naturgetreu zu formen. Da sich diese Arbeit auf Reliefmodelle im alpinen Raum beschränkt seien an dieser Stelle kurz die verfügbaren amtlichen topographischen Karten sowie hochwertige Produkte der Verlagskartographie vorgestellt, samt deren Genauigkeit und Besonderheiten.

Die amtliche Österreichische Karte 1:50.000/25.000 basiert auf photogrammetrischer Auswertung im Maßstab 1:10.000 und anschließender Generalisierung in kleinere Maßstäbe. Nach Hake [2002: 328] ergibt sich bei der Zweibildauswertung bei Bildmaßstäben zwischen 1:10.000 und 1:30.000 eine Genauigkeit für Lage und Höhe von  $\pm 0,10$  m bis  $\pm 0,30$  m. Im Allgemeinen kann von einer Höhenungenauigkeit von  $\pm 0,1$  ‰ der Flughöhe ausgegangen werden [vgl. HAK-02: 328]. Für Karten im Maßstab 1:25.000 und kleiner liegt der Aufnahmefehler meist unter der Zeichen- und Druckgenauigkeit. [vgl. ARN-75: 267] [STE-16]

In der digitalen Photogrammetrie beträgt der Lagefehler bei einer Flughöhe von 2.000 m etwa  $\pm 0,15$  m [KRA-04: 168]. Dies entspricht einer relativen Ungenauigkeit von etwa  $\pm 0,075$  ‰ der Flughöhe. Der Höhenfehler liegt bei  $\pm 0,15$  ‰ der Flughöhe, was bei 2.000 m Flughöhe etwa  $\pm 0,30$  m entspricht. In bewaldeten Gebieten liegt dieser allerdings etwas höher [KRA-04: 359]. Nach Kraus [2004: 354] liegt nach derzeitigem Stand der Technik kein nennenswerter Unterschied in der Genauigkeit zwischen den Ergebnissen die mittels analytischen und digitalen Auswertegeräten erzielt werden vor. Dies ist auch dem Vergleich der Werte von Hake [2002: 328] und Kraus [2004: 168, 359] zu entnehmen.

Da die großräumige photogrammetrische Erhebung von Höhendarstellungen mit hohem finanziellen und technischen Aufwand verbunden ist, kommt diese Methode fast nur noch im Hochgebirge zum Einsatz. ALS bietet sich dafür als hervorragende Alternative gegenüber



photogrammetrischen Auswerteverfahren an. [vgl. KRA-04: 347] Bezüglich der Genauigkeit von ALS finden sich in der Literatur verschiedene Angaben wieder, die aber allesamt nur sehr gering voneinander abweichen. Nach Riedl [2009: 65] beträgt die Lagegenauigkeit etwa  $\pm 0,5$  m. Die Höhengenaugigkeit liegt bei etwa  $\pm 0,1$  m [RIE-09: 65]. Im Lexikon der Kartographie und Geomatik wird die Genauigkeit des Verfahrens mit etwa  $\pm 0,15$  m angegeben. [vgl. spe-01: Laserscanning] Bei Flughöhen von 1000 - 1500 m sind Genauigkeiten in der Lage von 1 m und in der Höhe von 0,1 - 0,3 m zu erreichen. [vgl. ldf-17: Airborne Laserscanning] Die räumliche Auflösung beträgt etwa 0,025 - 0,05 m. [vgl. RIE-09: 65] [STE-16: 41] Informiert man sich bei den Herstellern von flugzeuggetragenen 3D Laserscannern, wie z.B. bei der Firma Riegl – Laser Measurement Systems, so findet man derzeit je nach Scanner Genauigkeitsangaben von 10 - 25 mm vor. Das in Horn ansässige Unternehmen bietet neun ALS-Systeme an, die eine mittlere Genauigkeit von 20 mm aufweisen. [vgl. rie-18]

Beim BEV können aber nicht nur topographische Karten, sondern auch digitale Höhendaten in Form von digitalen Geländemodellen bezogen werden. Hier richtet sich die Höhengenaugigkeit nach der Bodenbedeckung (Geländeform) und der Erfassungsmethode. Die Erfassung der Daten erfolgt grundsätzlich durch eine photogrammetrische Auswertung. [vgl. bev-18: 2] Für verschiedene Bodenbedeckungen ist der mittlere Fehler der Datenerfassung der nachstehenden Tabelle zu entnehmen.

MITTLERER HÖHENFEHLER DIGITALER GELÄNDEMDELLE		
Bodenbedeckung (Geländeform)	Alte Profilmessungen	Neue Rastermessungen mit Strukturinformationen
Siedlungsgebiete, Agrarflächen, versiegelte Flächen, Gewässer, etc.	$\pm 2$ m - $\pm 5$ m	$\pm 1$ m
Ödland, Gletscher	$\pm 5$ m - $\pm 10$ m	$\pm 5$ m
Wald, Hochgebirge (Fels)	$\pm 10$ m - $\pm 25$ m	$\pm 10$ m

Tabelle 3: Mittlerer Höhenfehler digitaler Geländemodelle (Höhenraster, Höhenschichtlinien, Strukturinformationen) des BEV je nach Geländeform bzw. Bodenbedeckung [bev-18: 2]

Die Rasterweite des DGM beträgt 5 bzw. 25 m und ist pro km<sup>2</sup> um 3 bzw. 1 € zu erwerben. DGMs mit den Rasterweiten 50, 100, 250 und 500 m können unentgeltlich beim BEV bezogen werden. [vgl. bev-18: 3] Geht man von einem fertigen Geländereief im Maßstab von 1:10.000 aus, so bedingt dies die kleinste Rasterweite von 5 m. Im taktilen Modell würde diese Rasterweite umgerechnet 0,5 mm entsprechen und ist bereits abbildbar bzw. leicht mit freiem Auge erkennbar.

Beim BEV können neben topographischen Karten und DGMs auch Luftbilder bzw. bereits entzerrte Orthofotos erworben werden. Seit dem Jahre 2010 werden alle Luftbilder mit digitalen Kameras aufgenommen. Die durchschnittliche Bodenauflösung liegt bei 20 cm. Als Grundlage zur Entzerrung der Orthofotos werden die Geländehöhendaten aus dem DGM

herangezogen. Die Genauigkeit ist abhängig von der Dichte der Daten aus dem DGM und kann je nach Gelände wie folgt erreicht werden [vgl. bev-18: 4]:

- Flaches Gelände: 0,5 - 1 m
- Hügeliges Gelände: 1 - 2 m
- Gebirge: 2 - 5 m

Neben dem BEV bietet sich noch eine Vielzahl anderer Datenquellen an. Hochwertige topographische Karten können beispielsweise auch beim Alpenverein bezogen werden. Auf nationaler Ebene können etwa Orthofotos, Höhenschichtlinien oder DGMs unter der Homepage „Geoland.at“ bzw. „Data.gv.at“ aufgerufen werden [vgl. geo-18] [dat-18]. Hier finden sich beispielsweise ein DGM für ganz Österreich aus ALS-Daten mit einer Auflösung von 10 m sowie Orthofotos mit einer maximalen Pixelauflösung von 29 cm. [vgl. dat-18a, b] Auf Bundesländerebene werden weitere Daten angeboten. Für das Land Tirol stehen z.B. DGMs mit 5 bzw. 10 m Auflösung zur Verfügung. [vgl. dat-18c] Höhenschichtlinien für die Steiermark gibt es mit 10 m Äquidistanzen. [vgl. dat-18d] Auf internationaler Ebene können im „EarthExplorer“ des USGS (United States Geological Survey) verschiedene Höhendatensätze sowie Satellitenbilder bezogen werden. Hier findet man etwa ein DGM aus ASTER-Daten (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) mit einer Auflösung von einer Bogensekunde, was in etwa 30 m entspricht und deckt die Erdoberfläche zwischen 83° nördlicher und südlicher Breite ab. [vgl. lpd-14] Das DGM GTOPO30 (Global 30 Arc-Second Elevation) ist zwar für die gesamte Erdoberfläche verfügbar, weist aber nur eine Auflösung von 30 Bogensekunden auf, was in etwa 1 km entspricht. Bei einem Geländereief im Maßstab von 1:10.000 würde dies 10 cm entsprechen, was für die Erstellung eines Reliefs zu grob ist. [vgl. usg-15a] SRTM-Daten (Shuttle Radar Topography Mission) decken 80% der Erdoberfläche ab und sind zwischen 60° nördlicher und 56° südlicher Breite mit einer Auflösung von einer Bogensekunde verfügbar und somit gut für Reliefbau geeignet. [vgl. usg-15b] Das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) bietet ebenso ein DGM an. Das TenDEM-X (TerraSAR-X-Add-on for Digital Elevation Measurements) DGM hat eine Auflösung von 12 m und ist für alle Landmassen der Erde verfügbar. Der Lage- und Höhenfehler liegt unter 10 m. [vgl. tan-14] Albers [2009: 241] gibt in seinem umfassenden Werk über die Fernerkundung einen Überblick über weitere aktuelle Fernerkundungssatelliten und deren Eigenschaften sowie Auflösung der Sensoren. Des Weiteren findet man einige Bezugsquellen aufgelistet. [vgl. ALB-09: 247]

Nachdem nun die verschiedenen Geodaten bzw. Datengrundlagen, die für die Erstellung von Geländereiefs benötigt werden, bekannt sind, beschäftigt sich das nachfolgende Kapitel mit der Veredelung dieser Rohdaten bzw. mit deren Weiterverarbeitung.

## 5 Herstellungsverfahren im Reliefbau

Seit dem 16. Jahrhundert haben sich die verschiedensten Methoden für die Erstellung von Geländereiefs entwickelt. Jede dieser Methoden wurde im Laufe der Zeit vom jeweiligen Reliefbauer angepasst, nach seinen Bedürfnissen und Kenntnissen abgeändert oder weiterentwickelt, wodurch eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken entstanden sind. Jede dieser Techniken ist in Abhängigkeit der verfügbaren Datengrundlagen sowie Materialien und technischem Knowhow entstanden. Um die Herstellungsverfahren besser unterscheiden zu können, werden diese in analoge und digitale Methoden gegliedert. Die analogen Herstellungsverfahren können weiter in manuelle und maschinelle Techniken unterschieden werden. Geländereiefs die mittels digitaler Methoden erstellt werden, basieren rein auf digitalen Ausgangsdaten und/oder computergestützten Konstruktionsverfahren. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die bekanntesten Techniken seit dem 16. Jahrhundert bis heute. In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Verfahren mittels Literaturanalyse charakterisiert und versucht deren Vor- und Nachteile auszuarbeiten. Es werden nicht nur die Arbeitsschritte beschrieben, sondern auch ausgewählte Relieftarbeiten vorgestellt.

HERSTELLUNGSVERFAHREN		
<b>Analog</b>	Manuell	Modellierung durch Holzschnitzerei
		Freie Modellierung
		Modellierung mit Fixpunkten
		Modellierung mit Höhen(- und Profil)linien
	Maschinell	Pantograf
		Wenschow-Verfahren
		Italienisches Verfahren
		Amerikanisches Verfahren
		Stereobildauswertung
		Photopolymerisation
<b>Digital</b>	Additive Verfahren	Stereolithographie, Selektives Lasersintern, Fused Deposition Modeling, Inkjet-Rapid Prototyping, Pulver-Binder-Verfahren, Laminated Object Modelling
	Subtraktive Verfahren	CNC-Fräse
	Formative Verfahren	Vakuum

Tabelle 4: Herstellungsverfahren nach Methodik (eigene Darstellung)

## 5.1 (Analoge) manuelle Verfahren

Analoge manuelle Herstellungsverfahren kennzeichnen sich dadurch, dass der Bau des Reliefs in reiner Handarbeit ohne maschineller Unterstützung oder dergleichen durchgeführt wird. Als Datengrundlage dienen meist selbst aufgenommene Daten. Topographische Karten standen zu Beginn des Reliefbaues noch kaum bzw. gar nicht zur Verfügung. Daher sind die früheren Ergebnisse nach heutigem Standard nicht so genau, allerdings aus historischer Sicht von Bedeutung. In diese Kategorie fallen etwa die Modellierung durch Holzschnitzerei, die freie Modellierung mit verschiedenen Materialien oder die Modellierung mit Fixpunkten wie z.B. Metallstiften und dergleichen. Eine bis heute noch gebräuchliche Methode im Reliefbau, wenn nicht sogar *die* Methode im Reliefbau, ist die des Höhenlinienplans. Diese Methode hat sich seit dem 19. Jahrhundert mit kleinen Änderungen oder Neuerungen durchgesetzt, anfangs in reiner Handarbeit und später auch in der maschinellen Fertigung von Reliefs.

### 5.1.1 Modellierung durch Holzschnitzerei

Nach ausgiebiger Literaturrecherche lässt sich zu dieser Methode nur sehr wenig berichten. Bekanntestes Beispiel für ein Relief, welches durch Holzschnitzerei entstanden ist, ist das eingangs erwähnte Relief des Wettersteingebirges aus dem 16. Jahrhundert welches vermutlich von Paul Dax gefertigt wurde. [vgl. his-16] Aber auch Charles-François Exchaquet (1746–1792) schnitzte ab dem Jahr 1787 seine Reliefs in Holz. Wie etwa jene vom Mont-Blanc- und Gotthard-Massiv. [vgl. hsl-18] Wie genau die beiden Reliefbauer dabei vorgegangen sind, ist nicht überliefert. Sie haben aber eines gemeinsam und zwar, dass sie die Modelle nach ihren eigens aufgenommenen Daten, Vermessungen und Beobachtungen angefertigt haben. Dax fertigte zuerst extra eine topographische Aufnahme von dem zu modellierenden Gebiet an, Exchaquet hatte von vor seiner Tätigkeit als Genreladirektor der „Société des Mines et Fonderies du Haut Faucigny“ eigens erstellte Bergbaukarten von dieser Region zur Verfügung und stütze sich auf seine Gebietsrekognoszierungen und zahlreichen Kompasspeilungen. [vgl. IMH-81: 121f.] [SCH-65: 328] [GYG-37: 19ff.] [hsl-18] [ter-14a] Für die Modellierung bedarf es entsprechender Schnitzwerkzeuge und -messer. Die Oberflächengestaltung des fertig modellierten Reliefs erfolgt dann individuell. Das Holzfundament wird entweder mit einer gestärkten Leinwand überzogen und landschaftlich bemalt sowie Bäume aus Draht und Zettel mit Flur- und Bergnamen aufgeklebt oder eben direkt bemalt, wie im Falle von Exchaquet [vgl. his-16] [hsl-18]. Die Modellierung durch Holzschnitzerei ist eine recht seltene (historische) Methode aus dem 16. bzw. 18. Jahrhundert und findet in der aktuellen Literatur bzw. im modernen Reliefbau keine Anwendung mehr [IMH-81: 143]. Vergleicht man die Abbildungen 13 & 14 und 36 miteinander, so ist mit freiem Auge leicht erkennbar, dass sich der Detaillierungsgrad in Grenzen hält und keine sonderlich feine Gliederung bei der Ausführung der Gebirgsmassive vorgenommen wurde. Nichtsdestotrotz musste der Reliefbauer ein ganz besonderes

künstlerisches Talent besessen haben um ein so ansehnliches Geländemodell erstellen zu können.



Abbildung 36: Mont-Blanc von Charles-François Exchaquet, Holzschnitzerei, 1788, [tey-18]

### 5.1.2 Freie Modellierung

Auch wenn die Methode der freien Modellierung auf Grund von wissenschaftlichen Standards heute nicht mehr geläufig ist, darf sie der Vollständigkeit halber in dieser Auflistung nicht fehlen. Auf einem Brett wird das Relief mit feuchtem Sand oder feuchter Gartenerde frei modelliert. Als Vorlage bzw. Unterstützung dienen Karten und Fotos bzw. eigene Geländeaufnahmen und -beobachtungen. Bevor mit der Modellierung der groben Hauptformen begonnen wird, sollten die horizontalen und vertikalen Hauptmaße ausgerechnet und markiert werden. Das Ergebnis ist ein Sandhäufchen, welches ungefähr der Form des zu modellierenden Bergmassives entspricht (siehe Abbildung 37/a). Der Reliefbauer braucht also ein ausgesprochen gutes Vorstellungsvermögen. Ist man mit der Form zufrieden, schneidet man die Ränder des Sandmodelles senkrecht weg und formt damit eine wallartige Erhebung in genügend Entfernung zum Modell, so dass ein Graben entsteht. Dieser Graben wird mit Gips aufgefüllt und bildet den Rahmen um das Modell. Im Anschluss steckt man Zündhölzer Kopf voran in das Sandmodell (siehe Abbildung 37/b). Diese sollten etwa zu zwei Drittel aus dem Sand herausragen und dienen dazu, dass der Gips, mit dem das Relief im nächsten Schritt übergossen wird, nicht sofort in die tieferen Lagen abfließt. Als zusätzlicher Ablaufschutz wird das Sandmodell zuerst nur mit Gips bespritzt. Ist dieser bereits etwas angetrocknet, wird das Sandrelief mit einer dicken Schicht Gips übergossen, so dass die Streichhölzer nicht mehr zu sehen sind. Diese sollte aber wieder schichtweise aufgetragen werden, da der Gips sich sonst in den tieferen Lagen sammelt (siehe Abbildung 37/c). Ist die Masse erstarrt, kann die Gipsmaske vom Brett



abgehoben und der Sand darunter entfernt werden. Abschließend können nun die Einzelheiten des Geländes sowie Felsformationen in das Gipsmodell geschabt werden. Die Oberflächengestaltung und Bemalung erfolgt individuell. Der Sandwall, der den Gipsrahmen stützt, kann auch durch einen stabileren Holzrahmen (siehe Abbildung 37/d) ersetzt werden oder durch eine Aufbaukiste. Diese sieht aus wie ein Schuhkarton ohne Deckel und Boden, vorzugsweise aus Holz und steht auf einem Brett. Darin werden die Hauptformen aus feuchtem Sand aufgebaut (siehe Abbildung 37/e). Im Anschluss entfernt man die Kiste, um die Seiten des Sandmodelles senkrecht wegzuschneiden und setzt die Kiste wieder auf das Brett auf. Der so entstandene Graben wird mit Gips gefüllt. Der weitere Ablauf ist ident zum vorherig beschriebenen Modellierungsprozess (siehe Abbildung 37/f). [vgl. ZUR-50: 30ff.] [MÜH-63: 139] Da diese Methode auf keinem geometrischen Grundgerüst aufbaut, sind die Ergebnisse eher künstlerischer Natur mit geringer Genauigkeit.

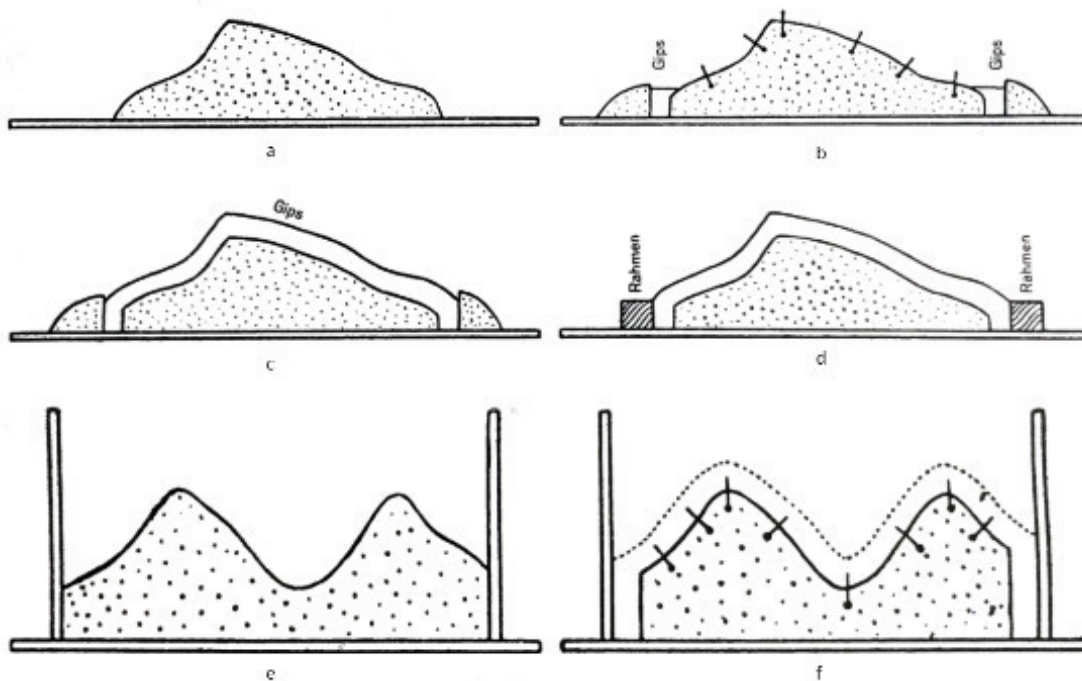


Abbildung 37: Freie Modellierung [ZUR-50: 30ff.]

### 5.1.3 Modellierung mit Fixpunkten

Bei der Modellierung mit Fixpunkten gibt es verschiedene Ansätze. Eines haben aber alle gemeinsam - ausgewählte Höhenpunkte werden mit Hilfe von vertikalen Markierungen auf eine Grundplatte lagerichtig übertragen [vgl. SZA-86: 228]

Bei der Sandkastenmethode (siehe Abbildung 38) dient ein Kartenblatt als Datengrundlage. Nach Zurflüh [50: 34ff.] markiert man darauf ausgewählte Höhenpunkte, wie etwa die von Berggipfeln, Gletschern, Seen, etc. sowie den Grundriss des zu modellierenden Gebietes und überträgt dies auf ein Pauspapier. Mittels Blaupapier können die Markierungen dann auf einer Grundplatte aufgetragen werden. Die Höhen der Punkte werden anschließend mittels

Holzstäben, Metallstiften, Nägeln oder dergleichen maßstabsgetreu auf den Markierungen dargestellt. Zuerst müssen die Höhen aber berechnet werden. Der tiefste Punkt des Modelles wird mit 0 mm angenommen. Bei einem Reliefmodell im Maßstab von 1:10.000 entsprechen 10 m in der Natur 1 mm in der Karte. Geht man bei z.B. 800 Höhenmetern vom Nullpunkt aus, so muss der Stab der 900 m markiert eine Höhe von 10 mm aufweisen. Bei 1000 Höhenmetern sind es 20 mm, bei 2000 m bereits 120 mm. Möchte man das Relief auf einen Sockel aufbauen, so addiert man die gewünschte Sockelhöhe bei allen Stäben. [vgl. ZUR-50: 34ff.]

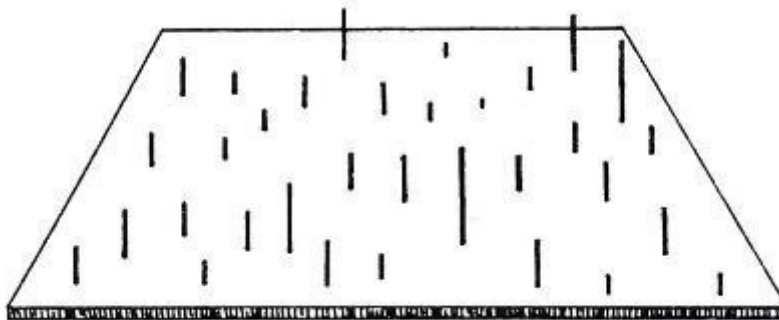


Abbildung 38: Sandkastenmethode [SZA-86: 228]

Die einzelnen (Holz)Stäbe werden nun auf die berechnete Länge zugeschnitten und senkrecht auf den Markierungen der Grundplatte mittels Lehm befestigt (siehe Abbildung 39a). Genauso wie bei der vorangehenden freien Modellierung wird eine Aufbaukiste um das aus Stiften bestehende Grundgerüst gefertigt. Anschließend können die Zwischenräume zwischen den Stäben mit z.B. lehmigen Sand aufgefüllt werden. Die Spitzen der Stäbe müssen überall gleich viel aus dem Sand herausragen, da die oberste Schicht mit Gips übergossen wird (siehe Abbildung 39b). Je weiter die Stäbe herausragen, desto dicker wird die Gipsschicht. Bevor der Gips zum Einsatz kommt, wird die Aufbaukiste abgenommen, die Ränder des Sandmodelles senkrecht weggeschnitten und der Rahmen wieder aufgesetzt. Nun kann das Sandmodell schichtweise mit Gips übergossen und nach dem Aushärten die Morphologie eingeritzt werden (siehe Abbildung 39c). Verwendet man für die ganz oberste Schicht Plastikon, können die Details leichter modelliert werden, da das Material nicht so schnell aushärtet wie Gips. Nachdem man den Sand entfernt hat, können auch die Stäbe oder Stifte herausgenommen und die entstandenen Löcher von der Rückseite aus mit Gips aufgefüllt werden. [vgl. ZUR-50: 34ff.]

Um das Sandkastenverfahren zu optimieren bzw. die Genauigkeit zu erhöhen, können nach Mühle [63: 139] die Höhenpunkte aus der Karte mit Hilfe eines Quadratnetzes auf die Grundplatte übertragen werden. Generell gilt, je mehr Punkte und vor allem markante Geländepunkte ausgewählt wurden, desto naturähnlicher wird das Geländemodell. Statt die Stäbe mit Lehm zu befestigen, können Löcher in die Grundplatte gebohrt werden. Bevor die Stäbe eingefügt werden, ist allerdings die Lochtiefe der Stablänge anzurechnen. An Stelle der Höhenpunkte können auch Höhenlinien auf die Grundfläche aufgetragen werden. Der

Verlauf der Isolinien wird dann mit senkrecht aufgeklebten Kartonstreifen gekennzeichnet. Die Höhe der Kartontreifen muss der relativen Höhe der einzelnen Höhenschichten entsprechen. Auf diese Weise ergibt sich ein Terrassengerüst. Nun können die Zwischenräume mit Sand aufgefüllt werden. Füllt man das Grundgerüst bis zur Höhe der Kartontreifen mit Sand auf, müssen wie bei der Methode der freien Modellierung Streichhölzer verkehrt in den Sand gesteckt werden um das Abrinnen der Gipsschicht zu verhindern. Bei der Modellierung mit Stäben oder Stiften, übernehmen die vom Sand unbedeckten Stabspitzen diese Aufgabe. [vgl. MÜH-63: 139]

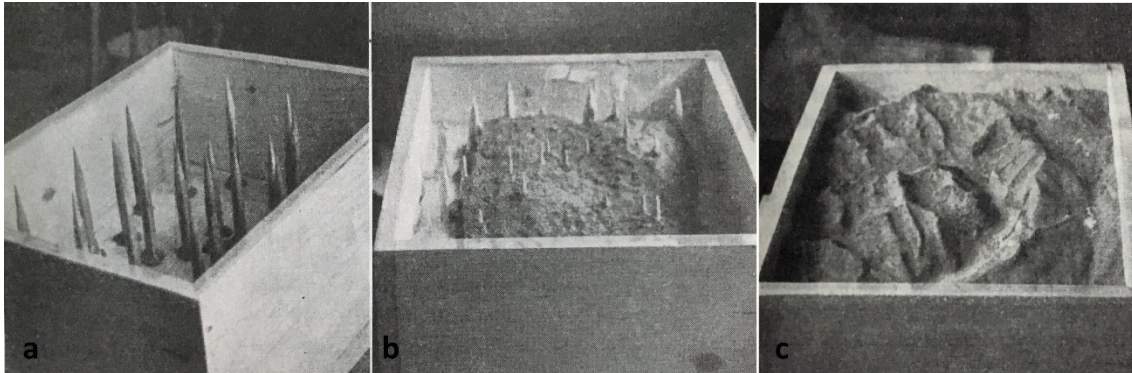


Abbildung 39: Modellierung mit Fixpunkten [ZUR-50: 34f.]

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts kam die Methode der Modellierung mit Fixpunkten erstmals auf. Dabei wurden Nägel oder Holzstäbe in entsprechender Länge in ein Brett geschlagen und die Zwischenräume mit den verschiedensten Materialien aufgefüllt. Als Seeflächen dienten oftmals Glasspiegelstücke. [IMH-81: 143] Zur Modellierung dienten etwa Ton, Harz, Gips oder Wachs sowie Mischungen aus Sand, Sägemehl und Leim. [vgl. IMH-63: 89] [MAI-06: 78] Eines der bekanntesten und ältesten Reliefs, das auf diese Weise entstanden ist, ist das bereits erwähnte und in Kapitel 3.1 diskutierte Relief der Urschweiz von Franz Ludwig von Pfyster. Abbildung 16 zeigt den Aufbau und das Innenleben des Reliefs auf einer Grundplatte mit Holzstäbchen.

Eine andere Methode neben der Sandkastenmethode orientiert sich an den Graten der Gebirge. Dabei werden engmaschige Profile von den Gipfeln ins Tal entlang der Haupt- und Nabengrate konstruiert, z.B. aus Holz oder Karton. Das Gerüst setzt man dann ebenfalls senkrecht auf eine Grundplatte (siehe Abbildung 40). Die Zwischenräume werden mit Modelliermasse aufgefüllt und die Morphologie modelliert. Statt dem Auffüllen der Zwischenräume können die Profile auch mit einer netzartigen Oberfläche bespannt und darauf dann die Morphologie aufgebaut und modelliert werden. Nach Mair [06: 78] ist von dieser Art der Geländemodellierung allerdings nur wenig Genauigkeit zu erwarten. Daher kommt diese frühe Methode zur Fertigung von Reliefs heute nicht mehr zum Einsatz. [vgl. MAI-06: 78]

Im Vergleich zur freien Modellierung basiert die Modellierung mit Fixpunkten, sowohl die Sandkastenmethode als auch jene der Profile, auf einem geometrischen Grundgerüst und

bietet so zumindest, was die Geometrie betrifft, eine höhere Genauigkeit. Diese kann mit Hilfe von Höhenlinien noch weiter verbessert werden.

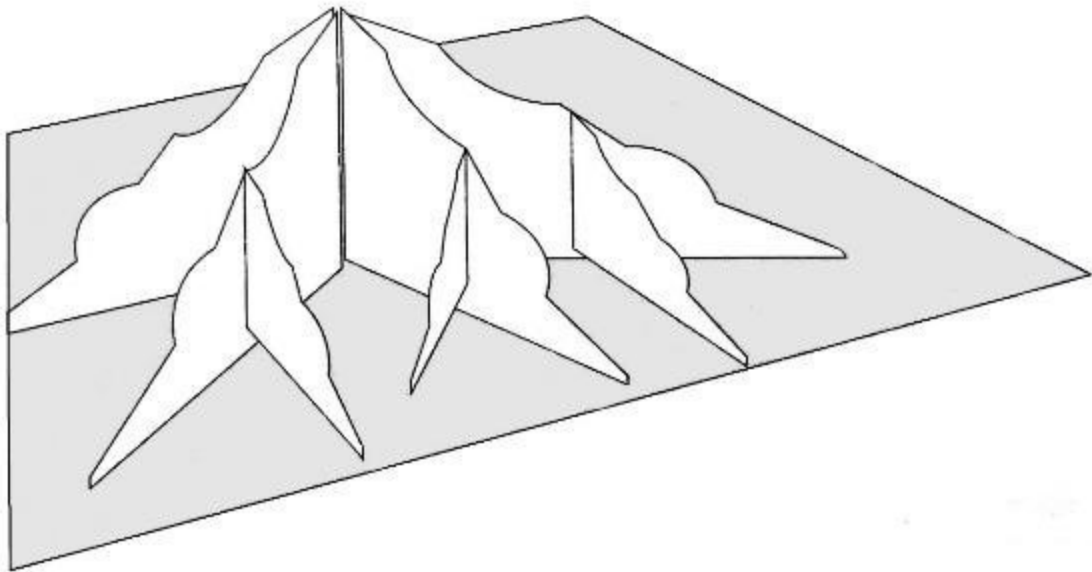


Abbildung 40: engmaschiges Profil entlang von Graten bzw. vom Gipfel bis ins Tal entlang [MAI-06: 78]

#### 5.1.4 Modellierung auf Basis von Höhen- & Profillinien

Bei der Modellierung auf Basis von Höhenlinien bilden die Isolinien einer topographischen Karte das geometrische Grundgerüst des Geländereliefs. Die einzelnen Höhenschichten werden innerhalb der Höhenlinien aus Karton-, Holz oder Glasplatten oder Folien ausgeschnitten und als Treppenstufenmodell aufeinandergeschichtet (siehe Abbildung 41). In der kartographischen Literatur findet man auch immer wieder folgende Bezeichnungen vor: Treppenstufen-, Schichtstufen-, Horizontalplattenrelief oder abgekürzt Stufenrelief. Zur Verfeinerung der Oberflächengestaltung kann beispielsweise ein Abguss aus Gips erstellt werden um anschließend die Morphologie ausmodellieren zu können. [vgl. IMH-63: 89] [IMH-81: 143] [MAI-06: 78] [MÜH-63: 139] [SZA-86: 228] Nach Harvalik [63: 31] gibt es etwa 60 verschiedene Ansätze wie man mittels ausgeschnittener Höhenschichten ein Geländemodell erstellen kann (siehe etwa Bosse 1954, Bibiza 1935, Zurflüh 1950). Auf den folgenden Seiten werden einige exemplarisch ausgewählte Methoden genauer vorgestellt.

Die Erstellung von Geländereliefs auf Basis von Höhenlinien geht ins 19. Jahrhundert zurück. Das erste Reliefmodell weltweit, welches mit Hilfe dieser Methode gebaut wurde, wurde von Napoleon im Jahr 1811 in Auftrag gegeben und stellt La Spezia (Italien) im Maßstab von 1:1.000 dar. [vgl. ter-14b] Mit dem Aufkommen von Höhenlinien in topographischen Karten, häuften sich auch die Reliefs, die auf diese Weise erstellt wurden. In der Schweiz wurden etwa ab dem Jahr 1870 mit dem Siegfriedatlas nach und nach Kartenblätter vom Topographischen Büro herausgegeben, die das Gelände mit Hilfe von Isolinien darstellten. [vgl. MAI-06: 40] In Österreich wurden mit der Franziszeischen Landesaufnahme (2.

Landesaufnahme zwischen 1806 und 1869) erstmals Höhengichtlinienentwürfe aufgenommen. Allerdings dienten diese nur als Hilfslinien für die Schraffierung des Geländes. [vgl. ZUP-70: 115] Erst die Franzisko-Josephinische Landesaufnahme (3. Landesaufnahme zwischen 1869 und 1887) der österreichisch-ungarischen Monarchie brachte als erstes Ergebnis Spezialkarten im Maßstab von 1:75.000 mit Böschungsschraffen und Höhenlinien auf 752 Kartenblättern hervor. [vgl. spe-01: Österreichische Kartographie]

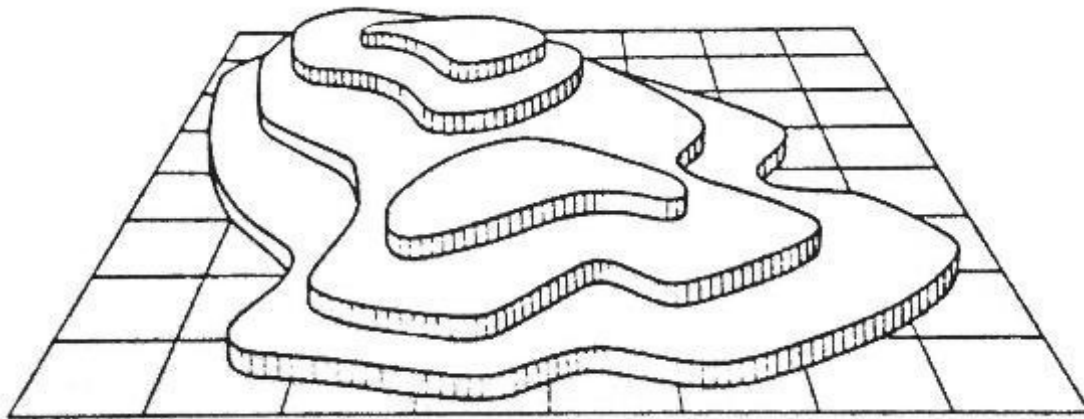


Abbildung 41: Treppenstufenmodell [IMH-63: 88]

Bei der Erstellung von Stufenreliefs lassen sich prinzipiell zwei Arten unterscheiden. Der Aufbau eines positiven Treppenstufenmodells und der eines Negativmodells. Beim Aufbau eines positiven Stufenreliefs werden die Höhengichten lagerichtig aufeinandergesetzt und durch Aufleimen oder Nägel befestigt. Bei Modellen flacher Gebiete werden oft Ausschnitte aus einer Karte auf die entsprechende Modellfläche geklebt [IMH-81: 144]. Nach Imhof [81: 144] eignen sich diese Ergebnisse ausgezeichnet als Vorführmodelle im Anfängerunterricht der Gelände- und Kartenlehre. Möchte man etwas anspruchsvollere Modelle schaffen, werden die Treppenstufen mittels Modelliermasse wie etwa Ton, Wachs, Kitt oder Gips aufgefüllt. Die Wahl der Modelliermasse ist abhängig vom Material des Stufenmodells. Sind die Stufenplatten aus Holz gefertigt, können diese mit Gips aufgefüllt werden. Das Ergebnis sollte dann eine kontinuierlich abgeschrägte Oberfläche aufweisen, auf die wiederum Bäche, Wege, Felsformationen, Gletscherbrüche, etc. eingetragen sowie Gebäudeklötzchen aufgeklebt werden können. Waldflächen stellt man durch oberflächliches Zerhacken einer zusätzlich aufgetragenen Modelliermasse dar oder durch aufkleben von eingefärbtem grobkörnigen Sand. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass man bei zu starkem einritzen oder abkratzen der Gipsschicht bei der Oberflächenmodellierung rasch an die Holzkanten des Stufenmodells stößt. Des Weiteren weisen Gips und Holz verschiedenen Eigenschaften auf und können sich bei wechselnden Feuchtigkeitsverhältnissen oder Erschütterungen voneinander lösen. Um dies zu umgehen, haben die begabtesten Reliefbauer wie etwa Imfeld, Simon, Meili, Reichlin und andere einen Gipsabguss vom Rohmodell angefertigt und erst in diesen hohlen etwa 5 cm dicken Gipskörper die feinsten Ausmodellierungen eingetragen. [vgl. IMH-81: 144] Auch für Mair [06: 82] ist es „eine



dilettantische Methode, ein Treppenstufenmodell einfach mit Spachtelmasse zu überziehen oder gar die Höhenkurven zu zeigen.“ Dies ist für ihn „im seriösen Reliefbau nicht tragbar [MAI-06: 82].“ Aber wie kommt man nun zu diesem Gipsabguss?

In der Literatur lassen sich mehrere Möglichkeiten finden. Sollen die Arbeitsschritte in reiner Handarbeit ohne maschineller Unterstützung erfolgen, so bieten sich beispielsweise die Methoden von Imfeld, Imhof [81: 144ff.] und Mair [06: 77ff.] an. Imfeld ergänzte seine Holzstufenmodelle durch aufgesetzte Metallstifte und modellierte darauf die feinen Oberflächenformen aus Plastilin oder ähnlicher knetbarer Masse. Anschließend erstellte er davon einen negativen Gipsabguss, der mit Schellack überzogen wurde und als Abgussform für das positive Gipsmodell diente. Dieses wurde feiner ausziseliert und bei Bedarf erneut lackiert um weitere Exemplare abgießen zu können. [vgl. IMH-39: 292] Imhof und Mair arbeiten bei ihren Methoden mit einem negativen Stufenmodell. Abbildung 42 zeigt die nötigen Zwischenschritte vom negativen Treppenstufenmodell über das Rohmodell bis hin zum fertigen Gipsmodell. Zu Beginn muss die richtige Plattenstärke berechnet und ausgewählt werden. Die Höhe einer Treppenstufe soll maßstäblich verkleinert der Äquidistanz zwischen zwei Höhenschichten entsprechen. Bei einem Modell im Maßstab von 1:10.000 und einem Abstand von 20 m der Höhenschichtlinien in der Karte beträgt die Plattenstärke 2 mm. Um Material zu sparen und das Gewicht des Stufenmodells so gering wie möglich zu halten, können aus einer Platte mehrere Höhenschichten ausgeschnitten werden. Imhof gibt an, aus einer Platte die Schichten 1, 6, 11, 16, 21, usw., aus der zweiten Platte die Schichten 2, 7, 12, 17, 22 usw. ausgeschnitten zu haben [vgl. IMH-81: 146]. Somit bräuchte er lediglich fünf Sperrholzplatten für sein Relief des Bietschhorns im Maßstab 1:2.000. Entsprechend den Höhenlinien wird das Stufenmodell in negativer Form aufgebaut, wodurch sich ein Hohlraum ergibt, der durch die oben aufliegenden Treppen überwölbt und durch einen Rahmen an den Seiten bzw. Holzsäulen und -klötze an der Unterseite gestützt wird. Um die ausgeschnittenen Höhenschichten korrekt aufeinander platzieren zu können, bietet es sich an, zu Beginn der Aufbauarbeiten ein Gitternetz mit einer Maschenweite von fünf oder zehn Zentimetern auf dem Höhenkurvenplan einzuzichnen. Ist das Grundgerüst aus Holz fertig, werden die Treppenstufen an der Außenseite des Negativmodells mit einem Brei aus gelöschten Gips aufgefüllt und abgeschrägt (siehe Abbildung 42a). Das Ergebnis ist eine negative Grundform mit deren Hilfe ein positiver Gipsabguss erstellt werden kann. Bevor eine erneute Schicht Gips in die Form gegossen werden kann, muss allerdings eine Trennschicht eingefügt werden, da sich Gips von Gips nicht trennen lassen würde. Die Grundform wird also mit Schellack überzogen und zusätzlich mit aufgelöster Schmierseife bepinselt. Nun kann eine 3 - 5 cm dicke Gipsschicht in die Grundform eingefüllt werden (siehe Abbildung 42b). Nachdem der Gips aufgetrocknet ist, kann das positive Rohmodell aus dem Grundgerüst herausgebrochen werden. Dabei geht das hölzerne Stufenrelief unweigerlich kaputt und es kann kein weiterer Abguss mit Hilfe des Grundgerüsts erstellt werden. Abbildung 42c zeigt das positive Rohmodell, welches im nächsten Schritt aufwendig ausmodelliert wird. [vgl. IMH-81: 146ff.]

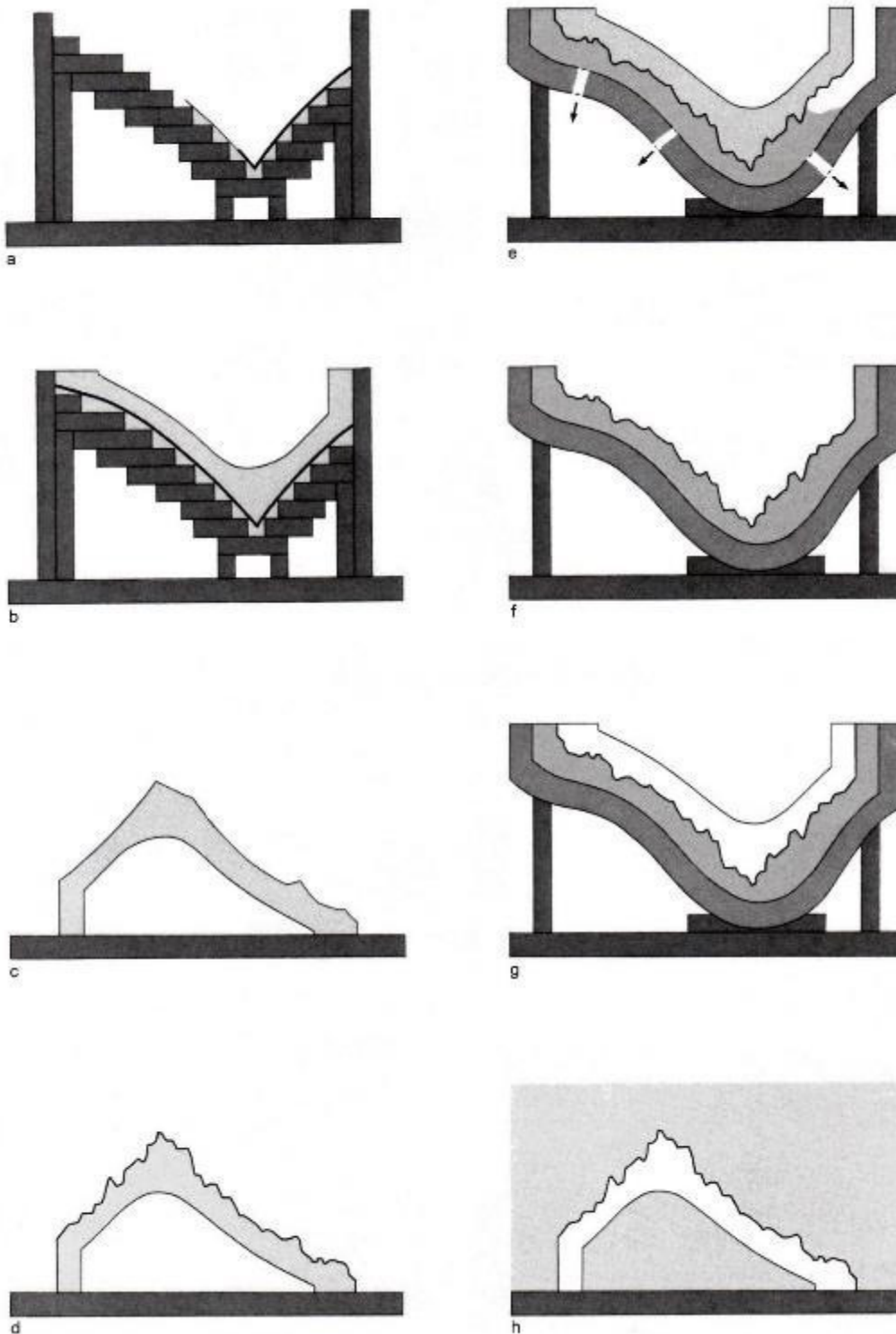


Abbildung 42: Ablauf der Erstellung eines Treppenstufenmodells nach Imhof [IMH-81: 148]

Die Oberfläche des Gipskörpers enthält nun feine teils scharfkantige Details (siehe Abbildung 42d). Dieses Urmodell wird durch eine dünne Schicht Schellack gehärtet. Vom Urmodell können dann mehrere Ausstellungsmodelle abgossen werden. Hierfür baut man aus Gips eine Deckhaube, die einen Hohlraum von etwa 2 - 4 cm um das Urmodell

zulässt. An tiefer gelegenen Stellen werden röhrenartige Luftlöcher eingebaut. Diese ermöglichen das Entweichen der von der Abgussmasse verdrängten Luft (siehe Abbildung 42e). Als Abgussmasse können Fischleim oder Gelatine dienen. Nachdem die Masse erstarrt ist, wird das Urmodell herausgehoben und Platz für einen neuen Abguss gemacht (siehe Abbildung 42f). Nun kann endlich das Ausstellungsmodell mit Hilfe der Gelatineform abgegossen werden. Hierfür wird wieder ein Brei aus gelöschtem Gips in die Form gefüllt, der nach Erstarren problemlos herausgehoben werden kann (siehe Abbildung 42g). Der Erstarrungsprozess dauert nur wenige Minuten. Währenddessen erhitzt sich die Gipsmasse und muss rasch aus der Abgussform gehoben werden, da diese sonst zu schmelzen beginnt und für weitere Abgüsse unbrauchbar wäre. Imhof berichtet in seinem Werk „Bildhauer der Berge“, dass er aus einer Gelatineform bis zu vier Gipsabgüsse erstellen konnte [IMH-81: 147]. Abbildung 42h zeigt das positive Ausstellungsmodell, welches nun bereit ist koloriert zu werden.

Auf diese Weise entstand Imhofs Relief der Großen Windgälle (3187 m Seehöhe) im Maßstab 1:2.000. Imhof fertigte das Relief innerhalb von eineinhalb Jahren an und stellte es 1938 fertig. Es hat die Maße von 163 x 307 cm. Als Datengrundlage dienten ihm photogrammetrisch ausgewertete Höhenschichtlinienpläne im Maßstab 1:25.000, sowie terrestrische photogrammetrische Aufnahmen, Luftbilder, geologische Karten und Profile sowie eigens aufgenommene Skizzen, Zeichnungen und Photographien (siehe Abbildung 20). [vgl. IMH-39: 291f.]

Mair geht bei dem Bau seiner Reliefs ähnlich wie Imhof vor und geht von einem Treppenstufenmodell aus Holz aus. Als Datengrundlage dient eine topographische Karte des zu modellierenden Gebietes, welche auf den Grundriss des Modells zugeschnitten ist (siehe Abbildung 43a). Statt die Höhenkurven auf die Holzplatten mit Pauspapier zu übertragen, kopiert er die Karten bzw. Höhenkurvenpläne und klebt die Kopien falten- und blasenfrei mittels Sprühkleber auf die einzelnen Platten. Baut man ein Relief, das einen Höhenunterschied von z.B. 2000 m aufweist, ergeben sich bei einer Äquidistanz von 20 m 100 Höhenschichten aus Holzplatten und somit auch 100 Schichten an Kartenkopien. Diese zusätzliche Höhe muss bei der Wahl der Plattenstärke berücksichtigt bzw. abgezogen werden. Im nächsten Schritt werden die Höhenkurven auf den schwarz-weiß Kopien markiert. Am besten fährt man diese mit einem roten dünnen Filzstift entlang der Linien nach. Genauso wie oben beschrieben, können auch bei dieser Methode mehrere Schichten auf einer Platte markiert und ausgesägt werden um Material zu sparen. Die ausgesägten Schichten werden mit einer Schleifmaschine oder -papier von den Sägefransen bereinigt und zu einem Stufenmodell gestapelt. Um mögliche Fehler beheben zu können, wird der Aufbau des Modells erst im letzten Schritt fixiert. Bei dünnen Sperrholzplatten geschieht dies wieder mit einem Sprühkleber, dickere Platten vertragen auch Leim. Ab einer Plattenstärke von 2 mm sollten zusätzlich Klammern oder Nägel verwendet werden. Abbildung 43b zeigt das fertige Treppenstufenrelief mit aufgeklebten Kartenkopien. Bei der Umformung des Stufenreliefs in das Gipsmodell unterscheidet Mair zwischen zwei

Methoden. Bei beiden Methoden baut man eine Negativform des Stufenmodells auf. Bei der ersten Methode kommt allerdings die positive Seite zum Einsatz. Nach Mair [06: 94] ist diese Methode etwas umständlicher, aber für Anfänger von Vorteil. Die zweite Methode ist technisch komplizierter, erspart aber einen aufwendigen Arbeitsschritt, da hier von der negativen Seite des Stufenreliefs ausgegangen wird. [vgl. MAI-06: 90ff.]

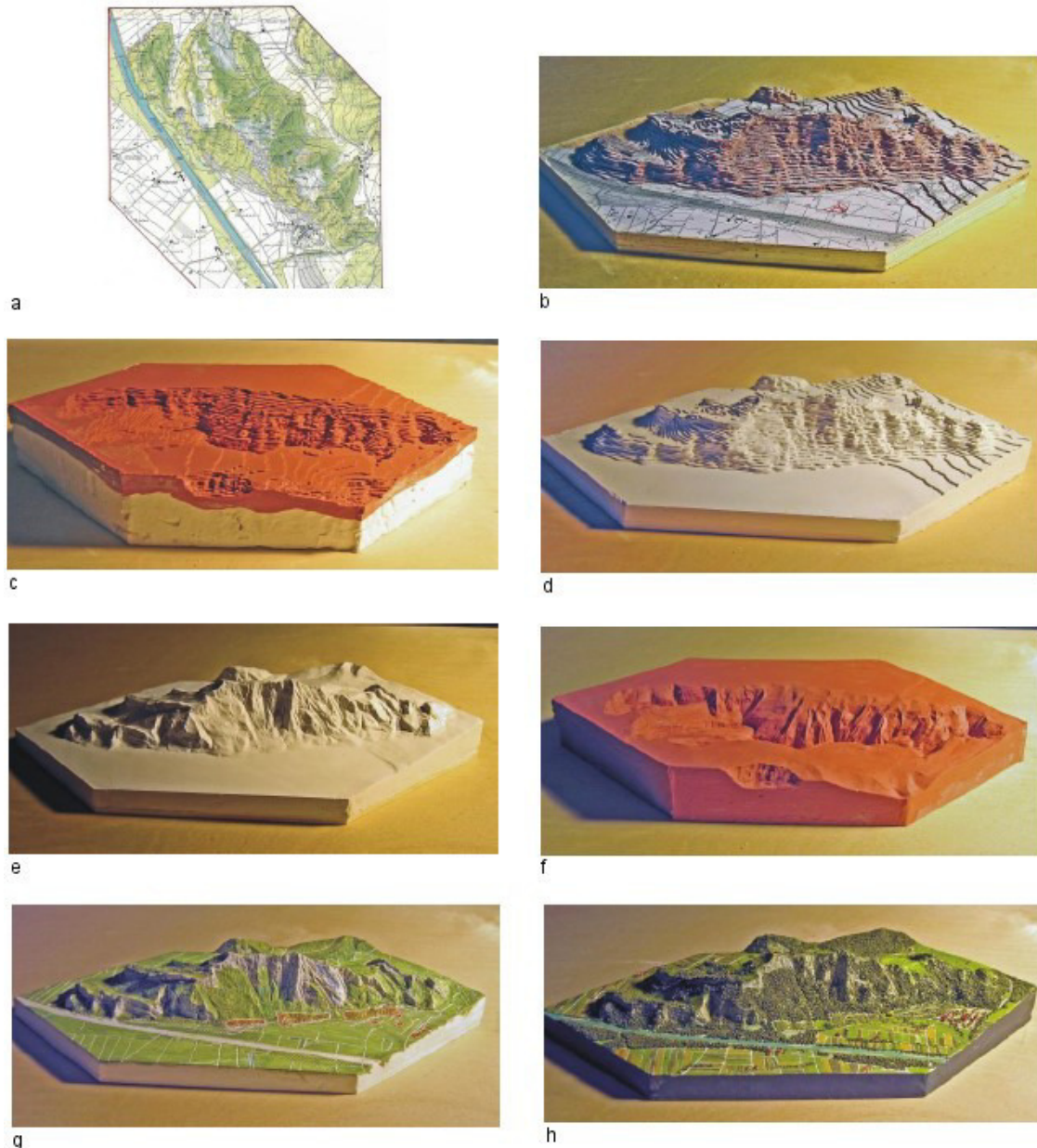


Abbildung 43: Ablauf der Erstellung eines Treppenstufenmodells nach Mair [MAI-09: 10]

Bei Methode 1 wird das Negativmodell mit der positiven Seite nach oben horizontal in einen Rahmen eingepasst, der 2 - 3 cm höher als das Modell sein sollte. Die Fugen zwischen Modell und Rahmen müssen mit Spachtelmasse abgedichtet werden, da sonst der Kautschuk der für den Abguss benutzt wird, durchrinnt. Als nächstes wird das Stufenrelief mit einem Trennmittel benetzt und mit einer einige Millimeter dicken Silikonkautschuk übergossen.

Dies kann auf zwei Arten geschehen. Bei der ersten Variante wird das Modell mit Kautschuk übergossen. Bis zum Einsetzen der Vulkanisierung muss das Material wiederholt mit einem Pinsel auf die Bergkuppen aufgetragen werden. Dies dauert etwa 1,5 Stunden. Nach weiteren elf Stunden ist die Kautschukschicht vollkommen aufgetrocknet und bereit mit armierten Gips übergossen zu werden. Dieser soll den weichen Kautschuk stützen und in Form halten. Die Gipsschicht muss bis zum Rand des Rahmens hochgezogen werden, da sie die horizontale Ausrichtung sichert. Das Ergebnis ist eine negative Abgussform aus Kautschuk die dem Stufenmodell entspricht (siehe Abbildung 43c). Bei der zweiten Variante überzieht man das Treppenstufenmodell mit einem 5 - 10 mm dicken Schaumgummi. Eine dünne Plastikfolie dient als Trennschicht zwischen Schaumgummi und Gipshaube. Die Stützhaube muss an der höchsten Stelle mindestens ein Loch zum Einfüllen des Kautschuks aufweisen und eines damit die Luft entweichen kann. Nachdem die Gipshaube aufgetrocknet ist, wird sie aus dem Rahmen gehoben, der Schaumgummi samt Plastikfolie entfernt und im gleichen Abstand zum Stufenmodell wie vorhin wieder in den Rahmen eingesetzt und befestigt. Im Anschluss kann der Kautschuk durch das Loch in den Hohlraum gegossen werden. Ist der Silikonkautschuk vollständig vulkanisiert, dreht man den ganzen Klotz um und bricht das Treppenstufenmodell heraus. Das Ergebnis ist das Gleiche wie bei Variante 1 (siehe Abbildung 43c). Nun kann mithilfe der Kautschukform ein Gipsabguss erstellt werden, welcher ident mit dem ursprünglichen Treppenstufenmodell aus Holz ist (siehe Abbildung 43d). [vgl. MAI-06: 94f.]

Bei Methode 2 geht Mair, ebenfalls wie Imhof vor, und stützt das negative Modell an der positiven Außenseite durch Holzsäulen. Diese ermöglichen die exakte horizontale Ausrichtung und Einpassung in den Rahmen. Im Gegensatz zu Imhof glättet er die Oberfläche des Stufenreliefs nicht, sondern besprüht die negative Seite des Stufenreliefs direkt mit einem Trennmittel um es anschließend mit Gips zu übergießen. Beim Ausschalen des Gipsmodells geht das Stufenmodell aus Holz kaputt. Man hat also nur einen Versuch. Das positive an dieser Methode ist, dass man sich die Erstellung einer Abgussform aus Kautschuk im Gegensatz zur vorherig vorgestellten Methode erspart. Auch hier ist das Ergebnis ein Treppenstufenmodell aus Gips (siehe Abbildung 43d). [vgl. MAI-06: 95f.]

Nun kann mit der Modellierung der Morphologie begonnen werden. Hierzu benötigt man Luftbilder, Karten, Fotos, Literatur zur betreffenden Landschaft sowie eine ausgesprochen gute Vorstellungskraft, morphologisches und geologisches Verständnis, eine hohe Fähigkeit zur Beobachtung und Darstellung der Landschaft, Materialkenntnisse, handwerkliche Fähigkeiten sowie ausgeprägte Modellierkünste. Sollte man sich einmal verschnitzen, kann mit Spachtelmasse nachmodelliert werden. Als Werkzeuge dienen Messer, Stichel, Schaber und ähnliche Geräte. Ist das Gipsmodell fertig reliefiert (siehe Abbildung 43e) kann mit Kautschuk eine Kopie für spätere Abgüsse erstellt werden (siehe Abbildung 43f). [vgl. MAI-06: 101ff.]

Im nächsten Schritt wird das Gipsmodell grundiert und Straßenverläufe, Gewässer, Parzellierungen eingeritzt, Gebäude markiert sowie Gletscherflächen mit zusätzlicher



Spachtelmasse aufgetragen und die Spaltensysteme eingetragen (siehe Abbildung 43g). Als Grundierung dient am besten ein helles Grün, wobei Felslandschaften und Gletscher ausgespart werden können. Abschließend wird das Relief naturgetreu bemalt und der Wald je nach Maßstab mit eingefärbten verschiedenen großen Sandkörnern dargestellt. Da die Bemalung des Geländemodells alle vorangegangenen Bemühungen und feinst säuberlichen Ausführungen des Reliefbauers zunichtemachen kann, ist auf diesen Arbeitsschritt besonders viel Wert zu legen. [vgl. MAI-06: 103ff.] Auch Simon Simon wusste um diesen heiklen Arbeitsschritt Bescheid. Man sagt ihm nach, er habe bei seinem Relief des Berner Oberlandes „nach der Jahrzehnte dauernden Modellierarbeit die geradezu wahnsinnige Arbeitsleistung des Bemalens gefürchtet [MAI-06: 111].“ Abbildung 43h zeigt ein fertiges Geländereief. Eine exakte Arbeitsanleitung sowie Auflistung aller benötigten Unterlagen und Arbeitsmaterialien der eben vorgestellten Methode ist in Mair [2006] zu finden.

Die Methoden von Imhof und Mair beinhalten im Prinzip dieselben Arbeitsschritte – Erstellung eines Treppenstufenmodells, Erstellung einer Negativform, Abguss eines positiven Gipsmodells, Modellierung der Morphologie, Erstellung weiterer Abgüsse, Bemalung. Lediglich die Abläufe bzw. Reihenfolge unterscheiden sich gering voneinander. Imhof schrägt das Stufenmodell vor dem Umgießen mit Gips ab und erstellt davon ein erstes Rohmodell. Er schnitzt die Morphologie also in ein abgeschrägtes Gipsmodell. Mair hingegen erstellt direkt von seinem Treppenstufenmodell einen Abguss und modelliert auf diesem die Geländeformen. Auch bei der Wahl des Materials für den Abguss sind sich die beiden nicht einig. Imhof wählt als Abgussmaterial Gelatine. Mair verwendet hingegen Silikonkautschuk, da Gelatine leichter zu schimmeln beginnt als dieser. [vgl. MAI-06: 95]

Die eben vorgestellte Methode von Mair ist State of the Art im heutigen manuellen Reliefbau und wird auch von Wolfgang Pusch angewandt. Mit der Ausnahme, dass er sich bei Bedarf auch einmal digitaler Methoden bedient. So kommen etwa digitale Datengrundlagen zum Einsatz, wenn er beispielsweise einen Höhenlinienplan aus einem DGM generiert. Die Morphologie wird aber wie bereits von Imfeld, Imhof oder Mair in aufwendiger Handarbeit selbst modelliert, eingeritzt, geschnitzt.

Zurflüh stellt in seinem Lehrbüchlein [1950: 37ff.], wie er es selbst beschreibt, eine Vielzahl anderer Methoden vor, wie man mit Hilfe von Höhenlinien ein Geländereief erstellen kann. Der Ablauf bzw. die Beschreibung dieser Methoden ähnelt sehr stark einer Anleitung im Werkunterricht: *„Baue nun außerhalb der eingeritzten Kurve auf die Gipsplatte ein Mäuerchen aus Lehm. Wenn die Kurven eine Höhe von z.B. 2 cm erhalten sollen, so muß dieses Mäuerchen etwa 2,5 cm hoch sein. Stecke die beiden Führungsnägel wieder in die Löcher der Gipsplatte, jedoch so, daß sie wenigstens 3 cm heraussehen. Nun gieße innerhalb des Lehmmäuerchens wieder eine Gipsplatte. Sie wird etwas dicker als 2 cm. Bevor der Gips erhärtet, mußst du diese zweite Platte auf die genaue Dicke von 2 cm zurückhobeln [ZUR-50: 37f.]“* Bei einer anderen Methode wird der Bau ein hohles Gipsrelief dessen Innenraum zu Beginn mit Sand gefüllt ist, beschrieben. [vgl. ZUR-50: 37f.]

Eine weitere Möglichkeit Geländereiefs manuell mittels Höhenlinienplan zu erstellen, ist mit Hilfe von Glasplatten. Dabei werden für ein Relief mit beispielsweise 212 m Höhenunterschied und Darstellung der 20 m Höhengschichten eine Glasplatte als Grundplatte benötigt, zehn Glasplatten für den weiteren Aufbau sowie drei Landkarten. Die erste Karte wird auf die Grundplatte geklebt und dient zum Ausrichten der weiteren Schichten. Auf der zweiten Platte werden die aus der zweiten Karte ausgeschnittenen Höhenlinien im Bereich 20 - 50 m verklebt. Auf der dritten Platte werden die aus der dritten Karte ausgeschnittenen Höhenlinien im Bereich 40 - 70 m verklebt. Diese Arbeitsschritte wiederholen sich immer wieder: vierte Platte, 60 - 90 m Höhenlinien der ersten Karte, usw. Jeweils die letzte Höhengschicht auf einer Platte wird von der darüberliegenden Platte mit aufgeklebter Höhengschicht verdeckt. Das Ergebnis ist allerdings keinesfalls mit den topographischen Modellen von Imhof oder Mair zu vergleichen, da es nur ein Reliefprovisorium darstellt (siehe Abbildung 44). [vgl. MÜH-63: 139] Diese Methode soll der Vollständigkeit halber aber erwähnt werden.

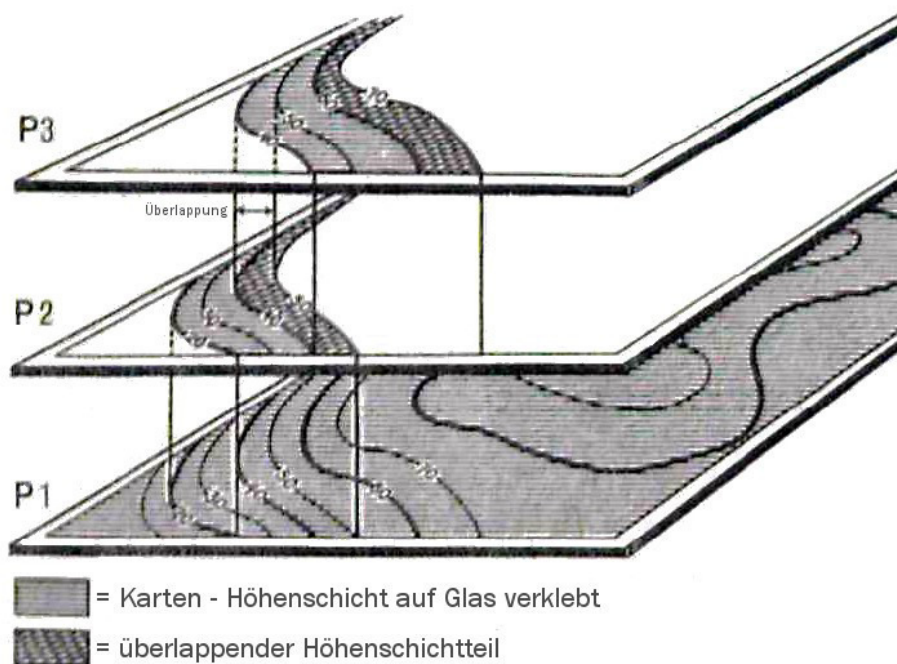


Abbildung 44: Glasplattenrelief [MÜH-63: 145]

Ähnlich wie bei der Relieferstellung mittels Höhengschichtlinien läuft die Erstellung mit Profillinien ab. Allerdings müssen zuerst die Profillinien mit Hilfe einer Höhenlinienkarte generiert werden. [vgl. WIT-79: 493] Dies kann auf mechanischem Wege erfolgen oder durch manuelle Konstruktion. Werden die Profillinien händisch erstellt, ist die Relieferstellung jedoch unvergleichlich zeitaufwendiger als bei einem Horizontalplattenrelief. [vgl. ARN-66: 404] Genauso wie bei den vorherig beschriebenen Methoden werden auch bei dieser, Platten aus Karton oder Holz entlang der Profillinien ausgeschnitten und statt horizontal aufeinandergeschichtet, vertikal aneinandergefügt (siehe Abbildung 3). Das so erstellte, meist äquidistante Profilplattenrelief kann dann auf

gleiche Weise wie ein Stufenrelief weiter bearbeitet werden. [vgl. IMH-72: 299; WIT-79: 493]

Höhen- (und Profil)linien finden aber auch bei maschinellen Verfahren Verwendung. Da der Mensch danach strebt Abläufe zu automatisieren, verbessern bzw. zu vereinfachen, kamen mit der Zeit maschinelle Verfahren zum Einsatz um den Herstellungsprozess von Geländereliefs zu beschleunigen.

## **5.2 (Analoge) maschinelle Verfahren**

Diese Verfahren kennzeichnen sich dadurch, dass Arbeitsschritte die ursprünglich per Hand ausgeführt wurden, wie etwa das Aussägen der Höhenlinienpläne, durch maschinelle Methoden ersetzt werden. Einer der ersten Reliefbauer, der sich an die maschinelle Herstellung von Reliefs heranwagte, war nicht wie so oft behauptet Perron (1837-1919), sondern Friedrich Kienzle. Er begann im Jahr 1890 die gesamte Steiermark im Maßstab 1:37.500 zu modellieren und fuhr dafür die „Isohypsen der Originalaufnahme 1:25.000 mittels eines Pantographen ab, dessen rotierender Zeichenstift in Gyps ein entsprechendes, dem Gelände umschriebenes Treppenmodell ausdrechselte. Aus diesem Modell schnitt Kienzle sodann das Relief heraus, ...“ [PEN-04: 37] Er nutze also einen Pantographen für die Herstellung seines Reliefs. Eine weitere daraus resultierende Methode ist auch das Wenschow-Verfahren, bei dem eine Reliefschneidemaschine zum Einsatz kommt, sowie das italienische und das amerikanische Verfahren, das Vakuum-Verfahren und die Herstellung mittels Polymerisation. Das Wenschow-Verfahren und dessen Nachfolger verfolgten ursprünglich das Ziel, die serielle Produktion von Geländemodellen bzw. insbesondere die Produktion von Kartenreliefs zu beschleunigen. Kartenreliefs sind zwar unter Berücksichtigung der oben genannten Definitionen (siehe Kapitel 2.3) inhaltlich nicht das Thema der vorliegenden Arbeit, deren Herstellungsverfahren eignet sich aber bis zu einer gewissen Produktionsstufe sehr wohl auch für die Erstellung von klassischen Geländereliefs bzw. deren Vorstufe in Form von Treppenstufenreliefs. Daher werden auf den nachfolgenden Seiten die einzelnen Verfahren erläutert und auf deren Vor- und Nachteile eingegangen.

### **5.2.1 Pantograf**

Bei der Reliefherstellung mittels Pantographen (auch Storchschnabel genannt) mit angeschlossener Fräse, wird aus einem Gipsblock ein Treppenstufenrelief heraus gefräst. Der Fahr- bzw. Leitstift des Geräts wird entlang den Höhenschichtlinien einer Karte geführt. Es wird mit der höchsten Schicht begonnen. Währenddessen führt ein Gravurstift die gleiche Bewegung aus und schneidet aus dem Gipsblock die entsprechende Höhenschicht heraus. Überschüssiges Material wird auf diese Weise weggefräst. Die Bewegung des Gravurstiftes erfolgt in der gleichen Größenordnung wie jene des Leitstiftes. Je nach Wunsch kann aber auch eine Vergrößerung oder Verkleinerung dieser Bewegung am Gerät eingestellt werden.

Der Gravurstift bleibt in seiner vertikalen Lage fixiert und bewegt sich nur in der horizontalen Ebene. Stattdessen wird der Gipsblock von Höhengschicht zu Höhengschicht angehoben. Bei diesem Verfahren wird also von der höchsten Stufe hinab zur niedrigsten gearbeitet. Mit Hilfe dieser Reliefierungsmaschine wird die Herstellung von Stufenreliefs beschleunigt und aufwendiges Umgießen der Rohmodelle vermieden. Der Reliefbauer kann also direkt in sein Gipsstufenmodell die Morphologie einritzen. Perron ersetzte bei seinem Gerät den Gravurstift durch einen motorbetriebenen Bohrer (Zahnarztbohrer). [vgl. IMH-81: 133, 144f.] Doch auch dieses Verfahren versuchte man weiter zu entwickeln und zu verbessern.

### **5.2.2 Wenschow-Verfahren**

Die Nachteile der oben erläuterten manuellen Verfahren sind aus Sicht von Bosse [1954] und Haack [1921] vor allem jene, dass die manuelle Relieferstellung eine äußerst mühevollere Arbeit ist, die sehr viel Zeit in Anspruch nimmt und dass die Bemalung händisch erfolgen und auf jedem weiteren Abguss erneut durchgeführt werden muss. [vgl. BOS-54: 139] [HAA-21: 11] Diese Mängel versuchte Karl Wenschow (1884-1949) mit seinem Schneide- und Prägeverfahren in München zu beheben und entwickelte den mechanisierten Reliefbau weiter. Bei seinem Schneideverfahren werden ähnlich wie zuvor mittels Pantographen die Höhengschichten durch eine Fräsmaschine aus einem gegossenen Gipsblock herausgeschnitten. Seine leistungsfähige Reliefschneidemaschine entwickelte er in den 1920er Jahren. [vgl. HAR-75: 32] [IMH-65: 230] Außerdem baute er die maschinelle Herstellung von Kartenreliefs aus. Des Weiteren reproduzierte er schattenplastische Abbildungen eines Kartenreliefs, welche er in Karten eindruckte und somit die Reliefkarte einführte. [vgl. IMH-39: 290]

Bei der Reliefherstellung mittels Wenschow-Verfahren dient eine topographische Karte mit Höhengschichtlinien als Vorlage. Auch hier müssen als Vorarbeit die Isolinien in der Karte farblich herausgearbeitet werden. Die aufbereitete Karte wird auf der gegenüberliegenden Seite der Fräsmaschine aufgebretet (siehe Abbildung 45). Mit einem Führungsstift werden die einzelnen Höhenkurven nachgefahren. Eine Lupe hilft dabei in Gebieten mit dichtgescharten Höhenlinien den Überblick zu behalten (siehe Abbildung 46). Unter der Fräsmaschine bzw. -nadel liegt der Gipsblock. Analog zur Bewegung mit dem Führungsstift, bewegt sich die Fräse mit etwa 5000 Umdrehungen in der Minute und entfernt den überschüssigen Gips in der jeweiligen Höhengschicht. Die Fräse lässt sich auf eine beliebige Höhe einstellen, wodurch die Äquidistanz der einzelnen Schichten sowie eine mögliche Überhöhung eingestellt werden kann. Auch die Erdkrümmung kann mittels Kugelkalotte berücksichtigt werden. [vgl. BOS-54: 139f.]

Der Fräsvorgang beginnt mit der höchsten Schicht. Es wird also vom Berg in das Tal hinunter gearbeitet. Zuerst werden die Hauptschichtlinien, also jene mit großen Äquidistanzen, und in einem zweiten Schritt die Zwischen- bzw. Hilfhöhenlinien, ausgefräst. Die entsprechende Höhenlinie in der Karte wird am Relief auf die jeweils untere Stufenkante übertragen. Der

Unterschied zum vorhin beschriebenen Pantographen liegt darin, dass beim Wenschow-Verfahren der Gipsblock in der horizontalen Ebene fixiert ist und nur die Höhe des Führungsstiftes und des Fräskopfes angepasst werden. Das Ergebnis ist ein Treppenstufenmodell aus Gips (siehe Abbildung 47). [vgl. IMH-65: 230] [KNE-52: 11]

Das fertige Stufenrelief stellt nun das Originalmodell dar und wird mit Hilfe eines Negativabgusses als positives Stufenrelief abgegossen. Um die Negativform abtrennen zu können, wird das Original mit Wasser getränkt und leicht gewachst. Die negative Gipsform wird dann mit Schellack eingestrichen und ein positives Stufenrelief, wieder aus Gips, abgegossen. Bevor man den Gipsabguss des Stufenreliefs abschrägt, wird es ockerfarben lackiert. Beim Abschaben der Stufenkanten wird so viel Material abgetragen bis die unteren Stufenkanten nur noch als hauchdünne bräunliche Höhenlinien zu erkennen sind. Im Anschluss daran kann mit der Modellierung der Morphologie begonnen werden. Hierfür braucht es wieder einen begabten Reliefbauer mit ausgezeichneter räumlicher Vorstellungskraft. [vgl. BOS-54: 140] [IMH-65: 231]

Das so gefertigte Geländerelief kann nun auf zwei verschiedene Arten weiterverwendet werden. Entweder für die serienmäßige Herstellung von Kartenreliefs oder für die Generierung schattenplastischer Aufnahmen für ebene Reliefkarten. Bei der Fertigung von Kartenreliefs wird zuerst von dem ausziselierten Gipsmodell ein Abguss mit einer Eisenzementmasse genommen. Diese Negativform ist äußerst widerstandsfähig und dient für die maschinelle Prägung in Serie. Mit Hilfe einer besonderen Prägemaschine erfolgt nun die positive Abformung des Kartenreliefs. Als Prägematerial dient eine Kunstholzmasse, die sehr haltbar, bruchfest und leicht ist. Mit dem Prägeverfahren wird gleichzeitig eine topographische Karte auf das Kunstholzrelief mit aufgepresst und verklebt. Man erspart sich also die zeitaufwendige Bemalung bei allen weiteren Abgüssen. Die Genauigkeit für Lage und Höhe liegt bei etwa  $\pm 0,1$  mm. [vgl. BOS-54: 140f.] [IMH-65: 231] [KNE-52: 12]

Jedes Relief weist nun die genauen Formen des Originalreliefs auf sowie alle Bezeichnungen, Beschriftungen und farbigen Angaben der Kartenvorlage. Das Ergebnis ist somit eine Abbildung einer dreidimensionalen Karte, aber kein naturgetreues Abbild des Geländes. Außerdem ist es schwierig das Kartenpapier im Hochgebirge so stark zu dehnen um steile Felswände damit bekleben zu können. Die Herstellung von seriell produzierten Kartenreliefs beschränkt sich also auf flachere Gebiete bis hin zu den Voralpen. Vorzugsweise in kleinen Maßstäben. [vgl. GYG-37: 83] [RAT-22: 5] Auch deren Anwendungsgebiete sind beschränkt, wie etwa auf den Schulunterricht. Gyax [1937] stellt fest, dass „diese Wenschow-Reliefs demnach mathematisch genaue Kartenübersetzungen darstellen. Sie können für den Schulgebrauch sehr wohl Verwendung finden, da sie dem Schüler das Verständnis der ebenen Karte erleichtern helfen. Rein topographische und im strengsten Sinn naturwahre Reliefs sind die Wenschow-Hochbilder insbesondere für das Hochgebirge und unter Benützung grösserer Maßstäbe sicherlich nicht. Ein topographisches Relief zeigt uns auch all das, was die Karte ihrer Natur wegen nicht darstellen kann. Das rein topographische, naturwahre Relief soll aus dem Naturverständnis herausgegangen sein, und es soll das



Verständnis wiederspiegeln, das in einer zweidimensionalen Karte und damit auch in den Wenschow-Reliefs gar nicht zum Ausdruck kommen kann [GYG-37: 83].“ Des Weiteren merkt er an, dass einem „beim Betrachten dieser Kartenreliefs sofort die flache, unnatürliche Gestaltung der Oberflächenformen“ auffällt. Außerdem erscheinen „die Gratformen zu wenig spezifisch gegliedert“ und „zu wenig prägnant modelliert.“ Die Morphologie dieser Reliefs sei „völlig flach und glatt; prägnante, charakteristische Formen suche man vergeblich.“ Wenschow-Reliefs seien „gute Übersichtsrelief, ohne eigentlichen topographischen Charakter [GYG-37: 83].“

Gygax ist mit seiner Kritik nicht alleine. Bei Einführung dieser Methode war in der Fachliteratur noch von einer wertvollen Erfindung, Erleichterung, Ersparnis, einem wesentlichen und großen Fortschritt sowie außerordentlichen Vorteilen und Vorzügen die Rede. [vgl. HAA-21: 11f.] [RAT-22: 4f.] Nach Fels [1922: 231] soll dieses Verfahren „alles bisher gebotene in den Schatten stellen.“ 1922 hoffte man noch, dass es eine Verbesserung für die Erstellung von Hochgebirgsreliefs mit dieser Methode geben werde. [vgl. RAT-22: 5] Doch auch 1975 können mit dem Wenschow-Verfahren nur Modelle in der Ebene hergestellt werden. Außerdem bedarf es einer hohen Investition für die Einrichtung. [vgl. HAR-75: 33] Für die Selbsterstellung kommt dieses Verfahren also nicht in Betracht [vgl. BIB-35: 566]. Die Vorteile dieser Reliefs beschränken sich somit auf ein geringes Gewicht und die damit verbundene leichte Transportierbarkeit. [vgl. WIT-79: 493]

Es wurden Verbesserungen vorgenommen. Die Isolinien einer Karte wurden auf photomechanischem Wege in eine Metallplatte, vorzugsweise aus Zink, eingätzt. Die so entstandenen Rillen der eingetieften Höhenkurven dienten fortan als Geleise und wurden wie zuvor beschrieben mit dem Führungsstift nachgefahren. So konnte zumindest dieser Arbeitsschritt beschleunigt und vor allem die Fehlerquelle unabsichtlich in eine andere Höhenschicht abzurutschen, beseitigt werden. Lackierte man die Zinkplatte noch zusätzlich, kratze die Nadel des Führungsstiftes den Lack aus den Rillen und man wusste welche Höhenkurven man bereits bearbeitet hatte. [vgl. HAR-75: 32] [IMH-81: 145] [WIT-79: 493]

Des Weiteren wurde von Wenschow ein Spezialschneiderverfahren eingeführt, bei dem entsprechend der Kartenvorlage die Höhenschichtlinien noch genauer ausgefräst werden konnten als zuvor. Von diesem Präzisions-Stufenmodell wurde dann auf gleiche Weise wie oben beschrieben ein Gipsabguss erstellt, der im Anschluss bemalt werden konnte. Diese Methode kam vor allem bei Reliefs im alpinen Gelände in größeren Maßstäben zum Einsatz, da die Kartenreliefs im Hochgebirge zu ungenügend waren. [vgl. FEL-22: 221] Trotz Verbesserungsversuchen und diversen Adaptierungen kommt das Verfahren heute nicht mehr zum Einsatz.

Das Wenschow-Verfahren diente aber nicht nur zur Erstellung von Kartenreliefs, sondern auch zur Gewinnung von Schummerungsbildern für den Kartendruck. Dabei wurde der durch das Wenschowsche Verfahren erstellte dreidimensionale Reliefkörper mit mehreren Lichtquellen beleuchtet und auf photographischem Wege abgebildet. Dies geschah mit

einer Spezialkamera. Die Distanz zwischen Kamera und Relief betrug etwa 40 - 50 m. Um eine entsprechende Schattenplastik zu erreichen, wurden die Lichtquellen schräg oberhalb und seitlich des Reliefs angebracht. Das Ergebnis ist eine Schräglichtschummerung. Das Verfahren weist allerdings einige Nachteile auf. Da die Lichtquellen nicht an lokale Gegebenheiten angepasst werden konnten, kamen große Landschaftsformen nur schwach zur Geltung. Hingegen wurden Unmengen an kleinräumigen Details hervorgehoben. Dies bedarf einer Nachbearbeitung der photographischen Aufnahmen, welche allerdings sehr aufwendig und zeitintensiv war. Aus diesem Grund kommt Wenschows Technik heute nicht mehr zum Einsatz. [vgl. ARN-66: 405] [rel-15]

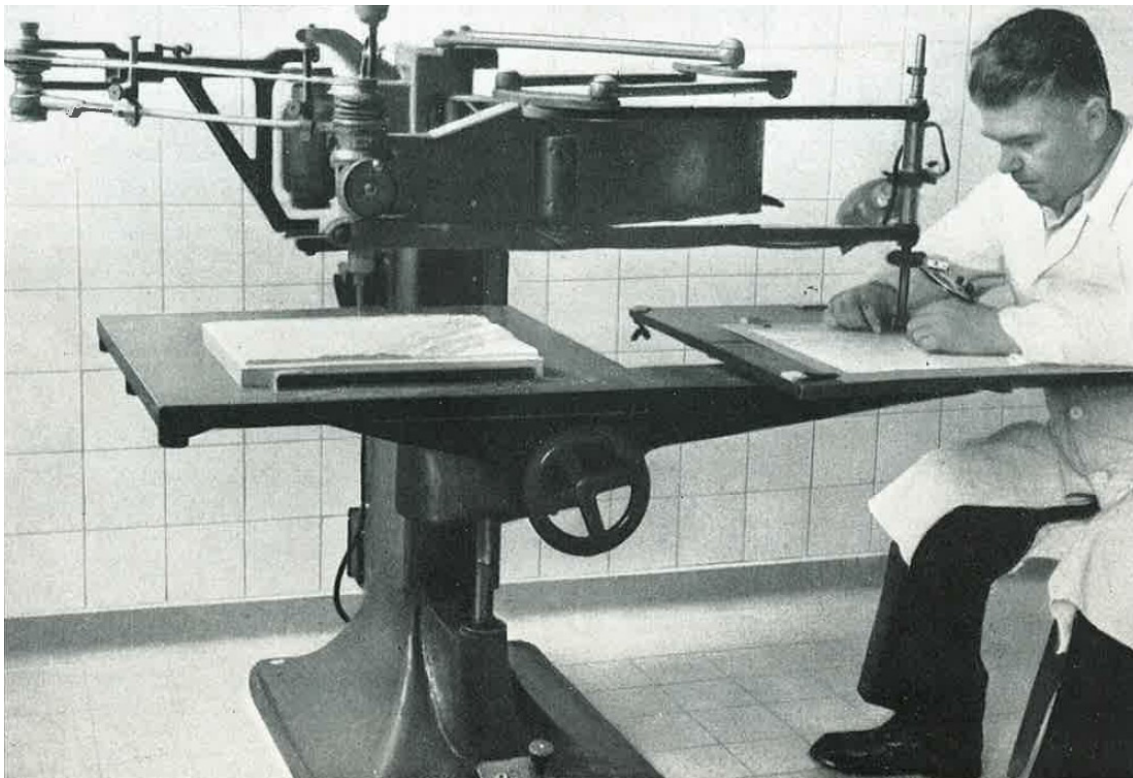


Abbildung 45: Reliefschneidemaschine nach Wenschow. Links der Gipsblock mit Fräskopf. Rechts Kartenvorlage mit Führungsstift und Kugelkalotte oberhalb. [KNE-52: 10]



Abbildung 46: Wenschow-Verfahren - Abfahren der Höhenlinien mit Hilfe einer Lupe [KNE-52: 11]

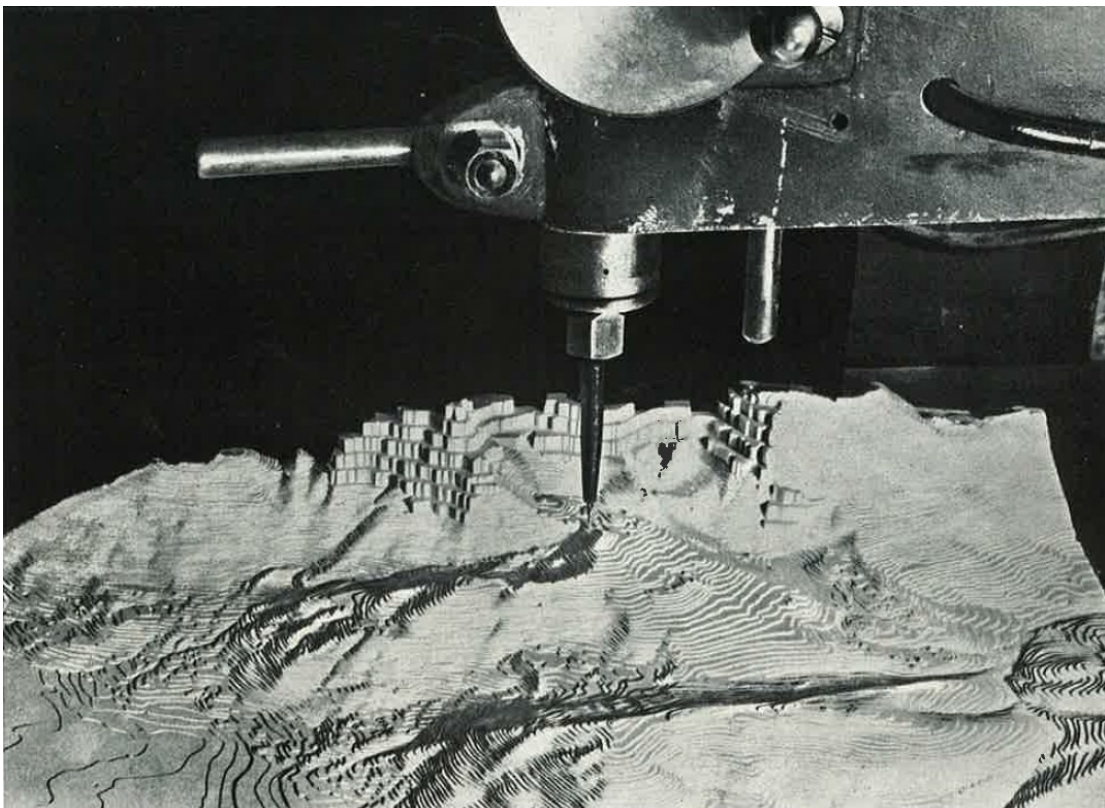


Abbildung 47: Treppenstufenmodell mittels Wenschows-Verfahren erstellt. Im Hintergrund sieht man die Höhenschichten der Haupthöhenlinien. Im Vordergrund sind bereits die Zwischenhöhenlinien ausgefräst. [KNE-52: 10]



### 5.2.3 Das italienische Verfahren

Das Wenschow-Verfahren wurde an verschiedenen Orten weiterentwickelt und angepasst, wie etwa in Italien. Hier kamen ab etwa 1939 in Mailand hergestellte Maschinen zum Fräsen von Reliefs zum Einsatz. Beim italienischen Verfahren wird wie bei Wenschows Methode zuerst ein Stufenrelief aus einem Gipsblock gefräst, anschließend die Treppenstufen abgeschrägt und eine Negativform hergestellt um davon einen positiven Abguss nehmen zu können. Dieses Positivrelief dient dann als Abgussform für die Vervielfältigung der Kartenreliefs. Der Unterschied zu Wenschows Verfahren besteht darin, dass die Karte die als Vorlage dient auf eine Walze aufgezogen wird (siehe Abbildung 48). Durch Handkurbeln werden die auszufräsenden Höhenlinien der Reihe nach unter einer Einstellmarke durchgeführt. Der Gipsblock ist auf einem Schlitten montiert. Die Bewegung der Kartenwalze wird auf den Schlitten und somit den Gipsblock übertragen. Oberhalb des Gipsblockes ist eine Fräse angebracht, die die Höhenschichten abträgt. Die Höhe der Fräse kann mittels Handrad angepasst werden. Zur Beschleunigung des Vorgangs kommen fünf verschieden starke Fräsköpfe zum Einsatz die strahlenförmig auf dem Fräser angeordnet sind. Wie bei Wenschow werden zuerst die Hauptschichtlinien ausgefräst und anschließend die Zwischenlinien. Die Hauptlinien werden auf die untere Stufenkante übertragen. Nachdem die Zwischenlinien ausgefräst wurde, liegen die Höhenlinien im gesamten Modell auf der Oberkante der einzelnen Stufen. Die Genauigkeit der Höheneinstellung beträgt etwa 0,1 - 0,3 mm. Um das Stufenmodell abzuschrägen, werden die Höhenstufen mit einer Wachsmasse, die zu sieben Teilen aus Vaseline und 100 Teilen Bienenwachs besteht, aufgefüllt und überdeckt. [vgl. BOS-54: 141f.] [KNE-52: 1ff.]

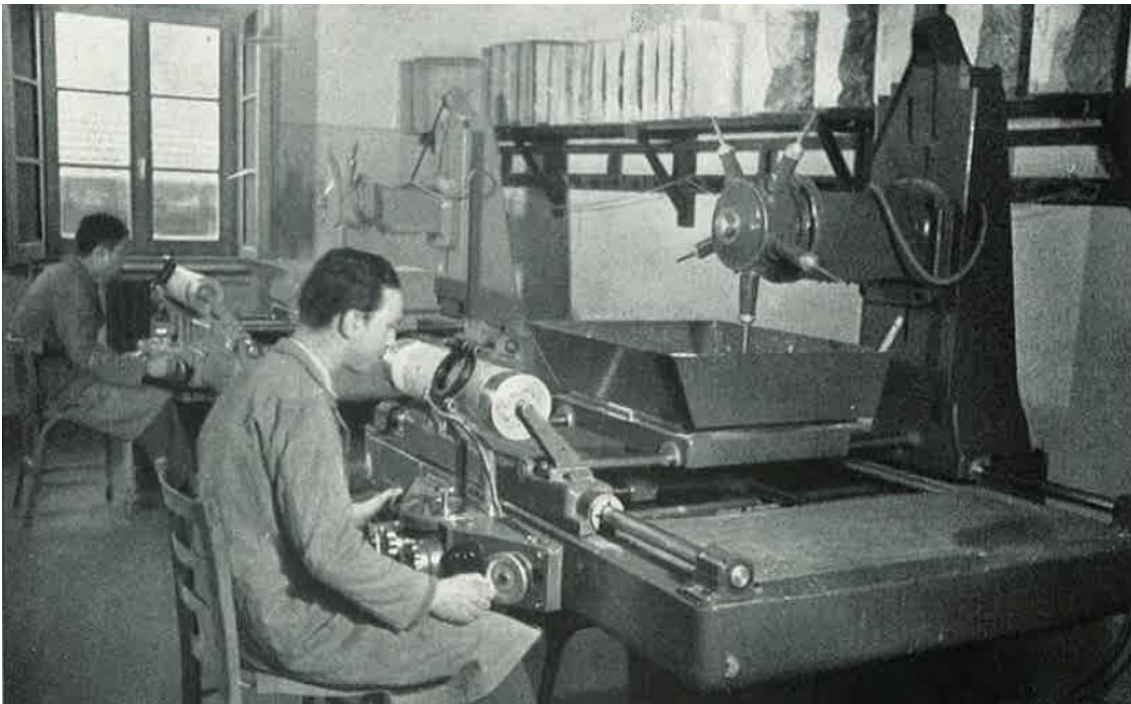


Abbildung 48: Beim italienischen Verfahren ist der Höhenlinienplan auf einer Walze aufgespannt und der Gipsblock in einem Schlitten befestigt. Der Fräskopf ist mit fünf verschiedenen Fräsköpfen ausgestattet. [KNE-52: 3]

Anschließend wird das Geländemodell so bearbeitet, dass die oberen Stufenkanten wieder an die Oberfläche treten. Dies geschieht durch Abschaben mittels Holzgriffel. Ist das Relief fertig modelliert wird es mit Schellack überzogen. Im nächsten Schritt wird es mit Leinöl überstrichen und mit Gips übergossen. Das fertig getrocknete Negativmodell dient dann als Abgussform für beliebig viele positive Gipsreliefs. Diese werden dann mit in Wasser gelöster Gelatine überzogen und einer Karte aus Japanpapier beklebt. Das Aufkleben der Karte muss in Teilstücken passieren. Die Schnitte sollten so angesetzt sein, dass sie sich möglichst unauffällig in die Geländeform einfügen. Das italienische Verfahren ist bis zur Erstellung des Stufenreliefs, was den Zeitaufwand betrifft, gegenüber Wenschows Methode im Vorteil. Bei der Herstellung der Positivreliefs ist jedoch Wenschows Prägeverfahren zeitsparender. Auch der Auftrag der Karte ist beim deutschen Verfahren präziser und schneller. [vgl. BOS-54: 141f.] [KNE-52: 1ff.]

#### **5.2.4 Das amerikanische Verfahren**

Auch in den USA entwickelten sich zwei Verfahren zur maschinellen Herstellung von Geländereiefs. Eines verwendet dabei den in Amerika konstruierten Reliefographen von John J. Braund und das andere bedient sich der Reliefschneidemaschine von Karl Wenschow.

Bei ersterem, auch John J. Braund-Verfahren genannt, wird auf eine weiche etwa 2,5 mm dünne Aluminiumplatte eine Höhenlinienkarte gedruckt oder kopiert. Die bedruckte Platte wird waagrecht in den Rahmen des Reliefographen eingespannt. Unter der Platte befindet sich eine Hartgummiplatte. Der Abstand zwischen den beiden Platten entspricht der Äquidistanz der Höhenlinien im Modellmaßstab. Ein elektrisch betriebener Prägehammer klopft die Aluminiumplatte entlang der tiefsten Höhenlinie nach unten hin aus, bis sie auf der Hartgummiplatte aufliegt. Anschließend wird die Hartgummiplatte entsprechend der Äquidistanz der Höhenlinien gesenkt und die nächste Isohypse auf der Aluminiumplatte ausgeklopft. Auf diese Weise entsteht ein negatives Aluminiumrelief, welches keine Stufen besitzt, sondern kontinuierliche Hangverläufe aufweist. Die Vervielfältigung der Reliefs geschieht mit einer von Braund konstruierten Vakuumprägemaschine. Das Kartenbild oder auch ein Luftbild, welches auf eine Kunststoffolie gedruckt wurde, wird mit der bedruckten Seite auf die negative Form gelegt. Unter Vakuum und Hitze zuzufuhr nimmt die Folie die Form des Negativs an. [vgl. BOS-54: 142] [PIL-52: 25] Nach Harvalik [1975: 32] ist dieses Verfahren allerdings nur wenig genau und ermöglicht „keine präzise und genügend feine Modellherstellung, so daß ihre Anwendung heutzutage problematisch erscheint.“

Im Gegensatz dazu greift die staatliche Methode auf die Reliefschneidemaschine von Wenschow zurück. Allerdings wurde das Verfahren zwischen 1950 und 1954 in den USA etwas angepasst. Die auf eine Zinkplatte kopierten und etwa 0,1 mm tiefgeätzten Höhenschichtlinien werden mit einer Grammophon-nadel statt dem Führungsstift nachgefahren. Um bereits nachgefahrte Schichtlinien von unbearbeiteten zu



unterscheiden, wird die Zinkplatte mit einem roten Lack eingefärbt. Statt das Stufenrelief aus einem Gipsblock zu fräsen, verwendet man PVC-Folien, deren Stärke der Äquidistanz der Höhenlinien entspricht. Die Schichten werden zu einem Block zusammengeklebt. Es wird wieder mit dem Fräsen der höchsten Schicht begonnen. Das Material, welches nicht zum Stufenmodell gehört kann durch einfaches Abtrennen entfernt werden. Man erspart sich also zeitaufwendiges Wegfräsen des überschüssigen Gipsmaterials in jeder Höhengschicht, wodurch auch kein Gipsstaub mehr entsteht. [vgl. BOS-54: 142] [HAR-75: 32] [PIL-52: 25] Pillewizer [1952: 26] gibt an, dass man mit dieser Technik eine Zeiteinsparung von 72% gegenüber dem deutschen Verfahren erhält. Das so entstandene Treppenstufenrelief weist die Höhenlinien an der Oberkante der Stufen und wird durch auffüllen der Kanten mit Plastilin abgeschrägt. Die Vervielfältigung der Reliefs erfolgt dann wieder durch Abgießen einer Negativform und anschließender Vakuumprägung. [vgl. PIL-52: 25] Die Vakuumverformung wird an dieser Stelle nicht mehr weiter erläutert, da sie nicht das vorrangige Thema dieser Arbeit darstellt. Für nähere Informationen darf an dieser Stelle auf Mühles Beiträge aus den Jahren 1965 und 1967 verwiesen werde. [MÜH-65a] [MÜH-67]

### **5.2.5 Reliefherstellung mittels Stereobildern**

Als Datengrundlage im maschinellen Reliefbau können neben Höhengschichtlinien in topographischen Karten auch Stereobilder dienen. Bereits im Jahr 1912 wurde von Bauersfeld der Versuch unternommen, einen Stereoautographen für den Reliefbau umzubauen. Nach seinen Plänen entwickelte die Firma Zeiss den Stereoplast DRP 276261. [vgl. ZEM-86: 20] Diese Idee wurde Ende der 1950er Jahre vom American Map Service wieder aufgegriffen. Man wollte mit Hilfe eines photogrammetrischen Auswertegerätes ein Geländereief direkt nach dem Stereomodell ausschneiden. Dabei wurden topographische Profile auf dem Stereomodell abgetastet und in einen Block aus wachsartigem Material eingeschnitten. Am Beispiel des Stereoautograph A5 wurde die Auswertglasplatte durch einen kalibrierten Fräsmaschinentisch unter dem Koordinatographen ausgetauscht. Ein Wachsblock wurde senkrecht auf eine Metallplatte montiert und gemeinsam am Frästisch befestigt. Ein Fräskopf schneidet entsprechend der Abtastung im Stereomodell die eng aneinander gescharten Profile am Geländemodell aus. Ist die erste Profilschicht weggefräst, wandert die Metallplatte samt Wachsmoell um einen bestimmten Betrag in der Y-Achse nach vorwärts. Dies geschieht durch ein Rad am Frästisch. Ist der Block aus verschiedenfarbigen Lagen bestehend, erhält man in einem Arbeitsgang ein Relief und eine Vorlage für einen Höhenlinienplan. Von dem mehrfarbigen Relief wird ein verzerrungsfreies Foto aufgenommen und entlang der verschiedenfarbigen Bänder eine Durchzeichnung der Höhengschichtkonturen vorgenommen. Außerdem wird dank der Profiliertechnik die erforderliche manuelle Oberflächenbearbeitung am Relief stark vermindert. Diese Methode eignet sich besonders für großmaßstäbige Geländemodelle. Nichtsdestotrotz wird auch dieses Verfahren vorwiegend für die Erstellung von Vorlagen für die Vakuumprägung von

---

Kartenreliefs genutzt. Abgesehen davon ist diese Methode mit hohen Anschaffungskosten verbunden. [vgl. MAY-59] [ZEM-86: 20f.]

### 5.2.6 Reliefherstellung mittels Photopolymerisation

Bei der Reliefherstellung mittels Photopolymerisation bildet sich in einer Kunststofflösung durch Belichtung eine relativ feste Kunststoffmasse. Als Photopolymerisationsmasse dient z. B. Methyl-Polymethacrylat. Zu Beginn des Verfahrens müssen Negativ-Masken vorbereitet werden. Dabei werden die Höhenschichten als gleitende Grauabstufungen zusammenkopiert. Innerhalb der einzelnen Höhenschichten müssen gleichmäßige densitometrische Dichtewerte vorliegen. Jede Schicht muss sich von der folgenden durch unterschiedliche Grauabstufungen absetzen. Die Tonwert-Abstufung folgt dem Prinzip „je heller desto höher die Schicht im Kunststoffrelief.“ Die höchste Schicht wird abfallend zur niedrigsten vom hellen zum dunklen Tonwert eingefärbt. Für die Generierung eines Negativmodelles erfolgt die Abstufung in umgekehrter Reihenfolge. Bei harten Übergängen zwischen den Höhenschichten-Tonwerten entstehen steile Böschungen bis hin zu Stufenreliefs. Weiche Übergänge bewirken hingegen flache Hangneigungen. [vgl. MÜH-65b] [ZEM-86: 21]

Die Lichtstrahlen werden von unterhalb der Halbtonvorlage auf die Kunststofflösung projiziert. Die Belichtung dauert etwa 30 bis 90 Sekunden. Die Lichtstrahlen dringen entsprechend der Opazität der Höhenschichten in unterschiedlicher Intensität in die Kunststofflösung ein und es kommt zur Photopolymerisation wodurch sich ein gallertartiges Kunststoffrelief bildet. Als Lichtquelle dienen einfache Leuchtstofflampen. Je intensiver das Licht auf die Flüssigkeit einwirkt umso stärker ist die Photopolymerisation und umso fester wird die Kunststoffmasse. Im Anschluss daran wird das Relief durch ein kaltes Wasserbad im Tageslicht und durch Lufttrocknung nachgehärtet. Ein Negativ-Abguss aus Silikonkautschuk bildet das Ausgangsmodell für alle weiteren Abgüshgvc se z. B. aus Gips und notwendigen Oberflächenmodellierungen. Auch hier war der ursprüngliche Zweck, die Herstellung eines Reliefs für die weitere Ableitung photomechanischer Schummerungen oder als Tiefziehform zur Prägung von Kartenreliefs. [vgl. MÜH-65b] [ZEM-86: 21] Nach Zemmann [1986: 21] ist die chemisch-mechanische Reliefherstellung allerdings über das experimentelle Stadium hinaus kaum zu breiterem Einsatz gelangt.

## 5.3 Digitale Verfahren

Da bei der manuellen Modellierung sehr viel Erfahrung benötigt wird um brauchbare und vor allem qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen und die Herstellung solcher Reliefs äußerst arbeitsintensiv und somit auch kostspielig ist, werden immer wieder neue Verfahren und Methoden eingesetzt um den Arbeitsprozess zu vereinfachen und zu automatisieren. Caldwell [2001] gibt einen Überblick über diese automatisierten bzw. digitalen Verfahren, welche in **auftragende (additive)**, **abtragende (subtraktive)** und

**formverändernde (formative)** Verfahren gegliedert werden können. Bei additiven Verfahren wird Material aufgetragen, bei subtraktiven Verfahren wird Material abgetragen und bei formativen Verfahren wird mit Gegendruck gearbeitet. Im computergestützten Reliefbau kommen heutzutage hauptsächlich additive und subtraktive Verfahren zum Einsatz, wobei die Auflösung der additiv erstellten Modelle höher ist als jene der subtraktiven. [vgl. CAL-01: 67] Der größte Unterschied zu den Methoden von Imfeld, Wenschow oder Mair besteht (neben der Tatsache, dass es sich um analoge Verfahren handelt) hinsichtlich der Ausgangsdaten. Beruhen diese Methoden auf analogen topographischen Karten, so kommen bei den computergenerierten Modellen DGMs zum Einsatz. [vgl. CAL-01: 66]

Die Daten werden entsprechend des Maßstabes im GIS (Geoinformationssystem) aufbereitet und gegebenenfalls bereinigt und liegen beispielsweise als TIN (Triangulated Irregular Network) oder GeoTIFF (Geo Tagged Image File Format) Datei vor. Diese GIS spezifischen Datenformate sind oftmals nicht mit jenen der im digitalen Reliefbau zum Einsatzkommenden Maschinen kompatibel. Hier werden CAD-Formate (Computer-Aided Design) benötigt. Ist eine entsprechende Software, die die direkte Datenkonvertierung zwischen GIS und CAD zulässt, nicht zugänglich, muss der Datenaustausch über das ASCII-Format (American Standard Code for Information Interchange) erfolgen. Ist das DGM erstmals in einer ASCII Textdatei abgespeichert, kann es problemlos in das von dem 3D-Drucker oder der CNC-Fräse (Computer Numerically Controlled) lesbare Format, wie etwa als Wavefront-Datei (.obj), VRML-Datei (Virtual Reality Modeling Language; .vrl), STEP-Datei (STandard for the Exchange of Product model data), IGES-Datei (Initial Graphics Exchange Specification) oder als STL-Format (STereoLithography, Standard Tessellation Language; .stl) konvertiert werden. [vgl. BUC-07: 244] [HAH-12: 285] [WYS-14: 65]

Diese digitalen Verfahren kennzeichnen sich also dadurch, dass keinerlei manuelle Arbeitsschritte mehr notwendig sind. Sowohl die Datengrundlage liegt in digitaler Form vor bzw. wird vorab digitalisiert und aufbereitet als auch die Steuerung der ausführenden Geräte funktioniert computergestützt. Auf den folgenden Seiten wird ein Überblick über die aktuellen digitalen Herstellungsverfahren sowie deren Entwicklung gegeben.

### 5.3.1 Additive Verfahren

Unter einem additiven Fertigungsverfahren versteht man einen „automatisierten Prozess zur Herstellung maßstäblicher dreidimensionaler physischer Objekte unmittelbar aus einem 3D-CAD-Datensatz (computer-aided design) [GEB-16: 2].“ Gleichbedeutend werden unter anderem auch die Begriffe 3D-Drucken, Rapid Prototyping, generatives Herstellungsverfahren oder Schichtbautechnologie verwendet. Allerdings kommen im Reliefbau statt CAD-Dateien DGMs zum Einsatz. [vgl. GEB-16: 3f.]

Additive Verfahren lassen sich nach Caldwell [2001: 67] und Semann [1999: 187] in folgende für den Reliefbau relevante Technologien unterscheiden: **Stereolithographie** (Abkürzung:

SL, LS; auch bekannt als Laser-Stereolithographie, Polymerisation, Polymerdruck, selektive Verfestigung; Selective Curing), **Selektives Lasersintern** (Abkürzung: SLS; Selective Sintering), **Fused Deposition Modeling** (Abkürzung: FDM; auch bekannt als Schmelzschichtmodellierung, Extrusion, Fused Layer Manufacturing, Aimered Deposition Process), **Inkjet-Rapid Prototyping** (auch bekannt als ballistisches Verfahren), **Pulver-Binder-Verfahren**, **Laminated Object Modelling** (Abkürzung: LOM; auch bekannt als Schicht-Laminat-Verfahren, Layer Laminated Manufacturing, Bond-first Pattern Lamination). Jedes dieser Verfahren ist für einen anderen speziellen Werkstoff geeignet. Dieser kann beispielsweise aus Kunststoff, Flüssigkeit, Keramik, Papier oder gar Metallpulver sein. Die Gemeinsamkeit dieser vier Methoden besteht hinsichtlich der Tatsache, dass es sich um einen schichtweise aufbauenden Prozess handelt. [vgl. KRE-06: 101]

Bei der **Stereolithographie** kommt flüssiges Kunstharz zum Einsatz welches unter Laserlicht bzw. UV-Strahlung erstarrt. Es ist die älteste Form der additiven Fertigung, wurde in den 1980er Jahren von Chuck Hall erfunden und ist bis heute der Klassiker unter den Rapid Prototyping Verfahren. Außerdem ist es der am meisten detaillierte additive Fertigungsprozess. Der Standarddateityp STL für den 3D-Druck leitete sich aus dem Wort Stereolithographie ab und ist bis heute gebräuchlich. Halls Firma „3D Systems“ baute die erste Rapid-Maschine. Diese Laser-Stereolithographie-Maschine besteht aus einem Behälter, der mit dem flüssigen Baumaterial (Polymer) gefüllt ist und einer darüber befindlichen Laser-Scanner-Einheit, die die Konturen des aufzubauenden Objektes entsprechend der CAD-Datei schichtweise in x- und y-Richtung abfährt (siehe Abbildung 49). [vgl. CAL-01: 67] [GEB-16: 38ff.] [HAU-14: 38] [KRE-06: 102]

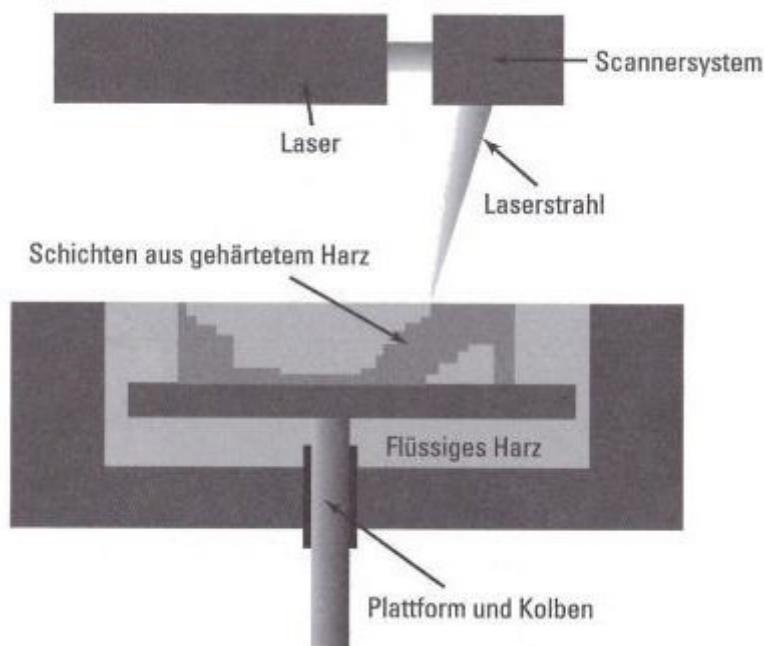


Abbildung 49: Funktionsweise der Stereolithographie [HAU-14: 40]

Der Laserstrahl wird durch die Scaneinrichtung gelenkt. Eine in z-Richtung bewegliche Plattform taucht von unterhalb genau so weit in den Behälter ein, dass sich darauf eine dünne Flüssigkeitsschicht bildet. Trifft das Laserlicht auf die Oberfläche des flüssigen Kunstharzes, kommt es sofort zur Verfestigung des Materials durch Polymerisation. Anschließend wird die Plattform samt verfestigter erster Schicht um die entsprechende Schichtdicke abgesenkt. Durch das erneute Eintreffen des Laserstrahls auf die Oberfläche, entsteht die zweite gehärtete Schicht. Diese Arbeitsschritte werden fortgesetzt, bis das Modell vollendet ist. Da das polymerisierte Kunstharz anfangs relativ weich ist, werden Stützstrukturen eingebaut, die nach dem zweiten Aushärten des Modells in einer UV-Kammer händisch entfernt werden können. Die Stereolithographie gilt als eines der genauesten 3D-Druck-Verfahren. Der Nachteil besteht hinsichtlich des Gerätepreises. Hier finden sich Angaben von mehreren zehntausend US-Dollar bis hin zu 800.000 US-Dollar im teuersten Rapid Prototyping-Bereich. Abbildung 50 zeigt eine Laser-Stereolithographie-Maschine der Firma 3D Systems mit der es möglich ist, Modelle mit einer maximalen Ausdehnung von 150 x 75 x 55 cm herzustellen. Das fertig ausgehärtete Modell kann dann poliert und lackiert werden. Streng genommen handelt es sich bei dem Endergebnis um ein Treppenstufenrelief. Auch wenn die Schichtdicken nur ca. 0,1 mm betragen, können diese den charakteristischen Eindruck einer Felswand stark verfälschen. Sind beispielsweise die Gesteinsstrukturen ursprünglich von länglichem Charakter, können die Querstrukturen im Modell einen völlig falschen Eindruck vermitteln. [vgl. CAL-01: 67] [GEB-16: 38ff.] [HAU-14: 38] [KRE-06: 102] [3ds-18]



Abbildung 50: Laser-Stereolithographie-Maschine der Firma 3D Systems, Modell ProX 950 [3ds-18]

Abbildung 51 zeigt ein mittels Stereolithographie angefertigtes Geländemodell im Maßstab 1:12.500. Es wurde 1998 von Mika Semann im Rahmen seiner Diplomarbeit an der Fachhochschule Karlsruhe konzipiert. Die Schichtdicke lag damals bei 0,15 mm. Neben den einzelnen Schichten sind auch wabenartige Strukturen, bedingt durch den Polymerdruck,



deutlich sichtbar. Erst durch die manuelle Lackierung werden die wabenartigen Strukturen in den Hintergrund gedrängt (siehe Abbildung 77).



Abbildung 51: Eiger Relief - Stereolithographie, unlackiert; ©Mika Semann

Beim **selektiven Lasersintern** kommt statt flüssigem Kunstharz pulverisiertes Baumaterial oder Granulate zum Einsatz. Das Pulver, bestehend aus Kunststoff, Metall oder Keramik, kommt durch Wärmeeinwirkung zum Schmelzen und erstarrt bei der anschließenden Abkühlung. Die Korngröße des Pulvers liegt zwischen  $20\mu\text{m}$  und  $50\mu\text{m}$ . Der Bauraum dieses 3D Druckers ist mit dem Granulat gefüllt, welches durch einen Pulverzufuhrkolben und einer Walze in den Fertigungsbereich transportiert wird. Oberhalb des Fertigungsbettes befindet sich ein Laser der durch ein Scannersystem gesteuert wird (siehe Abbildung 52). [vgl. CAL-01: 67] [GEB-16: 45ff.] [HAU-14: 42f.] [KRE-06: 102f.]

Der Laser fährt die Konturen entsprechend des DGMs in x- und y-Richtung ab. Die Fabrikationsebene befindet sich auf einem Kolben der in z-Richtung gesteuert werden kann. Die Oberfläche des Pulverbettes stellt die Modellbaufläche dar. Dort wo der Laserstrahl auf das Kunststoffgranulat auftrifft, wird es auf Grund der Hitze aufgeschmolzen und verfestigt sich im Zuge der Wärmeabfuhr an der von der digitalen Vorlage vorgegebenen Stelle. Auch bei diesem Verfahren erfolgt der Modellbau schichtweise von unten aufbauend. Nach der Verfestigung einer Schicht, wird das Fertigungsbett samt begonnenem Werkstück um die entsprechende Schichtdicke nach unten abgesenkt und der entstehende Freiraum mit neuem Pulver wiederbeschichtet. Das neu angebrachte Material wird dann wieder durch den Laserstrahl entsprechend der Konturen aus der digitalen Datenvorlage gesintert. Dieser

Ablauf wird schichtweise wiederholt bis das Modell fertig aufgebaut ist. [vgl. CAL-01: 67] [GEB-16: 45ff.] [HAU-14: 42f.] [KRE-06: 102f.]

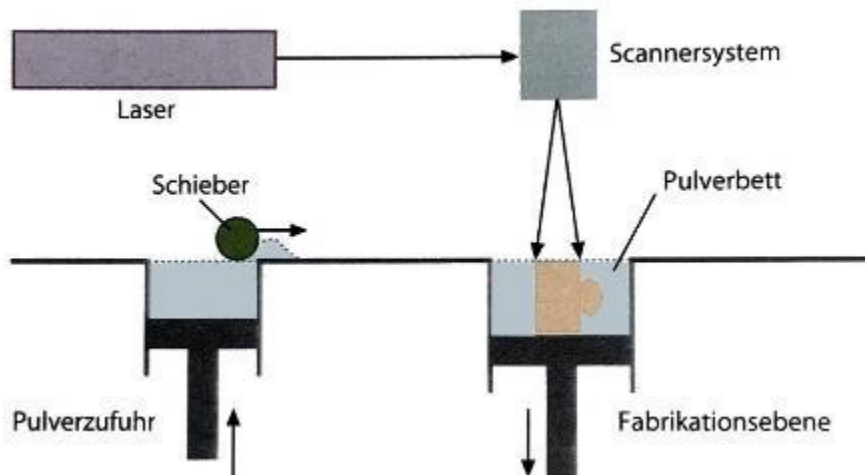


Abbildung 52: Funktionsweise des Lasersinterns [KRE-06: 104]

Ist die Fertigung abgeschlossen wird das Modell mit zusätzlichem Pulver bedeckt und abgekühlt. Bei großen Werkstücken kann dies bis zu zwei Tage in Anspruch nehmen. Der „Break Out“, also die Entnahme des Modells aus dem Pulverkuchen erfolgt bei Kunststoffmodellen händisch, da diese oft porös sind. Abbildung 53 zeigt den Ablauf des Lasersinter-Verfahrens anhand eines Bauteiles. Stützgerüste wie bei der Stereolithographie sind bei diesem Verfahren nicht notwendig. Für die endgültige Verfestigung muss das Modell in Harz getaucht werden. Anschließend kann es lackiert werden. [vgl. CAL-01: 67] [GEB-16: 45ff.] [HAU-14: 42f.] [KRE-06: 102f.]

Allgemeines Funktionsprinzip des Laser-Sinterns

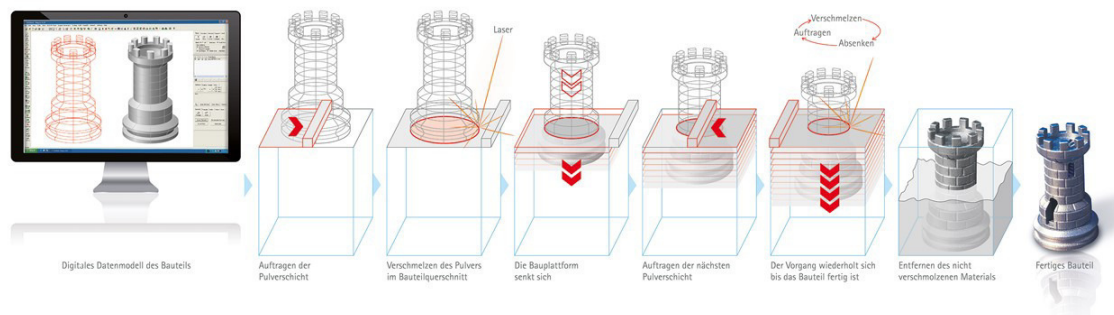


Abbildung 53: Arbeitsablauf des Lasersinterns - von der digitalen Vorlage bis zum fertigen Modell [eos-18c]

Mit dem Einstiegs-Lasersintergerät FORMIGA P 110 der Firma EOS Electro Optical Systems in München können Modelle mit einer Ausdehnung von 20 x 25 x 33 cm und einer Schichtdicke von 0,06 - 0,12 mm aufgebaut werden. Das Highend-Gerät EOS P 770 besitzt die größte am Markt verfügbare Baufläche und ermöglicht eine Modellgröße von bis zu 70 x 38 x 58 cm bei einer Schichtdicke zwischen 0,06 und 0,18 mm (je nach Material). Der

Baufortschritt liegt bei bis zu 32 mm/h. Das Gerät ist mit einem Preis von über 210.000 Euro allerdings auch entsprechend teuer. [vgl. 3dm-18] [eos-18a,18b]

Das **Pulver-Binder-Verfahren** ist dem Lasersintern sehr ähnlich. Der Unterschied besteht nur hinsichtlich der Technik, wie das Granulat gehärtet wird. Statt dem Sintern mit einem Laser wird es mit Klebstoff verbunden. Eine Schicht aus beispielsweise keramischen Pulver wird auf einer Grundplatte aufgetragen. Ein Druckkopf mit mehreren Düsen bewegt sich über das Pulverbett und besprüht die Bereiche die zum Modell gehören mit transparentem Klebstoff. Auf diese Weise wird die erste Schicht des Modells fixiert. Im Jahr 2001 machte es die Firma ZCorporation erstmals möglich eine Modellschicht auch gleich mit den additiven Komponenten Cyan, Magenta und Gelb mittels Sprühköpfe zu kolorieren. Für den Auftrag der nächsten Schicht, wird die Grundplatte abgesenkt und mit Keramikpulver beschichtet, das mit Klebstoff fixiert und eingefärbt wird. Dies wird so lange wiederholt, bis die fertige Modellhöhe erreicht ist. Das nicht fixierte Granulat kann durch Schütteln oder Ausblasen entfernt und wiederverwendet werden. Um das Modell widerstandsfähiger zu machen, wird es beispielsweise in Wachs oder Epoxidharz getränkt. Dadurch wird es stabiler gegenüber mechanischen Belastungen und resistent gegen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen. Nach Rase [2010: 39 und 2003: 21] beträgt die Schichtdicke der fertigen Modelle etwa 0,1 mm und kann in geringem Ausmaß variiert werden. Die Modellmaße können bis zu 60 x 50 x 40 cm erreichen. [vgl. GEB-16: 55f.] [HAU-14: 43f.] [RAS-03: 21] [RAS-10: 39] Abbildung 54 zeigt ein Geländemodell der Firma Shapewerk mit Sitz in Leipzig, welches mittels farbigem Pulver-Binder-Verfahren hergestellt wurde.

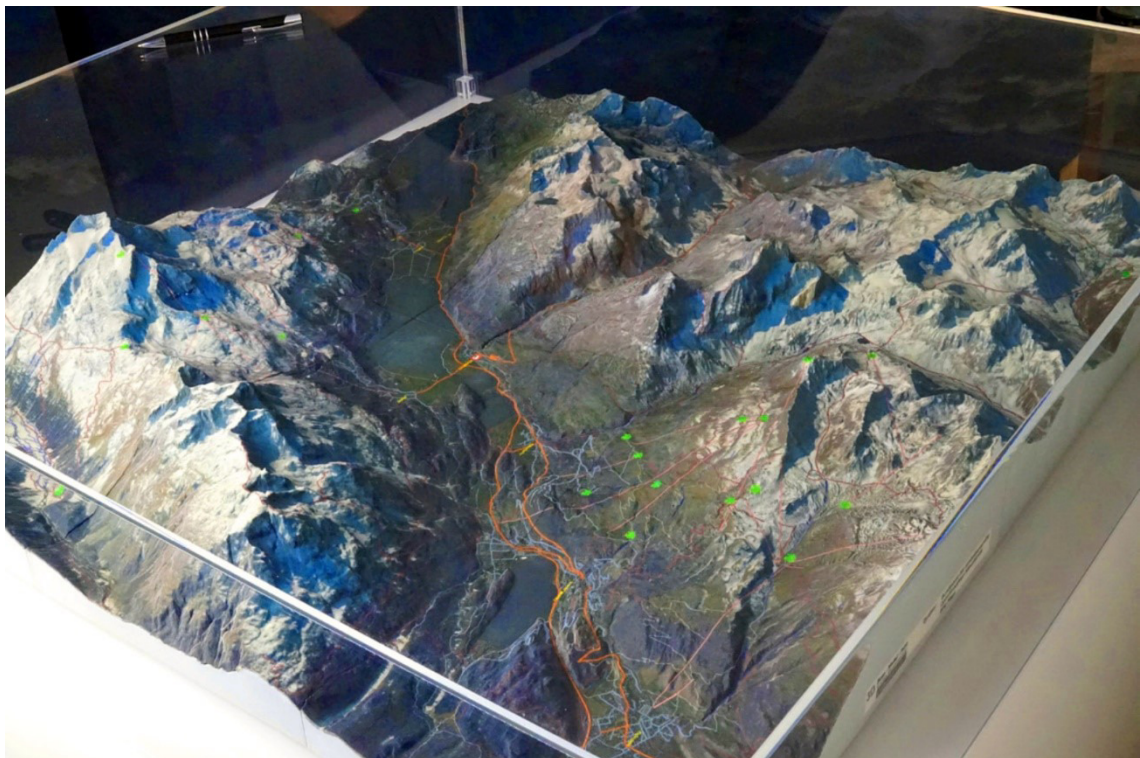


Abbildung 54: Geländereief von St. Moritz inklusive markierter Wander-, Ski- und Ausflugsmöglichkeiten [sha-18]



Das **Fused Deposition Modeling (FDM)** Verfahren ist ein extrudierendes Verfahren. Dabei wird mittels Spritzdüse ein Modell schichtweise aufgebaut. Das Verfahren wurde Ende der 1980er Jahre von der US-Firma Stratasys eingeführt und ist eine geschützte Markenbezeichnung. Daher ist es bei anderen Herstellern als Fused Layer Modeling (FLM) bekannt. FDM und FLM werden aber oft gleichbedeutend benutzt. Ein FDM-Gerät setzt sich aus einer beheizten Baukammer mit Extrusionskopf und Bauplattform zusammen (siehe Abbildung 55). Das thermoplastische strangförmige Kunststoffmaterial wird in der geheizten Spritzdüse aufgeschmolzen und in der x- und y-Richtung entsprechend den Konturen der digitalen Datenvorlage aufgetragen. Das Modell wird von unten nach oben aufgebaut. Die Bauplattform wird in z-Richtung verfahren. Ist eine Schicht aufgetragen, wird die Arbeitsplatte gesenkt und die nächste Schicht aufgetragen. Nach dem Auftragen erhärtet die Schicht und verbindet sich mit der vorangegangenen. Als Baumaterial können drahtförmiges Nylon, Polyethylen oder Wachs dienen, welches der Düse kontinuierlich zugeführt wird. Der Strangdurchmesser liegt je nach extrudierender Düse zwischen 0,1 - 0,25 mm. Das FDM-Verfahren benötigt während des Bauverfahrens Stützstrukturen. Diese werden von einer zweiten Düse erzeugt. Nach dem Aushärten des Modells werden die Stützen entweder per Hand entfernt oder mittels Natronlauge ausgewaschen. Das fertige Modell kann anschließend aufpoliert oder lackiert werden. Es kann aber auch farbiges Filament, also Baumaterial, verwendet werden. [vgl. CAL-01: 67] [GEB-16: 51ff.] [HAU-14: 47f.] [KRE-06: 104]

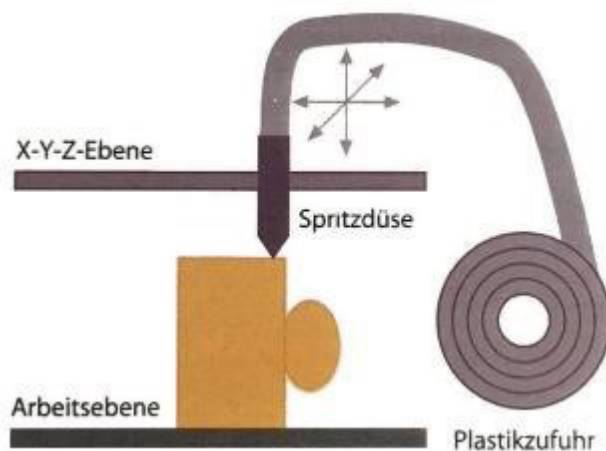


Abbildung 55: Funktionsweise des FDM [KRE-06: 104]

Beim **Inkjet-Rapid Prototyping-Verfahren** wird statt drahtförmigem Material, Kunststoff in Form von Tröpfchen auf das Modell aufgetragen bzw. „geschossen“, daher auch als ballistisches Verfahren bekannt. Die Funktionsweise ähnelt einem Tintenstrahldrucker. Die Düse versprüht aufgeschmolzenes thermoplastisches Material, wobei die Temperatur so gewählt werden muss, dass das bereits auf dem Modell befindliche und abgekühlte Material durch den Auftrag einer neuen Schicht wieder partiell angeschmolzen wird um sich mit ihr zu verbinden. Ein zweiter Düsenkopf erstellt aus wachsähnlichem Material eine Stützstruktur. Beide Materialien härten durch den Temperatursturz beim Aufsprühen von

alleine aus. Ist das Modell fertig aufgebaut, wird die Stützstruktur weggeschmolzen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Oberflächengenauigkeit. Die Ansätze zwischen den Schichten sind auf Grund des geringen Tröpfchendurchmessers kaum sichtbar. [vgl. KRE-06: 104] [SEM-99: 187]

Beim **Laminated Object Manufacturing** wird das Modell ebenfalls schichtweise aufgebaut. Ein Laser schneidet aus einer Folie oder Platte aus Papier, Keramik, Kunststoff oder Metall die Konturen des Modells entsprechend der digitalen Datengrundlage schichtweise aus. Ist die erste Schicht ausgeschnitten, wird die Plattform auf der das Modell aufgebaut wird abgesenkt und die nächste Schicht darauf befestigt. Das Material, vorzugsweise 0,2 mm dickes Papier, wird über eine Walze abgerollt und unter dem Laser positioniert. Die Schichten werden mit Klebstoff verbunden. Eine beheizte Walze aktiviert den auf der Unterseite des Materials angebrachten Kleber. Zusätzlich zu den Konturen wird ein Rahmen um das Modell ausgeschnitten und ein Gitternetz darauf eingeschnitten. Der Rahmen dient als Stütze und wird nach Fertigstellung des Modells per Hand entfernt. Die eingravierten Gitterlinien helfen das Material leichter und in kleinen Stücken entfernen zu können. Das restliche Material aus den Zwischenräumen wird auf der gegenüberliegenden Seite wieder aufgerollt. Abbildung 56 zeigt den schematischen Ablauf dieses Fertigungsprozesses. [vgl. CAL-01: 68] [GEB-16: 60f.] [HAU- 14: 45f.] [SEM-99: 187]

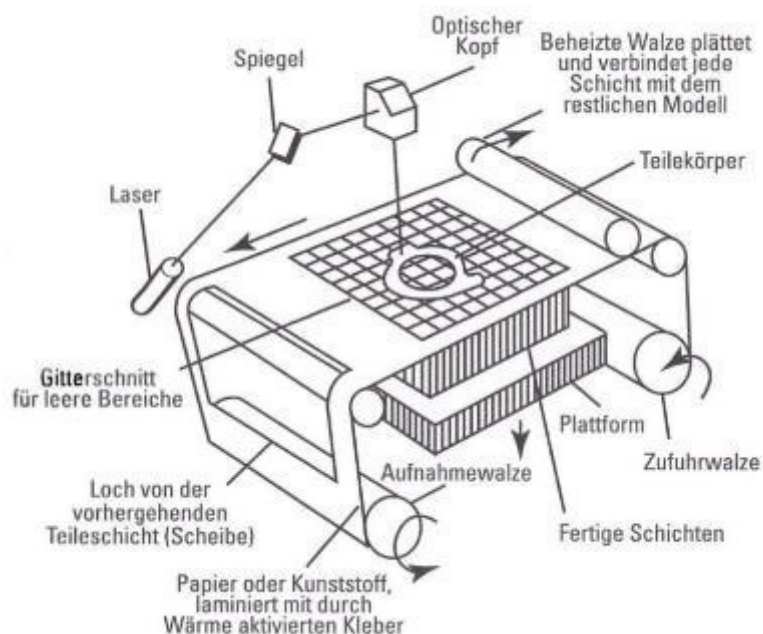


Abbildung 56: Fertigungsprozess des LOM Verfahrens [HAU-14: 46]

Der Nachteil dieses Herstellungsverfahrens liegt darin, dass es bei kompliziert geformten bzw. stark verwundenen Modellen beim Entfernen des überschüssigen Materials zu Verformungen kommen kann. Als Vorteil führt Caldwell [2001: 68] an, dass der Laser beim Ausschneiden der Konturen die Kanten der einzelnen Schichten verbrennt und sich diese



bräunlich verfärben. Somit erscheinen dem Betrachter steile Gebiete dunkler und flache Gebiete heller. Die Größe der Gitterlinien die auf dem Modell eingraviert zurückbleiben, kann vorab eingestellt und angepasst werden (siehe Abbildung 57). So können etwa Gitternetzlinien einer topographischen Karte auf das Modell übertragen und dieses mit Koordinaten versehen werden. Das Herstellungsverfahren wurde ursprünglich von der Firma Helisys (heute Cubic Technologies) in den USA eingeführt. Hält es Caldwell im Jahr 2001 noch als vielversprechendes Verfahren im Reliefbau, so weist Gebhardt im Jahr 2016 darauf hin, dass die Herstellung der LOM-Maschinen bereits eingestellt wurde, Service und Wartung der im Gebrauch befindlichen Maschinen allerdings gewährleistet wird. [vgl. CAL-01: 68] [GEB-16: 60f.] [HAU- 14: 45f.] [SEM-99: 187]

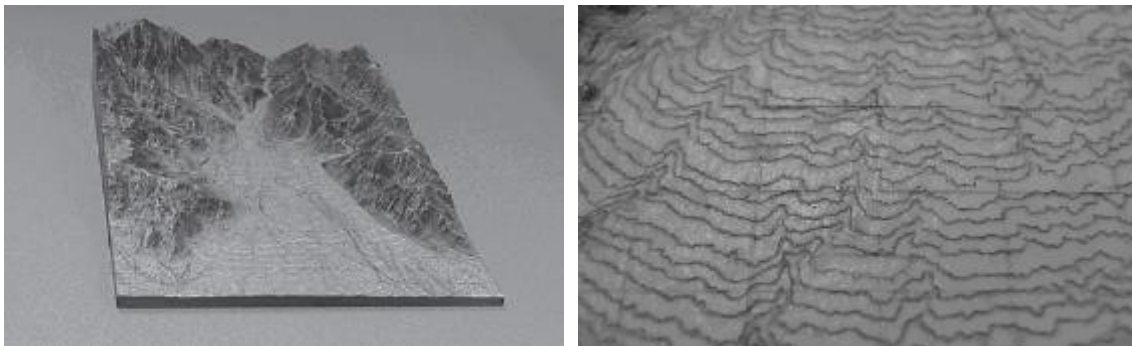


Abbildung 57: LOM Modell (links) und Nahaufnahme eines mittels LOM erstellten Modells (rechts) [CAL-01: 68]

### 5.3.2 Subtraktive Verfahren

Bei den subtraktiven Verfahren ist vor allem das computergesteuerte Fräsen aus einem Materialblock für den Reliefbau von Bedeutung. Dabei kommt eine CNC-Maschinen zum Einsatz. Diese fräst ähnlich wie beim Wenschow-Verfahren ein Geländemodell aus einem Block aus synthetischem Schaumstoff, Holz, Metall oder Verbundwerkstoff. Der Unterschied zum Wenschow-Verfahren besteht hinsichtlich der Datengrundlage, welche als DGM vorliegt, und der Steuerung der Maschine. Wurden bei Wenschows Verfahren die Höhenlinien händisch abgefahren um den Fräskopf zu steuern, so basiert die Steuerung der CNC-Fräse computergesteuert. CNC-Fräsen mit drei Achsen (X, Y, Z) konstruieren streng genommen nur 2,5D-Modelle, während Maschinen mit fünf bis sieben Achsen auch Überhänge und komplexere Formen ausfräsen können. CNC-Maschinen sind also prinzipiell in der Lage steile überhängende Felswände zu modellieren, allerdings sind die dafür notwendigen Daten oftmals in den (frei verfügbaren) DGMs nicht vorhanden. Aus diesem Grund werden etwa steile Felshänge nur sehr schematisch in einem CNC gefrästen Modell dargestellt. Nach Rase [2012: 121] ist die CNC-basierte Herstellung von Geländereiefs zeitintensiver und kostspieliger als bei anderen derzeit verfügbaren Techniken. Der Vorteil gegenüber den additiven Verfahren besteht hinsichtlich der Modellgröße. Bei der Fräsung von Geländemodellen können weitaus größere Formate konstruiert werden als beim schichtweisen Aufbau eines Modells. Die Qualität eines gefrästen Geländereiefs hängt abgesehen vom DGM auch vom verwendeten Material sowie von den verwendeten

Fräsköpfen und deren Ausrichtung als auch deren Fräsgeschwindigkeit ab. Im Normalfall wird das Modell in zwei bis drei Phasen gefräst. Zuerst wird mit einem größeren Fräskopf, ca. 20 mm Durchmesser, die grobe Form und Kontur des Modells abgetragen um anschließend mit immer kleiner werdenden Fräsköpfen einen höheren Detaillierungsgrad zu erreichen. Die Farbgebung muss in einem weiteren Arbeitsschritt erfolgen. Dies geschieht entweder händisch, mittels Airbrush-Technik, mit Hilfe von computergesteuerten Tintenstrahldüsen oder aber durch die (nicht dauerhafte) Projektion eines Bildes oder Videoanimation mittels Projektor. [vgl. BUC-07: 244] [CAL-01: 66f.] [HAH-12: 290] [RAS-12: 121f.] [RÄB-08: 190f.]

Mittels CNC-Fräse ist beispielsweise ein Relief von Dresden, welches mit einer zusätzlichen Videoinstallation bespielt wird, sowie ein geologisch bemaltes Relief der Glarner Alpen entstanden. Bei ersterem konnte eine Genauigkeit der Lage und Höhe von 1/100 mm erreicht werden. Wie in Abbildung 58 ersichtlich, handelt es sich bei dem eben vorgestellten Reliefmodell um ein sehr flaches Exemplar, weshalb eine Überhöhung um den Faktor vier vorgenommen wurde. [vgl. HAH-12]

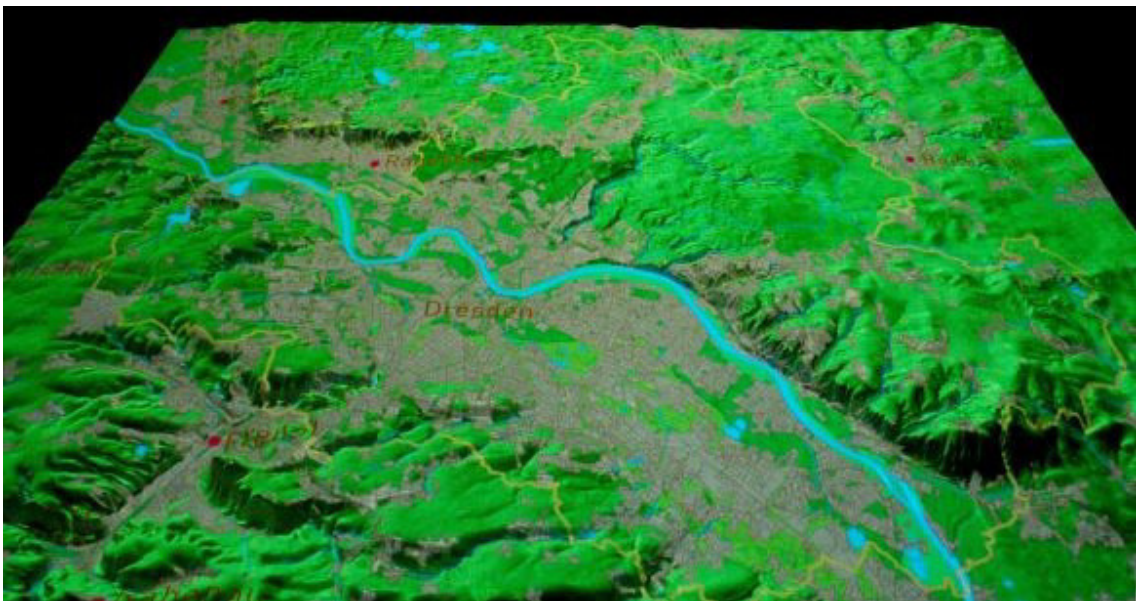


Abbildung 58: Reliefmodell von Dresden im Maßstab 1:16.250, 2 x 1,5 m, Fertigstellung 2006, Thomas Hahmann in Kooperation mit dem Stadtmuseum Dresden und der TU Dresden. Das Relief wurde für die Ausstellung „Dresden macht Geschichte“ zum 800jährige Jubiläum der erstmaligen Erwähnung der Stadt Dresden konstruiert. Die Videoanimation über die Entwicklung Dresdens seit dem Jahr 8000 v. Chr. bis heute wird über einen Projektor mit Hilfe eines zusätzlichen Spiegels auf das Modell projiziert. [HAH-12] [sta-11]

Da Dresden bekannterweise nicht in den Alpen und schon gar nicht im Hochgebirge liegt, stellt das Modell der Glarner Alpen ein etwas adäquateres Beispiel für ein CNC gefrästes Modell im Rahmen dieser Arbeit dar. Das Dresden-Modell soll dem Leser aber insofern nicht vorenthalten werden, da es nicht nur durch ein digitales Verfahren entstanden, sondern auch durch eine digitale bzw. animierte Farbgebung glänzt. Außerdem ist es nach Hahmann [2012: 292] doch weltweit eines der ersten Reliefs dieser (rein digitalen) Art.

Aber auch das Relief der Glarner Alpen hat etwas Besonderes zu bieten. Es stellt eine Ergänzung zu einem bereits bestehenden manuell erstellten Geländemodell aus dem Jahr 1911 von Jakob Oberholzer dar (siehe Abbildung 6). Die neu erstellten Teile wurden mittels CNC-Maschine gefräst und von Toni Mair händisch koloriert. Es ist gesamt 5 m lang und 70 cm breit (inkl. des Reliefs von 1911) und bildet einen Teil der Alpen, im Norden durch den Bodensee und im Süden durch das Po-Tal begrenzt, ab. Der Maßstab beträgt 1:50.000. Das Projekt ist im Zuge der „FocusTerra“ Ausstellung (Eröffnung 2009) an der ETH Zürich entstanden. Die verwendete CNC-Fräse hat einen Bauraum von 2,4 x 1,5 m mit einer maximalen Z-Ausdehnung von 25 cm. Das Relief wurde in vier Teilstücken gefräst. Jeweils in drei Phasen. Bei der ersten Phase kam ein Kugelfräskopf mit 12 mm Durchmesser zum Einsatz welcher ein Stufenrelief als Ergebnis hervorbrachte. In einem zweiten Schritt wurden die Stufen geglättet um abschließend mit einem 3 mm Fräskopf einen feineren Detaillierungsgrad zu erreichen (siehe Abbildungen 59 & 60). [vgl. RÄB-08]

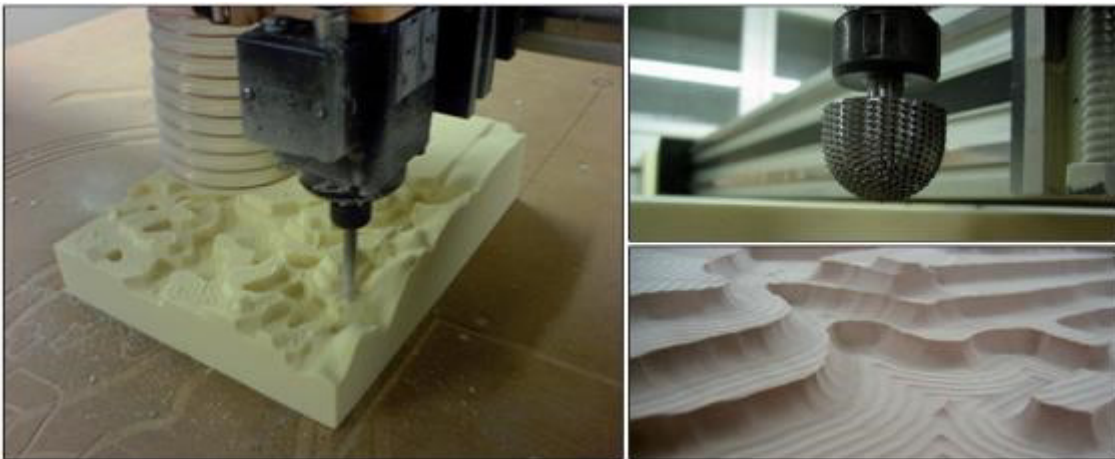


Abbildung 59: Testfräsung mit einer CNC-Maschine des Raplab der ETH Zürich (links), Kugelfräskopf einer CNC-Maschine (rechts oben), Geländereief nach der ersten Bearbeitungsphase [RÄB-08: 192]



Abbildung 60: Relief der Glarner Alpen von Jakob Oberholzer (vorne) samt CNC-gefrästem Prototypen (hinten) [RÄB-08: 192]



Auch die Firma Solid Terrain Modeling (STM) in den USA erstellt Landschaftsmodelle mittels CNC-Fräse. Als Material dient ein Block aus Polyurethanschaum. Das Besondere an dem Herstellungsverfahren von STM ist, dass ein eigens entwickelter Drucker den Farbauftrag übernimmt. Es können sowohl Satelliten- als auch Luftbilder oder andere Bilder sowie Karten, Graphiken oder Texte in Farbe aufgetragen werden. Der Farbauftrag geschieht mit mehreren CNC gesteuerten Tintenstrahldüsen, wodurch der Kolorationsprozess im Vergleich zum händischen Farbauftrag stark beschleunigt wird (siehe Abbildung 61). [vgl. stm-13a]



Abbildung 61: CNC gefrästes Modell vom Mt. Everest der Firma Solid Terrain Modeling während dem Farbauftrag mittels Tintenstrahldüsen [stm-13b]

Nach langer und ausgiebiger Recherche im Rahmen der vorliegenden Arbeit, muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass subtraktive Herstellungsmethoden mittels CNC-Fräse hauptsächlich Geländereliefs in mittleren und kleinen Maßstäben hervorbringen. Modelle alpiner Räume mit Maßstäben von 1:10.000 oder größer findet man so gut wie keine vor. Weshalb die Schlussfolgerung naheliegt, dass sich subtraktive Herstellungsverfahren im Reliefbau eher für flachere als hochalpine Gebiete eignen. Das größere Potential im Reliefbau haben nach Rase [2012: 122] die additive Verfahren im Vergleich zu den subtraktiven und formativen Verfahren.

### 5.3.3 Formative Verfahren

Digitale formative Verfahren stellen quasi eine moderne Variante bzw. Weiterentwicklung des Wenschowschen Prägeverfahren dar. Die Prägeform wird mit Hilfe einer CNC-Fräse hergestellt. Anschließend kommt es durch Hitze, Vakuum oder Druck zur Thermoformung von farbig bedruckten Folien. Auf diese Weise kann eine große Anzahl an Exemplaren zu einem moderaten Preis hergestellt werden. Das Ergebnis sind allerdings wieder Kartenreliefs und keine großmaßstäbigen Geländereiefs alpiner Gegenden. Abbildung 8 zeigt ein solches Kartenrelief von der Firma Georelief in Dresden erstellt. Dieses wurde mittels CNC-Maschine aus einem Kunstharzblock als Prägeform gefräst. Anschließend wurde eine Kunststofffolie durch ein Vakuum-Tiefziehverfahren zu einem Kartenrelief geformt.

### 5.4 Weitere Herstellungsverfahren

Neben den eben vorgestellten analogen und digitalen Herstellungsverfahren, gibt es noch einige andere Methoden um mehr oder weniger brauchbare qualitative dreidimensionale Landschaftsmodelle zu erstellen. Eine viel versprechende Methode bzw. einen völlig neuen Ansatz hat das Brüderpaar Johann und Jürnjakob Dugge entwickelt. Sie kleben Papierdreiecke zu Bergmodellen, so genannten Papercraft Mountains, zusammen. Allerdings bedingt es dabei einiger digitaler Vorarbeiten. Als Datengrundlage dient ein DGM, welches als TIN konvertiert wird. Anschließend wird eine Textur darübergelegt, wie etwa eine topographische Karte oder ein Luftbild. Das Dreiecksnetz wird auf dem Computer zu einer 2D-Darstellung entfaltet, Laschen für den Auftrag von Klebstoff angefügt und auf Papier ausgedruckt. Die Vorlage kann entlang der Dreiecke ausgeschnitten und zu einem 3D Modell zusammengeklebt werden (siehe Abbildung 62). Auf der Homepage „[www.papercraftmountains.com](http://www.papercraftmountains.com)“ können die Vorlagen bestellt werden. Aktuell sind der Mount St. Helens, Mount Fuji, Uluru und das Matterhorn verfügbar. An dieser Stelle darf auch auf das Paper der beiden, „A Method for Creating Papercraft Raised Relief Maps“ aus dem Jahr 2017, hingewiesen werden, in dem die Details zum Arbeitsablauf sowie Anforderungen an die Daten erläutert werden. [vgl. DUG-17]

Es gibt auch immer wieder Versuche dreidimensionale Landschaftsmodelle aus Glas herzustellen. Aus einem Block aus dem Spezialglas „Corning Glas“ wird durch UV-Strahlung jener Teil weggeätzt, der nicht zum Modell gehört. Dies geschieht wieder auf Basis der einzelnen Höhenschichtlinien. Jene Bereiche die später das Relief darstellen sollen, müssen allerdings vor der Einwirkung des UV-Lichtes geschützt werden. [vgl. MÜH-65b: 27]

Aber auch mit Hilfe eines Lasers kann eine Abbildung eines Landschaftsmodelles erzeugt werden. Ein computergesteuerter Laserstrahl graviert winzig kleine Punkte entsprechend eines digitalen Datensatzes wie etwa einer 3D-Punktwolke in einen Glasblock. Dort wo der Laser das Glas trifft, schmilzt es und wird milchig undurchsichtig. Durch verschiedene



Blickwinkel wirkt der dargestellte Landschaftsausschnitt dreidimensional (siehe Abbildung 63). [vgl. MAI-06: 73; RAS-12: 125f.]

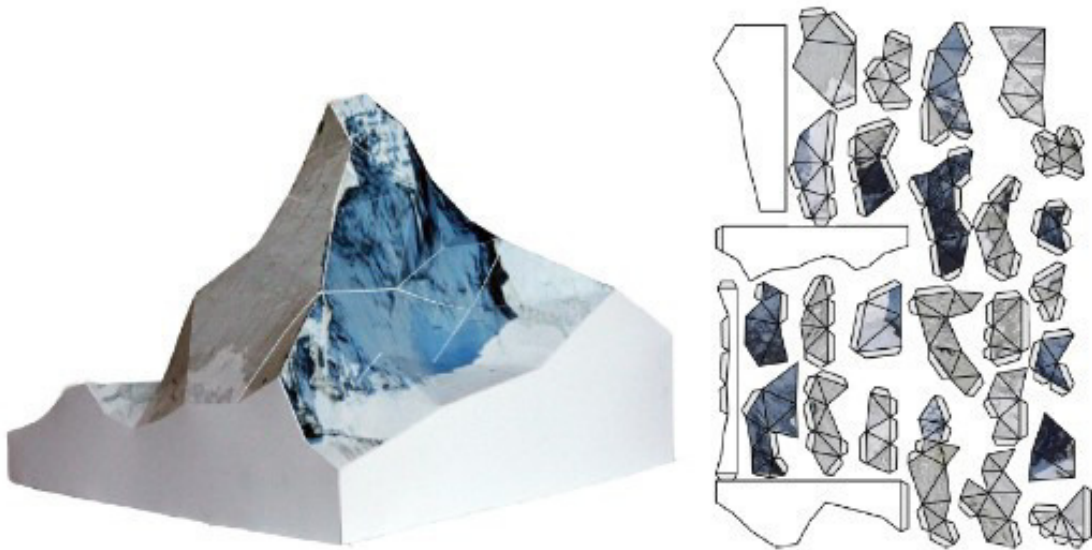


Abbildung 62: Papercraft Mountains – Matterhorn im Maßstab 1:15.000, Maße 112 x 133 x 133 mm [DUG-17]



Abbildung 63: Graviertes Laserstrahlrelief in Glas [RAS-12: 127]

Es müssen aber nicht immer nur industrielle Werkstoffe verarbeitet werden. In der Schweiz lässt etwa ein Geographielehrer Geländereiefs aus Schokolade produzieren. Als Datengrundlage für seine „regioreiefs“ dient das DHM 25 der Schweizerischen

Landestopographie. Auf Basis dieser Daten wird ein Urrelief mittels Fräsmaschine hergestellt und anschließend mehrere Gießformen davon produziert. Die abgegossenen Schokoreliefs werden in einer transparenten Kiste, die mit bestimmten Ortsnamen oder auch Gewässern bedruckt ist, verpackt. Es werden verschiedene Regionen der Schweiz im Maßstab 1:100.000 bis 1:400.000 als Relief angeboten und jeweils von einer lokalen Konditorei hergestellt (siehe Abbildung 64). [vgl. reg-13a]

Es gibt also eine Vielzahl als Herstellungsverfahren, die sich jeweils anderer Datengrundlagen, Maschinen, Werkzeuge und Techniken bedienen und somit für unterschiedliche Zwecke bzw. Maßstäbe und Landschaftsformen geeignet sind. Manche Verfahren bringen gute und weniger gute Geländemodelle zum Vorschein. Einige beispielhaft ausgewählte Exemplare werden im folgenden Kapitel analysiert.

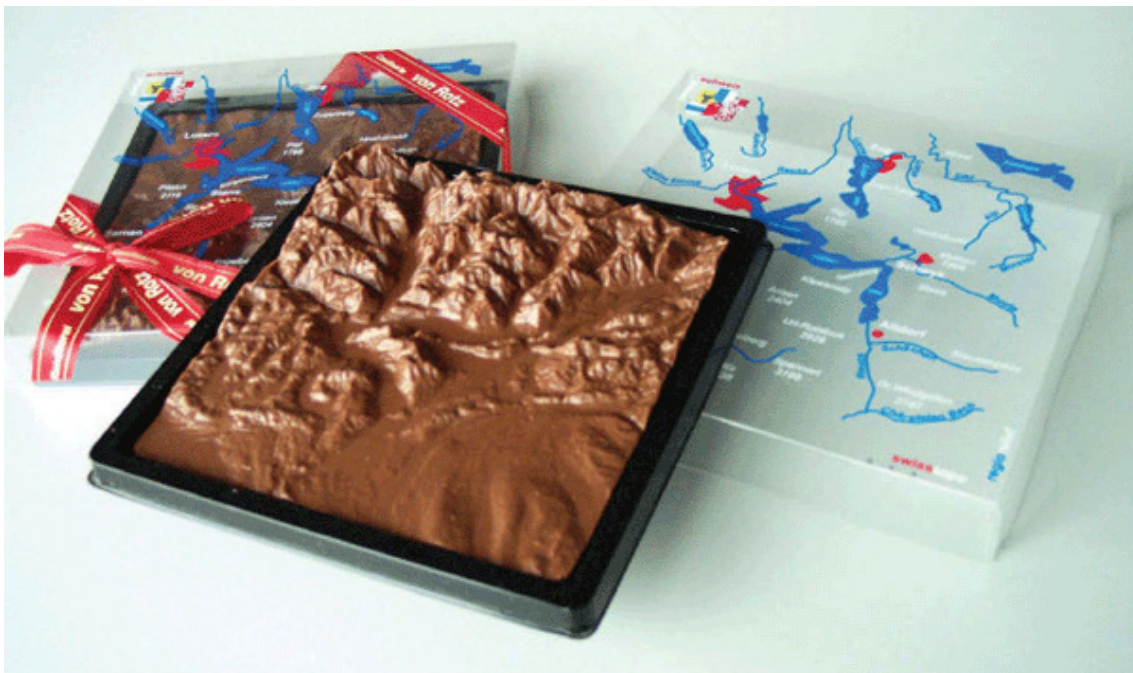


Abbildung 64: „Regiorelief“ der Zentralschweiz aus Schokolade von Ueli Häusermann im Maßstab 1:400.000 [reg-13b]

## 6 Analyse der Geländemodelle

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse beispielhaft ausgewählter Geländereliefs. Es werden drei Modelle von verschiedenen Reliefbauern analysiert. Als erstes wird ein historisches Geländerelief aus dem 16. Jahrhundert herangezogen. Es zählt als das älteste noch erhaltene Landschaftsmodell der Alpen und ist daher von besonderer Bedeutung. Das zweite zu analysierende Relief entstammt aus der Hochblüte des Reliefbaues im 19. Jahrhundert und wurde von einem der besten, wenn nicht sogar dem besten Reliefbauer hergestellt. Daran anschließend soll ein Geländerelief, welches mit Hilfe von digitalen Geodaten und rein computergestützt generiert wurde, analysiert werden. Dabei wird unter anderem auf folgende Merkmale geachtet: Herstellungsverfahren, Datengrundlage, Material, Inhalt, Detaillierungsgrad, Farbgebung, etc. Um die Genauigkeit der Geometrie und Topologie der einzelnen Reliefs zu bestimmen bzw. zu vergleichen, etwa mit aktuellem Kartenmaterial oder Orthofotos, bedarf es sehr zeitaufwendigen und exakten photogrammetrischen Aufnahme jedes Reliefs sowie digitalen Auswertungen der Bilder mittels geeigneter Software. Jana Niederöst hat wie bereits oben erwähnt, im Rahmen ihrer Dissertation das Relief der Urschweiz aus dem 18. Jahrhundert auf diese Weise analysiert. Ihre angewandte Methode, die prinzipiell auch auf andere Geländemodelle übertragen werden kann, kann in ihrer Dissertation nachgelesen werden (siehe NIE-05). Im Rahmen dieser Arbeit würde die Vermessung und Auswertung der photogrammetrischen Aufnahmen von drei verschiedenen Modellen unterschiedlicher Herstellungsverfahren und Datengrundlagen den Rahmen sprengen. Daher findet eine rein deskriptive Analyse statt.

### 6.1 Das Relief des Wettersteingebirges

Das älteste noch erhaltene Geländerelief im alpinen Raum ist ein Modell vom Wettersteingebirge an der Grenze zwischen Bayern und Tirol. Es dürfte um das Jahr 1540 von Paul Dax erstellt worden sein und bildet die Landschaft von der Zugspitze bis zum Ferchensee ab. Es weist einen ungefähren Maßstab von 1:10.000 auf und hat an der breitesten Stelle die Maße 170 x 70 cm (siehe Abbildung 13). Es befindet sich in der zurzeit nicht öffentlich zugänglichen Sammlung des Alpenvereins Museum in Innsbruck. [vgl. ZEM-86: 28] [his-16].

Das Geländemodell ist durch die Methode der Holzschnitzerei entstanden. Als Datengrundlage dienten eigens aufgenommene Vermessungsunterlagen. Nach Gyax [1937: 14] weisen die Hauptgebirgszüge, die durch gerundete wallartige Erhebungen dargestellt sind sowie die größeren Täler erstaunlich genaue Richtungsverhältnisse für die damalige Zeit auf. Die in Holz geschnitzten Geländeformen wurden mit einer gestärkten Leinwand überzogen. Als Befestigungsmaterial diente Leim. Anschließend wurde das überzogene Relief landschaftlich bemalt. Die Abbildungen 65-68 zeigen einige Detailaufnahmen des Wettersteinreliefs. Als Grundton dient ein helles Grün für die flacheren Gebirgsgegenden, während die höheren Gipfel hellbraun und -grau koloriert sind.

Vereinzelte kleine heller bzw. weiße Flächen an den höchsten Gipfeln weisen vermutlich auf Schnee und Eis hin. An den steileren Hängen erkennt man zum Teil die Struktur der Leinwand noch. An der hinteren Bergkette löst sich diese etwas vom Holzaufbau ab (siehe Abbildung 65). Der Wald wird von einzelnen plastischen Bäumen dargestellt. Diese sind aus Draht und vermutlich kolorierten Lehmkügelchen aufgebaut und in kleinen Löchern aufgestellt. Freie Löcher weisen auf den Verlust mancher Bäume hin. Die Baumkronen sind bräunlich oder grün gefärbt. Vereinzelte Bäume sind auch ohne Draht direkt an der Oberfläche des Reliefs befestigt. Des Weiteren sind vereinzelte plastische Nachbildungen von Häusern mit roten Dächern angebracht. Auf Papierstreifen wurden die Flur- und Bergnamen festgehalten und an der entsprechenden Position im Modell aufgeklebt (siehe Abbildung 66). Fluss- und Bachläufe sind bläulich aufgemalt. Die Leutschacher-Arche dürfte am Rande des Modells eingezeichnet sein (siehe Abbildung 67). An den Rändern des Geländemodells wurde der Querschnitt der Gebirgszüge rot-bräunlich koloriert um das Ton- und Mergelstein in diesem Gebiet darzustellen (siehe Abbildung 68). Der Detaillierungsgrad des Reliefs hält sich eher in Grenzen. Auf feingliedrige Modellierungen im Fels wurde verzichtet, stattdessen wurde versucht mittels Bemalung die Strukturen im Fels und Gelände wiederzugeben. Die Bäume wirken im Verhältnis zu den Bergen und Tälern etwas groß geraten. Nachdem nun ein Geländemodell welches mittels der Methode der Holzschnitzerei entstanden ist, analysiert wurde, wird im nächsten Kapitel ein Geländereief beschrieben welches auf einem geometrischen Grundgerüst basiert.



Abbildung 65: Ausschnitt Wettersteinrelief: Leinwand auf Holz ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823





Abbildung 66: Ausschnitt Wettersteinrelief: Drahtbäume, Flur- und Bergnamen auf Papierzettel, Häuser ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823



Abbildung 67: Ausschnitt Wettersteinrelief: Flussläufe ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823





Abbildung 68: Ausschnitt Wettersteinrelief: Querschnitt ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823

## 6.2 Das Matterhorn Relief

Einer der begabtesten, talentiertesten und meist gelobten Reliefbauer ist Xaver Imfeld. Daher darf an dieser Stelle eine seiner Reliefarbeiten nicht fehlen. Sein Geländemodell des Matterhorns stellte er im Jahr 1896 fertig. Als Datengrundlage dienten ihm, neben den Kartenblättern des Siegfried-Atlas, einige 100 Punkte die er trigonometrisch und photogrammetrisch genau bestimmt hatte. [vgl. GYG-37: 48] Er erstellte das Relief also auf Basis von Höhenlinien dar. Ein Treppenstufenmodell aus Karton diente ihm als geometrisches Grundgerüst. Seine zuvor eigens vermessenen Punkte markierte er auf dem Stufenmodell mit Metallstiften. Die grobe Form des Geländes modellierte er mit Kitt um im Anschluss die feineren Strukturen in Plastilin auszufertigen. Als Vorlage für seine Detailarbeit dienten ihm Zeichnungen sowie Fotos. Von diesem ersten Originalmodell fertigte er einen Gipsabguss an, welcher die feinsten Ausziselierungen enthalten sollte. Im Anschluss wurden von diesem zweiten Original mehrere Gipsabgüsse angefertigt und bemalt. [vgl. GYG-37: 48]

Einer dieser Abgüsse wurde im Jahr 1903 erstellt und ist im Besitz des Alpenvereinsmuseums in Innsbruck (Abbildung 69). Das Modell ist in einem Maßstab von 1:5.000 gebaut und hat die Außenmasse 96 x 140 cm. Ursprünglich baute Imfeld sein Modell um eine Bergbahn direkt auf das Matterhorn zu vermarkten. Später verkaufte er davon auch Briefbeschwerer in verkleinerter Form. Imfelds Lehrer, Albert Heim, bezeichnete das Matterhornrelief als „...einen Markstein in der Geschichte der Landestopographie“ [MAI-06: 44]. Nach Gygas [1937: 50] gehört das Relief sowohl in der Ausführung als auch in der Modellierung zu den genauesten und schönsten je erstellten Modellen.

Das Relief ist topographisch bemalt. Inhaltlich deckt es folgende Merkmale ab: Fels, Schnee und Eis, Wald und Wiese, schneefreie Gletscher und Moränen, Gewässerkörper sowie ein Gebäude. Bei genauerer Betrachtung des Reliefs fällt auf, dass nicht nur die Hütte plastisch dargestellt ist, sondern auch die Wälder im unteren Bereich des Modells. Diese werden von einzelnen Bäumen in Form von kleinen aufgesetzten Gipskugeln wiedergegeben und sind dunkelgrün lackiert. Das tiefer gelegene Gelände, wie Wiesen, wurde in einem helleren Grünton mit einem Braun- bzw. Gelbstich bemalt (Abbildung 70). Neben den Bäumen ist auch eine Hütte aus Gips aufgesetzt und braun eingefärbt. An dieser Stelle stehen auch heute noch die Seilbahnstation und eine Hütte. Gewässerkörper wurden blau koloriert. Nicht unweit der Hütte ist der Schwarzsee abgebildet. Die Gebirgsbäche sind in das Modell eingeritzt und ebenfalls blau bemalt (Abbildung 71).

Die Abbildungen 72 und 73 versuchen einen genaueren Eindruck über die naturnahe Wiedergabe dieses Geländeausschnittes zu vermitteln. Die Geländeformen und -kanten sind so prägnant und exakt ausgearbeitet, dass sie dem Betrachter fast entgegenspringen. Besonders in Abbildung 72 kommt der fließend gestaltete Gletscher samt Moräne im Vordergrund zur Geltung sowie die knapp oberhalb abgeschliffenen Felswände und der direkt daran anschließende feindetaillierte Fels samt Schneeüberhängen. Schneefreie Bereiche des Gletschers bzw. Moränen sind braun-violett wiedergegeben (siehe Abbildung 74). Gletscherspalten und Eisbrüche sind in den Gips geschabt und türkis-bläulich hervorgehoben (siehe Abbildung 75). Abbildung 73 zeigt die Gipfelpyramide samt Gletscher. Dieser sowie weitere Schneefelder wurden weiß mit einem Blau- bzw. Graustich lackiert. Durch die zum Teil eingeritzten Strukturen wirkt der Gletscher sehr natürlich. Die Farbgebung ist so gewählt, als würde man vom Flugzeug aus darauf blicken. Der Fels ist äußerst feingliederig strukturiert und bräunlich-violett, eher blass, eingefärbt. In der Gipfelregion sind die Grate detailliert ausmodelliert und überhängende Felswände ausgearbeitet. Auch Schnee- und Eisreste sind farblich markiert (siehe Abbildung 76). Nachdem nun ein Geländemodell welches auf Basis von Höhenlinien und somit einem geometrischen Grundgerüst manuell erstellt wurde, analysiert wurde, wird im nächsten Kapitel auf ein computergeneriertes Geländerelief eingegangen, welches mit Hilfe von digitalen Ausgangsdaten modelliert wurde.

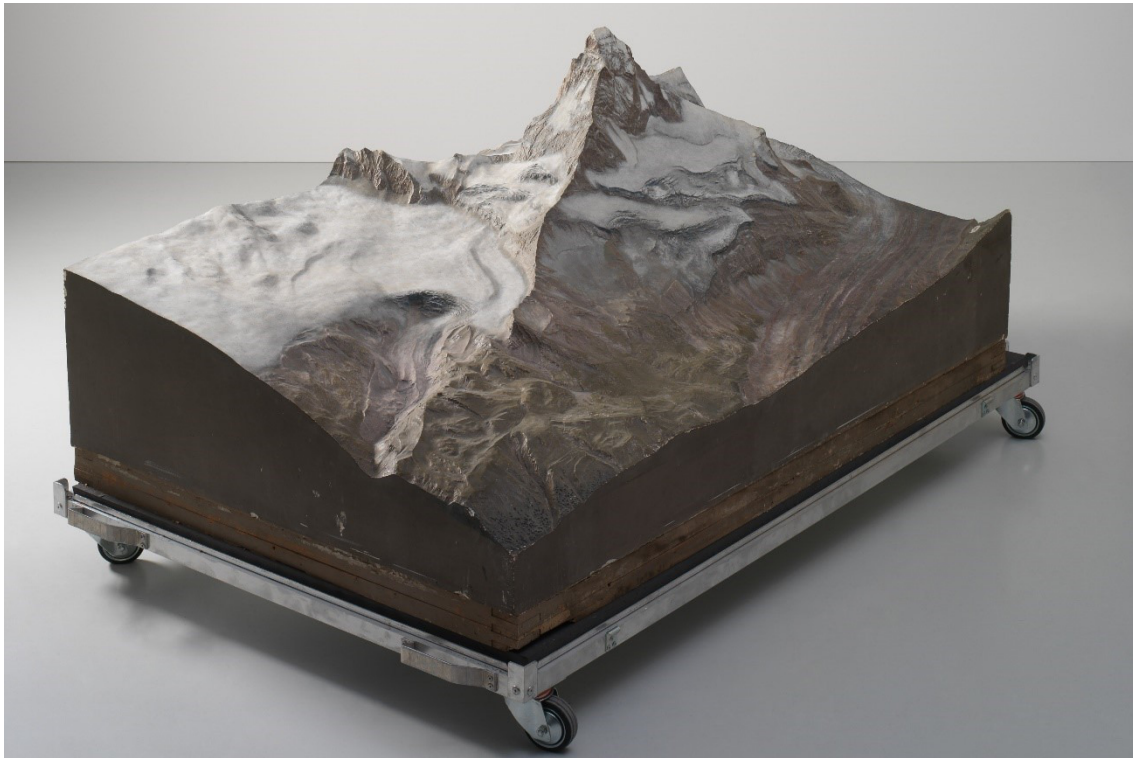


Abbildung 69: Imfeld Xaver, Matterhorn, Maßstab: 1:5.000, Relief, Technik: Gips, bemalt, 1903, Maße: 96 x 140,5 cm  
©Alpenverein-Museum, Österreichischer Alpenverein/2757



Abbildung 70: Detailaufnahme der Bäume aus Gips; eigene Aufnahme





Abbildung 71: Detailaufnahme der Hütte und Gewässer; eigene Aufnahme

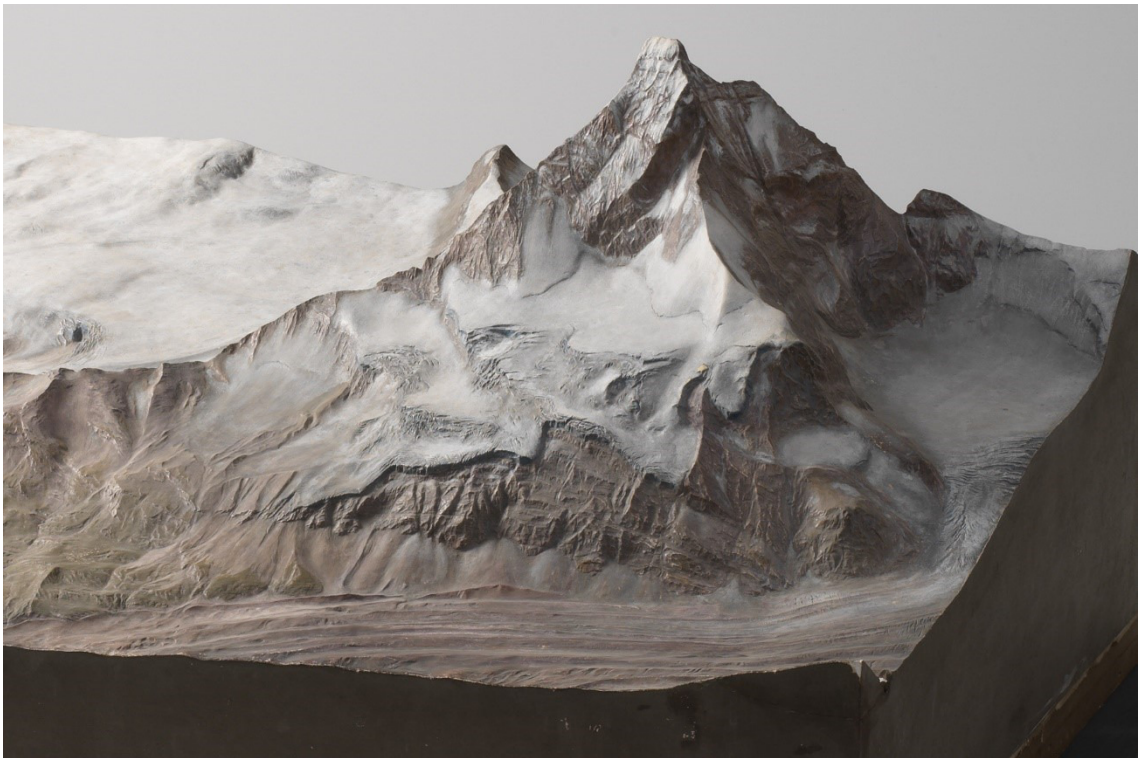


Abbildung 72: Ausschnitt mit südlicher Blickrichtung aus Imfeld Xaver, Matterhorn, Maßstab: 1:5.000, Relief, Technik: Gips, bemalt, 1903, Maße: 96 x 140,5 cm ©Alpenverein-Museum, Österreichischer Alpenverein/2757





Abbildung 73: Ausschnitt mit Blick auf den Hörnligrat aus Imfeld Xaver, Matterhorn, Maßstab: 1:5.000, Relief, Technik: Gips, bemalt, 1903, Maße: 96 x 140,5 cm ©Alpenverein-Museum, Österreichischer Alpenverein/2757



Abbildung 74: Detailaufnahme des fließenden Gletschers; eigene Aufnahme



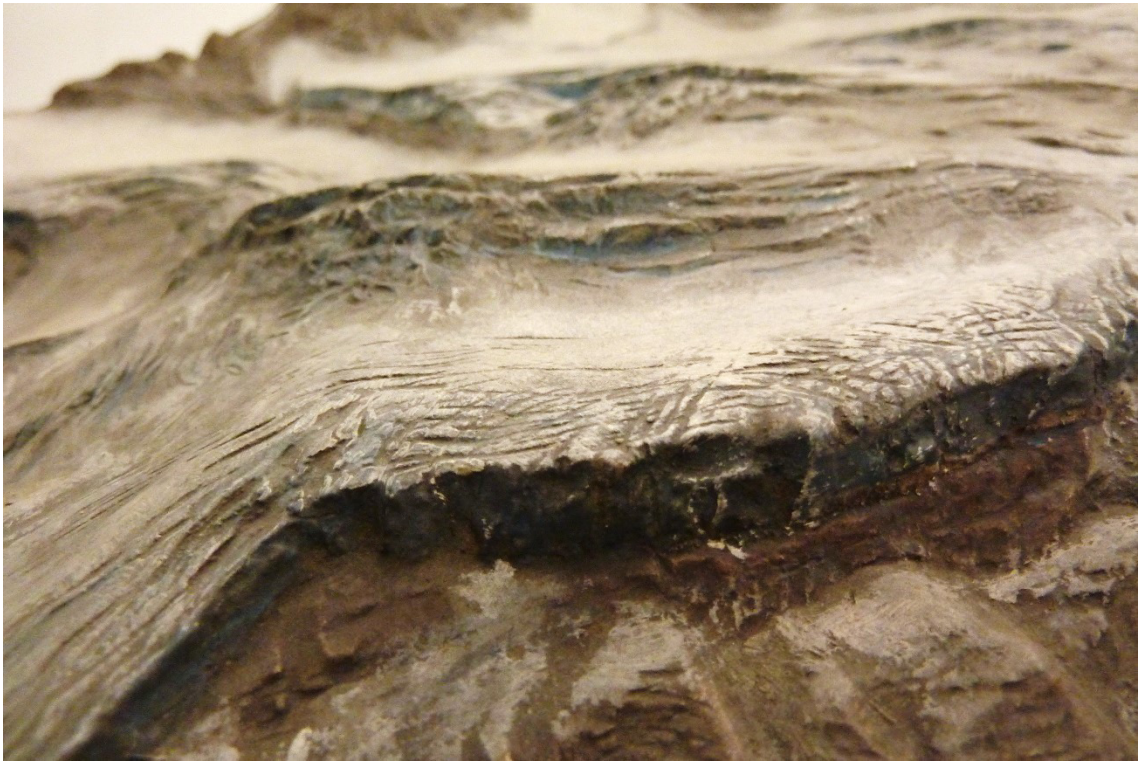


Abbildung 75: Detailaufnahme der Gletscherspalten, Eisbrüche und Felsen; eigene Aufnahme

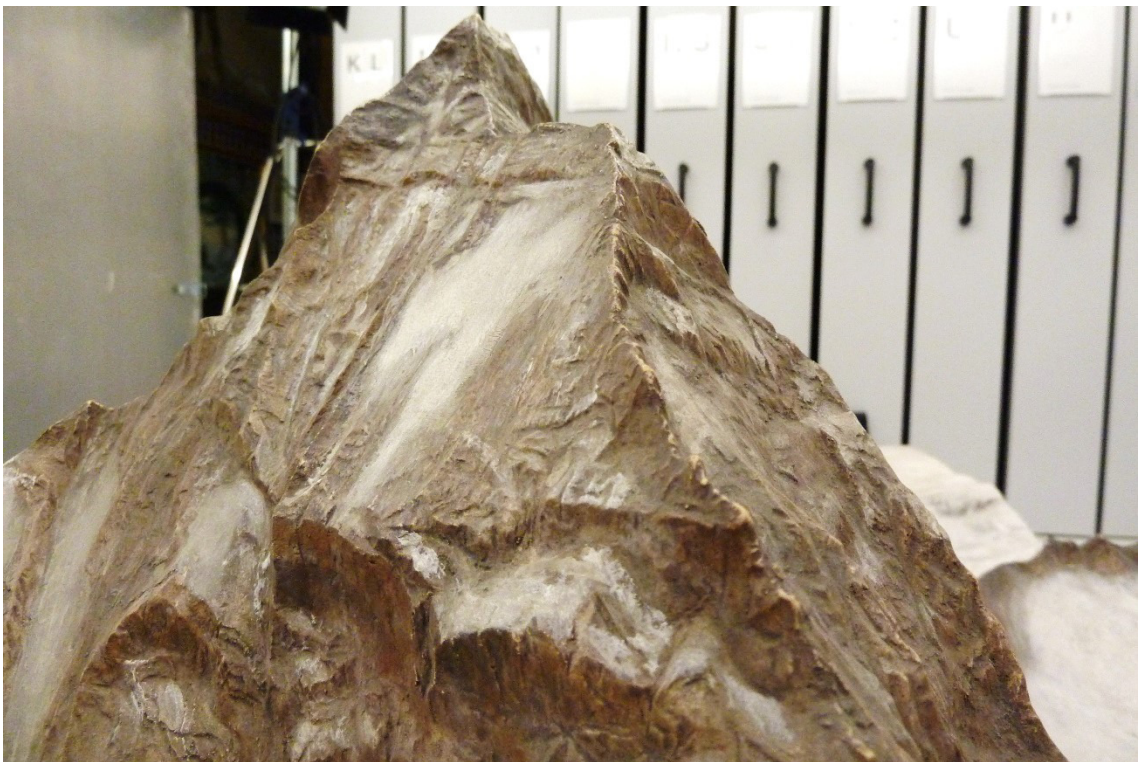


Abbildung 76: Detailaufnahme der Felsstrukturen in der Gipfelregion; eigene Aufnahme

### 6.3 Das Eiger Relief

Das dritte zu analysierende Geländerelief stellt den Eiger im Maßstab 1:12.500 dar (Abbildung 77). Es wurde mittels Rapid Prototyping Verfahren von Mika Semann im Rahmen seiner Diplomarbeit im Jahr 1998 an der Fachhochschule Karlsruhe angefertigt. Als Datengrundlage sollte ein Digitales Geländemodell (DGM) dienen. Dieses wurde mittels photogrammetrischer Auswertung von Luftbildern gewonnen. Rund 200.000 Punkte wurden auf den Luftbildern des Bundesamtes für Landestopographie, CH-Wabern, durch Stereoauswertung vermessen. Das so entstandene Punkteraster wurde zusammen mit detaillierten Gerippelinien und markanten Geländepunkten zu einem DGM verarbeitet. Einzelne Bereiche waren auf den Luftbildern nicht einsehbar, weshalb zusätzlich mit terrestrischen Aufnahmen gearbeitet werden musste. [vgl. SEM-98: 16] [SEM-99: 190]

Um das Relief „drucken“ zu können, musste das DGM über ein TIN und mit Hilfe eines Flächenrückführungsprogrammes (POMOS) in das STL-Format konvertiert werden. Der eigentliche Druckprozess nahm ca. 28 Stunden in Anspruch. Dabei kam das Verfahren der Stereolithographie zum Einsatz, wobei das Modell schichtweise aufgebaut wird, während der Werkstisch stufenweise abgesenkt wird. Als Baumaterial diente ein flüssiges Photopolymer, welches unter UV-Laserlicht aushärtet. Nachdem das Geländerelief fertig aufgebaut war, musste dieses in einem Ofen nachgehärtet werden, da das UV-Licht das Modell nur zu etwa 95% aushärtet. Das fertige Reliefmodell weist eine Schichtdicke von etwa 0,15 mm auf und hat die Außenmaße von 50 x 20 cm. Dies war zugleich auch der maximale Bauraum des Druckers. Dessen ungeachtet kann dieses Modell stellvertretend für ein computergeneriertes mittels additiver Fertigung erstelltes Geländerelief herangezogen werden, da auch heute - 20 Jahre später - die Stereolithographie nach wie vor dem gleichen Prinzip folgt und eine sichtbare Schichtdicke von etwa 0,1 mm als Ergebnis hervorbringt. Lediglich die Größe des Bauraumes des 3D-Druckers hat sich verändert bzw. weiterentwickelt und ermöglicht nun die Erstellung von weitaus größeren Werkstücken (siehe Seite 86). Die Auflösung des Reliefs ist prinzipiell abhängig von den Ausgangsdaten, dem Maßstab und der Größe des Modells sowie dem Drucker. [vgl. SEM-98: 28] [SEM-99: 187ff.]

Abbildung 51 zeigt das ausgehärtet Rohmodell. Die Schichten und wabenartigen Strukturen (Abbildung 78) sind deutlich sichtbar. Den einzigen manuellen Arbeitsschritt bei diesem computergenerierten Geländemodell stellt die abschließende Farbgebung dar. Erst durch die manuelle Lackierung werden die wabenartigen Strukturen in den Hintergrund gedrängt und lediglich die Schichtdicke von 0,15 mm bleibt als Querstruktur vor allem in den Felsbereichen sichtbar (Abbildung 79). Der Fels wurde grau und Schneeflächen weiß lackiert. Hütten, Wege, Kletterrouten oder sonstige menschliche Artefakte sind nicht dargestellt, lediglich die Geländeformen die das DGM beinhaltet. Kleinformen sind maßstabsbedingt ab einer Größe von 5 - 8 m abgebildet. Da bereits bei der photogrammetrischen Auswertung der Gletscherflächen verhältnismäßig nur wenige Punkte gemessen werden konnten, mussten diese beim Aufbau des DGM interpoliert werden, was auf dem fertigen Modell



auch deutlich zu sehen ist. In Abbildung 79 sind die weißen Schnee- und Gletscherflächen als Dreiecksnetz zu erkennen. Aber auch bei fast senkrechtem Gelände bzw. in den Felswänden weist dieses Verfahren weniger Details als in etwas flacherem Gelände auf (siehe Abbildung 80, Bildmitte links). Einzelne Felspartien wirken stark generalisiert, dafür entspricht die Geometrie des Modells exakt jener des DGMs. Die Geometrie ist also nicht von weiteren Generalisierungsmaßnahmen die im Zuge der Ableitung von Höhenlinien entstehen könnten, abhängig. [vgl. SEM-98: 28] [SEM-99: 187ff.]

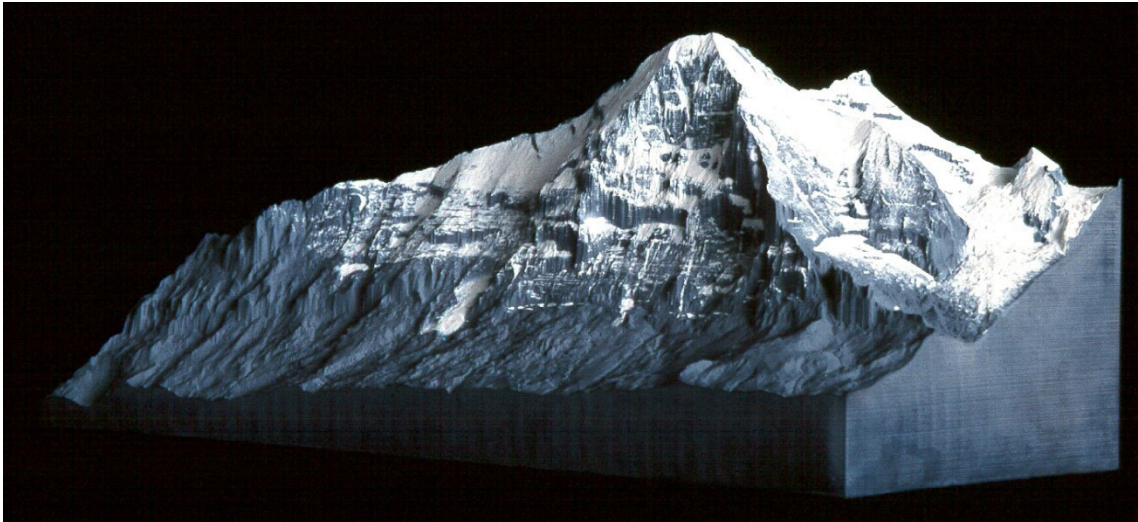


Abbildung 77: Eiger von Mika Semann im Maßstab: 1:12.500, 1998, Maße: 50 x 20 cm; ©Mika Semann

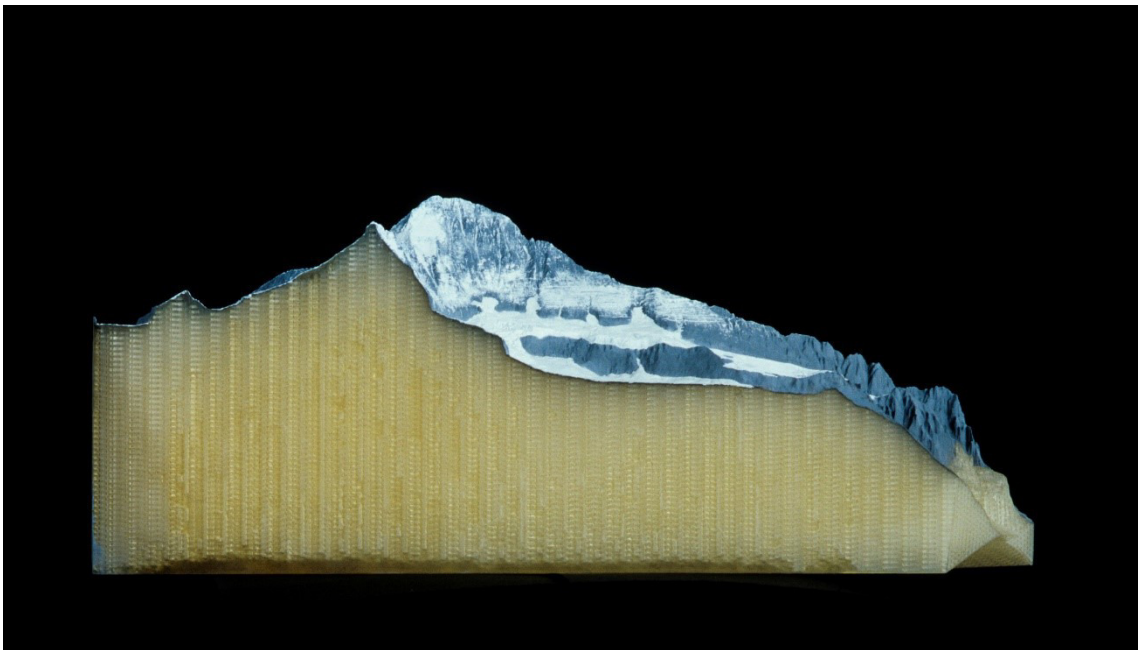


Abbildung 78: Wabenartige Strukturen im Inneren des Reliefs, Seitenansicht; ©Mika Semann



Abbildung 79: Sichtbare Querstrukturen im Felsen als Artefakte der additiven Fertigung (Zündholz als Größenvergleich); ©Mika Semann



Abbildung 80: Stark generalisierte senkrechte Felswände (Zündholz als Größenvergleich) ©Mika Semann

---

## 7 Diskussion der Ergebnisse

Nachdem nun die Vorstellung der verschiedenen Herstellungsverfahren und die deskriptive Analyse der Geländereliefs abgeschlossen ist, soll auf den folgenden Seiten eine Gegenüberstellung respektive ein Vergleich der Verfahren unter Einbeziehung der analysierten Modelle stattfinden. Es werden die Vor- und Nachteile der Verfahren anhand der Modellbeispiele, mit dem Versuch das aktuell am besten geeignete Verfahren ausfindig zu machen, um in weiterer Folge die Forschungs- und Arbeitsfragen beantworten zu können, herausgearbeitet.

### 7.1 Gegenüberstellung der Herstellungsverfahren

Vergleicht man zunächst die verschiedenen Herstellungsverfahren hinsichtlich ihrer historischen Entwicklung, so haben sich die manuellen Verfahren am längsten gehalten. Allen voran die Modellierung auf Basis von Höhenlinien, die seit dem Ende des 19. Jahrhunderts bis heute Anwendung findet. Maschinelle Verfahren, die vorwiegend abtragender Natur sind, kamen vor allem in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zum Einsatz und wurden unter anderem eingeführt, um den manuellen Reliefbau zu beschleunigen, werden aber heute nicht mehr angewandt. Als Nachfolger dieser maschinellen Herstellungstechniken können die digitale Verfahren angesehen werden, die etwa seit den 1980er Jahren (mit dem Aufkommen von DGMs) zum Einsatz kommen. Subtraktive digitale Verfahren entsprechen vom Prinzip her den maschinellen abtragenden Techniken. Der Fräskopf wird aber statt von Hand entlang der Höhenlinien geleitet per CNC-Maschine entsprechend der Daten des DGMs geführt.

Auch wenn maschinelle Verfahren heute nicht mehr zum Einsatz kommen, da sie von den digitalen Verfahren abgelöst wurden, begründete Rathjens (1887-1966) [vgl. car-18] damals die Einführung maschineller Verfahren und vor allem jenes von Wenschow damit, dass „... bei diesem Verfahren (Anmerkung: Modellierung auf Basis von Höhenlinien) durch die Ungleichheit und Unvollkommenheit des Materials sowie durch die individuelle Auffassung der Handarbeit keine exakte Wiedergabe des dargestellten Geländes nach der Kartenvorlage gewährleistet war. Das Relief gab bisher nicht in völliger Naturtreue das Gelände wieder, sondern veranschaulichte mehr oder minder die individuelle Auffassung des Herstellers von den einzelnen Geländeformen [RAT-22: 4].“ Er stellte indirekt fest, dass ein Relief in erster Linie der Kartenvorlage zu entsprechen habe.

Dem widerspricht Mair vehement und möchte sich von früheren Reliefbauern unterscheiden. Er ist der Meinung, dass „...die meisten alten Reliefs im Prinzip modellierte dreidimensionale Karten sind [MAI-06: 104].“ Für ihn ist der Reliefbau „...keineswegs eine sture, fantasielose Angelegenheit, die lediglich aus Kopieren und Verkleinern besteht. Es gibt große Freiräume [MAI-06: 106].“ Vor allem was die Bemalung und künstlerische Oberflächengestaltung angeht. Bereits ab einem Maßstab von 1:25.000 müsse der Wald



plastisch erscheinen, etwa durch den Auftrag von gefärbtem Sand. Eine reine Kartenkopie auf ein Relief zu kleben, wäre für Mair also zu wenig. [vgl. MAI-06: 107] Er verteidigt den manuellen Reliefbau gegenüber dem maschinellen und die mit dieser Technik hergestellten Kartenreliefs. Geht es den Befürwortern der maschinellen Verfahren vor allem um Genauigkeit, Zeitersparnis und Kostenminimierung, so steht für Mair als überzeugter manueller Reliefbauer vor allem die detailverliebte Nachbildung und naturgetreue Farbgebung, die Ausarbeitung morphologischer Feinheiten sowie das künstlerische Endergebnis im Vordergrund bzw. an erster Stelle im Gegensatz zur plumpen Übertragung einer Karte ins dreidimensionale. [vgl. FEL-22: 231] [RAT-22: 4] [MAI-12: 416ff.] Außerdem dürfte die Konstruktion und der Bau einer Reliefschneidemaschine zu viel Zeit in Anspruch nehmen. [vgl. IMH-81: 145]

Auch über den digitalen computergestützten Reliefbau spart Mair nicht mit Kritik. Wie Eingangs bereits erwähnt ist er der Meinung, dass der Mensch der Maschine überlegen ist. Er vergleicht den Reliefbau mit der Produktion von Musikinstrumenten: wertvolle Geigen und Flügel werden von Hand gefertigt, nur die Massenware wird maschinell bzw. digital produziert. Computergenerierte Reliefs beschreibt er als leblose Landschaftsabbildungen. Er sieht auch die landläufige Auffassung, dass der Computer genauer arbeitet als der Reliefbauer als fatalen Irrtum an, da dem PC das Gefühl für die eben angesprochenen Details und Feinheiten fehlt. Diese Informationen sind seiner Meinung nach nicht in GIS-Daten bzw. DGMs enthalten. Eine Siedlung nur als roten Farbpunkt abzudrucken ist für ihn zu wenig. Gebäude müsse man dem Maßstab entsprechend plastisch abbilden. [vgl. MAI-12: 416ff.]

Dies führt zum nächsten Vergleich - der Gegenüberstellung der Ausgangsdaten. Bei allen drei Gruppen (manuell, maschinell, digital) dienen wie nicht anders zu erwarten Lage- und Höhendaten des Geländes als Grundlage. Bei den historischen manuellen Verfahren, wie etwa bei der Modellierung durch Holzschnitzerei oder mit Hilfe von Fixpunkten, die in dieser Art beide heute nicht mehr zum Einsatz kommen, wurden die Höhenwerte durch terrestrische Vermessungsarbeiten im Feld aufgenommen. Ebenso wie bei der Modellierung basierend auf Höhenlinien. Da diese Technik seit knapp zwei Jahrhunderten Anwendung findet, werden die Höhendaten immer entsprechend dem aktuellen Stand der Technik aufgenommen. Von terrestrischen Vermessungen, über photogrammetrische Aufnahmen mit anschließender Stereoauswertung bis hin zur Aufnahme mittels GPS. Dies gilt auch für die maschinellen Verfahren, da diese ebenfalls auf Höhenlinien beruhen. In beiden Fällen (manuell und maschinell) kann der Reliefbauer die benötigten Höhenlinien aus topographischen Karten beziehen. Diese sind im Hinblick auf ein lesbares und übersichtliches Kartenbild allerdings oftmals bereits generalisiert.

Bei den digitalen Verfahren werden hingegen DGMs benötigt. Diese können durch Digitalisierung von Höhenlinien, durch terrestrische Vermessung oder durch photogrammetrische Auswertung von Luft- oder Satellitenbildern gewonnen werden. Bei ersterem ist davon auszugehen, dass das DGM auf bereits zuvor generalisierten Daten, wie etwa Höhenlinien, beruht. Bei aktuellen Datensätzen, die zum Beispiel durch

Satellitenbilddauswertung generiert wurden, entfällt zumindest eine Generalisierungsstufe (jene der Höhenlinien). Es kann also davon ausgegangen werden, dass die auf aktuellen DGMs, wie etwa SRTM-Daten, basierenden Geländereliefs eine höhere geometrische Genauigkeit aufweisen.

Beim Herstellungsprozess entfallen bei der digitalen Erstellung im Gegensatz zur manuellen mögliche Fehlerquellen. Diese könnten beispielsweise bei der Markierung und Übertragung der Höhenlinien auf die Spannplatten auftreten oder aber auch beim Aussägen entlang der Höhenschichten. Der Nachteil bei den digitalen Verfahren liegt darin, dass man einen Fehler im Datensatz erst im fertig gedruckten oder gefrästen Modell sieht. Hingegen können bei der manuellen Fertigung einzelne fehlerhafte Höhenschichten jederzeit ausgetauscht oder nachbearbeitet werden. Außerdem bedarf es bei der manuellen Herstellung keiner teuren Geräte. Für die digitale additive Erstellung sind ein Computer sowie die entsprechende Software unabdingbar. Den kostspieligsten Part übernimmt hierbei aber der 3D-Drucker. Die Preise für die Hardware können bis in den sechsstelligen Bereich heranwachsen. Wenn also in der Literatur zu lesen ist, dass der computergestützte Reliefbau kostengünstiger und effizienter sei als die manuelle Herstellung, dann bezieht sich dies wohl auf die Auslagerung des 3D-Drucks an ein Druckunternehmen. Mittlerweile gibt es schon einige Anbieter, die kostengünstige 3D-Drucke ermöglichen. Die Kosten für einen eigens angeschafften 3D-Drucker amortisieren sich aber wohl erst bei der seriellen Erstellung bzw. nach mehreren Großaufträgen.

Neben dem finanziellen Aufwand im digitalen Reliefbau stellt auch die Größe des Bauraums in gewisser Art eine Limitierung dar. Diese kann aber durch die Anfertigung von Teilstücken umgangen werden. Im manuellen Reliefbau ist die Größe der Geländemodelle lediglich vom Gewicht des fertigen Reliefs abhängig. Da Gips recht schwer ist, wird durch umgießen der Modelle in Hohlformen versucht das Eigengewicht zu reduzieren. Um den Transport und Aufbau der Modelle zu erleichtern, werden aber auch im manuellen Reliefbau oftmals Teilstücke erstellt, die dann am Ausstellungsort zu einem Ganzen zusammengefügt werden. Der Vorteil der digitalen Verfahren besteht hinsichtlich des verwendeten Materials. Die leichten Kunststoff Reliefs können auf Grund ihres geringen Gewichtes einfacher transportiert werden.

Unabhängig vom Baumaterial, allerdings abhängig von der Maschine, ist die Schichtdicke der mittels digitaler additiver Verfahren erstellten Modelle. Diese liegt je nach Herstellungsverfahren aktuell zwischen 0,06 und 0,25 mm. Damit liegt das von Semann mittels Stereolithographie erstellte Eiger-Relief mit einer Schichtdicke von 0,15 mm aus dem Jahr 1998 im Mittel. Ein etwas aktuellerer von Pusch in Auftrag gegebener 3D-Druck des Matterhorns und mittels FDM-Technologie ausgeführter Probedruck weist ebenfalls sichtbare Schichtdicken auf (siehe Abbildung 81).

Beim digitalen subtraktiven Herstellungsprozess sind die Bearbeitungsspuren der Maschine ebenfalls am fertigen Modell sichtbar. Im Vergleich zu den additiven Verfahren können aber

größere Modelle in einem Stück erzeugt werden. Allerdings ist die klassische 3-achsige CNC-Fräse nur in der Lage 2,5D Modelle ohne Überhänge zu erstellen. Um echte 3D Modelle samt Überhängen abbilden zu können, muss die Fräse mehr als fünf Achsen aufweisen, wodurch der Herstellungsprozess weitaus zeitintensiver und kostspieliger als bei den aufbauenden Techniken wird. Im manuellen Reliefbau sind der Gestaltung der Morphologie keine Grenzen gesetzt. Kleinste noch so steile Überhänge können je nach Können bzw. Fähigkeit des Reliefbauers ausmodelliert werden.

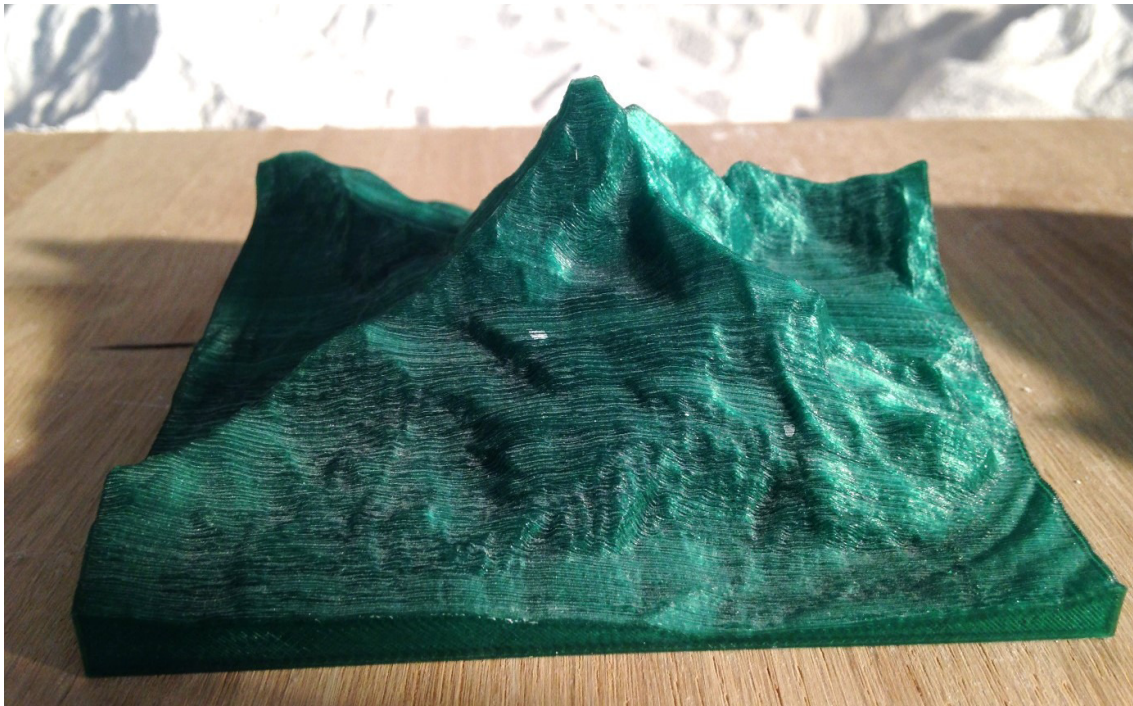


Abbildung 81: FDM-Druck des Matterhorns von Wolfgang Pusch im Maßstab 1:50.000, Maße: 10 x 10 cm; eigene Aufnahme

Das fertige computergenerierte Geländereief weist in den meisten Fällen eine einfärbige Farbgebung je nach verwendetem Baumaterial auf. Somit müsste es händisch koloriert werden um eine naturtreue und charakteristische Bemalung zu erhalten und wäre nun kein rein digital erstelltes Modell mehr. Von dieser Tatsache abgesehen, haftet die Farbe auf Kunststoffreliefs nicht so gut wie auf jenen aus Gips. Eine weitere Möglichkeit wäre die Projektion eines Luftbildes oder auch einer Animation direkt auf die Oberfläche des Geländereiefs. Hier fehlt dann allerdings je nach Maßstab die plastische Ausführung von Wäldern oder Gebäuden. Um den 3D-Druck und die Bemalung in einem Arbeitsschritt ausführen zu können, würde sich das Pulver-Binder-Verfahren anbieten. Das Modell ist so gleich es aus dem Bauraum entnommen wird, landschaftlich oder auch geologisch eingefärbt. Somit wäre keine händische Nachbearbeitung mehr notwendig. Bei einem Maßstab von 1:5.000 oder größer fehlen allerdings auch hier die plastischen Ausführungen an der Geländeoberfläche, die dem Geländereief erst ihre naturtreue, lebhafte und künstlerische Charakteristik verleihen. Kann man auf die plastischen Ausführungen verzichten, hat die Firma STM einen speziellen Drucker entwickelt um den Farbauftrag im

Vergleich zur manuellen Bemalung stark zu beschleunigen. Die Reliefs dieser Firma bewertet Mair aber wie folgt: „Deren Morphologie ist dilettantisch vereinfacht, stark überhöht, ihre Bemalung kartenmäßig und völlig unnatürlich, sie wirken aber großartig für das einheimische Publikum, das nicht gerade bekannt ist für seine Liebe zur und Wissen über Natur [MAI-12: 417].“

Nachdem nun die Herstellungsverfahren ausführlich diskutiert und auf deren Vor- und Nachteile eingegangen wurde, soll im nächsten Abschnitt ein Vergleich der zuvor analysierten Modelle stattfinden um die eben aufgelisteten Unterschiede anhand von Beispielen veranschaulichen zu können.

## **7.2 Gegenüberstellung und Vergleich der Modelle**

In Kapitel 6 wurden drei verschiedene Geländereliefs aus unterschiedlichen Epochen vorgestellt. Jedes mit einem anderen Verfahren und unterschiedlichen Ausgangsdaten erstellt. Da das Modell vom Wettersteingebirge mit einer Methode, die für heutige Standards zu ungenaue Ergebnisse liefert, erstellt wurde, wird auf dieses im weiteren Verlauf der Gegenüberstellung nicht weiter eingegangen. Vergleicht man nun die beiden anderen Reliefmodelle miteinander, so gibt es große Unterschiede hinsichtlich der Datengrundlage, Material, Technik, Farbgebung und Genauigkeit.

Dienten bei Imfelds Matterhorn Relief Höhenlinien aus analogen Karten sowie eigens vermessene Punkte, Fotos und Zeichnungen als Datengrundlage, so nutzte Semann ein eigens erstelltes DGM basierend auf Luftbilddauswertungen für die Fertigung des Eiger Reliefs. Das fertige Matterhorn Relief besteht aus Gips. Für das Rohmodell wurden jedoch zusätzliche Materialien wie Karton, Metallstifte, Kitt sowie Plastilin benötigt, bevor ein Gipsabguss erstellt werden konnte. Das Eiger Relief besteht zur Gänze aus Photopolymer und benötigt keinerlei „Vormodelle“ oder Abgüsse. Imfeld fertigte sein Relief durch Modellierung auf Basis von Höhenlinien rein manuell an. Das Eiger Relief hingegen wurde ohne jegliche manuelle Arbeitsschritte, sondern rein computerbasierend, mittels Stereolithographie, konstruiert. Lediglich die Bemalung wurde händisch vorgenommen.

Konnte Imfeld mit seinen Ziselierwerkzeugen die kleinsten Strukturen im Fels sowie den Gletscher fließend nachbilden, so beschränkt sich der Detaillierungsgrad des Eiger Reliefs auf Kleinformen die größer als 5 - 8 m sind. Hier müssen allerdings auch die unterschiedlichen Maßstabszahlen der Modelle berücksichtigt werden. Abgesehen davon hängt der Detaillierungsgrad von der Auflösung des DGMs ab. Im manuellen Reliefbau kann die Morphologie in Abhängigkeit vom Maßstab individuell verfeinert werden. Ist die manuelle Herstellungsmethode dem Rapid Prototyping Verfahren überlegen, was die Auflösung und das Detailreichtum angeht, so kann davon ausgegangen werden, dass das Eiger Relief eine höhere geometrische Genauigkeit aufweist. Einerseits basiert es auf Luftbildern und andererseits können Ungenauigkeiten, die möglicherweise beim Aussägen der Höhenkurven, Zusammenkleben der Höhenschichten oder Umgießen des

Negativmodells auftreten, ausgeschlossen werden. Der Druck des Eiger Reliefs dauerte etwa 28 Stunden (50 x 20 cm). Der Aufwand für das Markieren und Aussägen der Höhenlinien, den Aufbau des Treppenstufenmodells, das Umgießen, das Modellieren und die Bemalung von Imfelds Relief (96 x 140 cm) ist nicht überliefert, dürfte aber wohl nicht in 28 Stunden ausgeführt worden sein, sondern in weitaus mehr Arbeitsstunden. Pusch benötigte für die manuelle Fertigung seines Matterhorn Reliefs (50 x 50 cm) im Maßstab 1:10.000 etwa 20 Stunden. Rein subjektiv betrachtet vermittelt das Relief von Imfeld einen lebhafteren, detailreicheren, kunstvolleren, vollkommeneren und schöneren Eindruck der Landschaft. Das Eiger Relief wirkt hingegen kühler. Ohne plastische Details vermittelt es einen kargen und kahlen Eindruck der Landschaft, die dadurch sehr schematisch wirkt.

Jede Methode hat also ihre besonderen Eigenheiten, die sowohl Vor- als auch Nachteile aufweist. Haben die klassischen Gipsreliefs einen höheren Detailierungsgrad, so ist bei den digital konstruierten Modellen aus dem 3D-Drucker vor allem die geometrische Genauigkeit hervorzuheben. Von „Ausgeburten verdorbener Topographie“ wie Imhof [1972: 299] die „Plastikreliefs“ einst beschrieben hatte, kann allerdings nicht mehr die Rede sein. Sie eignen sich vor allem für die Produktion von kostengünstigen Serienreliefs im mittleren und kleinmaßstäbigen Bereich.

Um qualitativ hochwertige individuelle Reliefs wie etwa Wolfgang Pusch, dessen Atelier im Anschluss an den 10. ICA Mountain Cartography Workshop besucht wurde, zu erstellen, eignen sich die derzeit verfügbaren 3D-Druckverfahren allerdings nicht. Selbst wenn die Auflösung der digitalen Daten unter 15 µm liegt, ist es mit den aktuellen Rapid Prototyping Verfahren nicht möglich die Oberfläche von Moränen oder feinste Felsstrukturen am gedruckten Modell darzustellen und somit ein rein computergeneriertes hochauflösendes Relief ohne jeglicher Handarbeit zu erstellen. [vgl. pus-18c] Auch zwei Jahrzehnte nach der Erstellung des Eiger Reliefs weisen die aktuellen 3D-Druck Verfahren, wie etwa die Stereolithographie oder das Fused Deposition Modeling noch immer Schwächen bezüglich der Auflösung und den sichtbaren Schichtdicken auf und werden den Ansprüchen Wolfgang Puschs nicht gerecht. Nach Pusch existiert trotz vielfacher Versuche bis heute kein rein digital gefertigtes Relief, das auch nur annähernd mit der Qualität eines handgefertigten Reliefs von Xaver Imfeld, Eduard Imhof oder Toni Mair mithalten könnte. [vgl. pus-18d] Somit zwingt die mangelnde Qualität weiterhin zur Handarbeit. Außerdem egalisiert sich der Zeitfaktor laut Pusch. Die Arbeitszeit, die für die Erstellung eines manuellen Treppenstufenmodells eingespart werden kann, wird bei der Datenbeschaffung und Erstellung des DGMs für den 3D-Druck sowie der händischen Nachbearbeitung des Gipsabgusses wiederum benötigt. [vgl. pus-18c] Digitale Methoden bieten allerdings eine ausgezeichnete Ergänzung zum klassischen analogen Herstellungsprozess. Einerseits bei der Planungsphase am Computer um Maßstab, Ausschnitt und Größe des geplanten Reliefs festzulegen und andererseits bei der Erstellung der Höhenlinienkarten, die beispielsweise mittels SRTM-Daten generiert werden können, falls von gewissen Berggipfeln keine passenden topographischen Karten zu Verfügung stehen. Eine andere Möglichkeit digitale



Verfahren für den Bau hochwertiger Geländereliefs zu nutzen, wäre die Kombination von digitalen und manuellen Fertigungsschritten. Es könnte beispielsweise mittels CNC-Fräse oder Stereolithographie ein negatives Modell generiert werden, von dem dann ein Gipsabguss erstellt wird um die Morphologie des Geländes fein säuberlich per Handarbeit ausmodellieren zu können. Die anschließende Bemalung würde auch händisch erfolgen. Somit wäre das Beste aus beiden Verfahren vereint. Die geometrische Genauigkeit des computergestützten Verfahrens, sowie die ästhetische und manuelle Feinarbeit des analogen Verfahrens. Dieser Ansatz wurde auch bereits in Welter [2013] erwähnt.

Nachdem nun auch die Modelle hinreichend gegenübergestellt und diskutiert wurden, soll im nächsten Abschnitt konkret auf die Forschungsfragen eingegangen werden.

### **7.3 Beantwortung der Forschungs- und Arbeitsfragen**

Die Forschungsfrage lautet: „Welche Verfahren gibt es und welche eignen sich heute am besten für die Erstellung von Geländereliefs unter besonderer Berücksichtigung der zugrundeliegenden Geodaten?“ Zusammenfassend kann die Forschungsfrage so beantwortet werden, dass es drei Hauptgruppen an Herstellungsverfahren gibt. Diese gliedern sich in manuelle, maschinelle und digitale Verfahren. Maschinelle Verfahren finden heute keine Anwendung mehr, da deren Platz die digitalen Verfahren eingenommen haben. Diese lassen sich in additive, subtraktive und formative Techniken gliedern, wobei die Gruppe der additiven Verfahren das meiste Potential mit sich bringt. Bei den manuellen Verfahren eignet sich die Modellierung auf Basis von Höhenlinien am besten für den Bau großmaßstäbiger Reliefs. An die Anschaulichkeit, Detailliertheit und Genauigkeit der mit dieser Methode erstellten Geländereliefs kann aktuell auch kein anderes bzw. digitales Verfahren mithalten.

Zusätzlich zur Forschungsfrage gab es noch sechs weitere Arbeitsfragen zu beantworten. Die erste lautet: „*Wie hat sich die Erstellung von Geländereliefs im Laufe der Zeit entwickelt?*“ Dies kann in Kapitel 3, welches einen geschichtlichen Abriss enthält, sowie in Kapitel 5, in dem die Herstellungsverfahren seit dem 16. Jahrhundert bis heute erläutert werden, nachgelesen werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Entwicklung der Herstellungsverfahren immer sehr eng mit den verfügbaren Daten und der jeweils aktuellen Datenaufnahmemethode verbunden ist.

Eine ausführliche Antwort auf die zweite Arbeitsfrage: „*Welche Daten liegen den Modellen zugrunde? Welche Anforderungen werden heute an Geodaten gestellt?*“ kann in Kapitel 4 und vor allem 4.3 nachgelesen werden.

Die dritte Arbeitsfrage lautet: „*Sind Geländereliefs heute noch von Bedeutung? Welchen Zweck haben sie? Hat sich die Bedeutung verändert?*“ Die Antworten zu diesen Fragen finden sich in Kapitel 3 bzw. 3.4. Die Bedeutung und vor allem der Zweck von Geländereliefs hat sich über die Zeit sehr wohl und auch sehr stark verändert. Hatten die Modelle anfangs

militärische, schulische oder werbemäßige Bedeutung, so erfüllen sie heute „nur“ noch den Zweck als Kunst- und Anschauungsobjekt in Museen, Nationalparkzentren oder ähnlichem.

Frage vier lautet: *„Sind manuell erstellte analoge Geländereliefs ein Anachronismus vergangener Tage oder immer noch von großer Bedeutung? Zahlt sich die manuelle Herstellung noch aus? Oder geht der Trend hin zu digitalen oder virtuellen Modellen?“*. Ob die manuelle Herstellung ein Anachronismus vergangener Tage ist bzw. ob digitale und in weiterer Folge vielleicht sogar virtuelle Abbildungen den taktilen Modellen den Rang ablaufen werden, kann an dieser Stelle nicht eindeutig gesagt werden. Fest steht aber, dass die digitale Entwicklung voranschreitet. Nicht nur im Alltag sondern auch oder ganz besonders in der Wissenschaft und dementsprechend auch in der Kartographie. Der Einsatz von digitalen Animationen, Virtual Reality, etc. steigt an. Der Trend von analogen taktilen Gegenständen hin zu digitalen Anwendungen bzw. Abbildungen und Bildschirmpräsentationen nimmt zu. Ob auf echte dreidimensionale Abbildungen in Zukunft auch in Museen verzichtet werden kann oder wird, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Da die Reliefs ja eigentlich nur als Kunst-/Anschauungsobjekt dienen, ähnlich wie Gemälde von namhaften Malern und Künstlern und diese auch noch in „echt“ ausgestellt werden, kann man annehmen, dass es bei den Geländereliefs ähnlich verläuft. Da Geländereliefs eher ein Nischenprodukt darstellen, wird wohl auch nicht besonders darauf gedrängt werden auch diesen Gegenstand in naher Zukunft komplett zu digitalisieren bzw. in den virtuellen Raum zu verdrängen.

Die nächste Arbeitsfrage zielt auf die digitalen Herstellungsverfahren ab und lautet: *„Kann die digitale Erstellung von Reliefs mittels 3D-Drucker mit der Genauigkeit manueller Reliefs bereits mithalten? Welche 3D-Druckverfahren gibt es und welche sind im Reliefbau am besten geeignet?“* Die erste Frage ist eindeutig mit nein zu beantworten. Manuell erstellte Reliefs enthalten eine weitaus genauere und detailreichere morphologische Ausgestaltung, vor allem in steilerem Gelände. Beschränkt man sich rein auf die geometrische Genauigkeit der Landschaftsmodelle, dann ja. Welche für den Reliefbau geeigneten 3D-Druckverfahren es gibt, kann in Kapitel 5.3 nachgelesen werden.

Die Kapitel 7.1 und 7.2 beantworten die letzte Arbeitsfrage, die da lautet: *„Vergleich zwischen analogen und digitalen Modellen! Welche Vor- und Nachteile gibt es?“*

Im Großen und Ganzen konnten alle Fragen beantwortet werden. Generell geht der Trend hin zur digitalen Weiterentwicklung. Da die Qualität dieser Verfahren aber noch nicht auf dem gewünschten Niveau liegt, wird das traditionelle Handwerk des manuellen Reliefbaues auch in naher Zukunft nicht ausgestorben sein.

---

## 8 Literaturverzeichnis

[ALB-09]

ALBERTZ, J.: Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 4. Auflage. Darmstadt. 2009. 254 S.

[ARN-66]

ARNBERGER, E.: Handbuch der thematischen Kartographie. Wien. 1966. 554 S.

[ARN-75]

ARNBERGER, E. und KRETSCHMER, I.: Wesen und Aufgaben der Kartographie-  
Topographische Karten (Aufnahme; Entwurf Topographischer und Geographischer Karten;  
Kartenwerke). Wien. 1975. (=Die Kartographie und ihre Randgebiete, Band I)

[AUB-11]

AUBRECHT, C., CHLAUPEK, A. und STEINOCHER, K.: Bildverarbeitung und Fernerkundung.  
Lehrbehelf für das Wintersemester 2011/12. UNI Wien. 2011

[AUM-94]

AUMANN G.: Aufbau qualitativ hochwertiger digitaler Geländemodelle aus Höhenlinien.  
Dissertation. Technische Universität München. 1994. 97 S. (=Deutsche Geodätische  
Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Reihe C. Heft 411)

[BIB-35]

BIBIZA, F.: Herstellung geographischer Reliefs. In: SIMONIC, A. (Hrsg.): Pädagogischer  
Führer. 85. Jahrgang. Band 1. Wien. 1935. S. 563-570.

[BOS-54]

BOSSE, H.: Kartentechnik I. Zeichenverfahren. Lahr. 1954. 174 S. (=Kartographische  
Schriftenreihe. Band 2)

[BUC-07]

BUCHROITHNER, M.: Echtdreidimensionalität in der Kartographie: gestern, heute, morgen.  
In: Deutsche Gesellschaft für Kartographie e. V. (Hrsg.): Kartographische Nachrichten. 57.  
Jahrgang. Heft 5. Bonn. 2007. S. 239-248.

[BÜH-41]

BÜHLER, H.: Führer durch das Alpine Museum in München. München. 1941. 114 S.

[CAM-03]

CAMINADA, P.: Pioniere der Alpentopographie. Die Geschichte der Schweizer Kartenkunst.  
Zürich. 2003. 240 S.

[CAV-98]

CAVELTI HAMMER, M: Herstellung und Auswirkungen des Reliefs der Urschweiz von Franz

Ludwig Pfyffer. In: *Cartographica Helvetica: Fachzeitschrift für Kartengeschichte*. Heft 18. Murten. 1998. S. 11-18.

[CAV-06]

CAVELTI HAMMER, M.: Xaver Imfeld, 1853-1909. Meister der Alpentopographie. Sarnen. 2006. 191 S.

[CAL-01]

CALDWELL, D.: Physical Terrain Modeling for Geographic Visualization. Modern Technology Meets An Ancient Art Form. In: North American Cartographic Information Society (Hrsg.): *Cartographic Perspectives*. Heft 38. Milwaukee. 2001. S. 66-72.

[DUG-17]

DUGGE, J. und DUGGE, J.: A Method for Creating Papercraft Raised Relief Maps from Digital Elevation Models. In: Technische Universität Dresden, Institute of Cartography (Hrsg.): *Unbounded Mapping of Mountains. Proceedings of the 10<sup>th</sup> ICA Mountain Cartography Workshop*. 26-30 April 2016. Berchtesgaden, Germany. Dresden. 2017

[FEL-22]

FELS, E.: Fortschritte in der Herstellung von Kartenreliefs. In: HAACK, H. et al. (Hrsg.): *Geographischer Anzeiger. Blätter für den Geographischen Unterricht*. 23. Jahrgang. Gotha. 1922. S. 231-233.

[GEB-16]

GEBHARDT, A., KESSELR, J. und THURN, L.: *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*. 2. Auflage. München. 2016. 218 S.

[GRU-98]

GRUBER, D., KRIZ, K.: DGM-Optimierung als Basis für geomorphologische Fragestellungen. In: KRIZ, K. (Hrsg.): *Hochgebirgskartographie. Silvretta '98. High Mountain Cartography*. Wien. 1998. S. 76-80. (=Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Band 11)

[GRÜ-86]

GRÜN, W.-D. und KRETSCHMER, I.: Relief. In: KRETSCHMER, I., DÖRFLINGER, J. und WAWRIK, F. (Hrsg.): *Lexikon zur Geschichte der Kartographie. Von den Anfängen bis zum Ersten Weltkrieg*. Band 2. Wien. 1986. 659 S. (=Die Kartographie und ihre Randgebiete, Band C/2).

[GYG-37]

GYGAX, F.: Das topographische Relief in der Schweiz: ein Beitrag zur Geschichte der schweizerischen Kartographie. In: Geographische Gesellschaft Bern (Hrsg.): *Jahresbericht der Geographischen Gesellschaft von Bern (1935-1936)*. Band 32. Bern. 1937. 96 S.

[HAA-21]

HAACK, H.: Wenschows Reliefkarten. In: Haack, H. et al. (Hrsg.): *Geographischer Anzeiger. Blätter für den Geographischen Unterricht*. 22. Jahrgang. Gotha. 1921. S. 11-13

[HAH-12]

HAHMANN, T., EISFELDER, C. und BUCHROITHNER, M.: Cartographic Representation of Dresden's Historical Development by Projecting a Movie onto a Solid Terrain Model. In: BUCHROITHNER, M. (Hrsg.): True-3D in Cartography: Autostereoscopic and Solid Visualisation of Geodata. Berlin. 2012. S. 281-295.

[HAK-02]

HAKE, G., GRÜNREICH, D. und MENG, L.: Kartographie. Visualisierung raum-zeitlicher Informationen. 8. Auflage. Berlin, New York. 2002. 604 S.

[HAM-97]

HAMMER, M., FELDMANN, H.-U. und OEHRLI, M. (Hrsg.): Farbe, Licht und Schatten. Die Entwicklung der Reliefkartographie seit 1660. Murten. 1997. 49 S.

[HAR-75]

HARVALIK, V.: Einige Gedanken zur Konstruktion von Geländemodellen. In: KIRSCHBAUM, G. und MEINE, K. (Hrsg.): Internationales Jahrbuch für Kartographie. Band 15. Bonn. 1975. S. 27-38.

[HAU-14]

HAUSMANN, K. und HORNE, R.: 3D-Druck für Dummies. Weinheim. 2014. 359 S.

[HUR-99]

HURNI, L.: Digitalisierung und Virtualisierung der Landschaft. In: GUGERLI, D. (Hrsg.): Vermessene Landschaften. Kulturgeschichte und technische Praxis im 19. Und 20. Jahrhundert, Zürich. 1999. S. 65-78.

[IMH-39]

IMHOF, E.: Entwicklung und Bau topographischer Reliefs. In: Die Alpen. 1939. S. 287-295.

[IMH-63]

IMHOF, E.: Kartenverwandte Darstellungen der Erdoberfläche. Eine systematische Übersicht. In: IMHOF, E. (Hrsg.): Internationales Jahrbuch für Kartographie. Wien. 1963. S. 54-99.

[IMH-65]

IMHOF, E.: Kartographische Geländedarstellung. Berlin. 1965. 425 S.

[IMH-68]

IMHOF, E.: Gelände und Karte. 3. Auflage. Erlenbach-Zürich, Stuttgart. 1968. 259 S.

[IMH-72]

IMHOF, E.: Thematische Kartographie. Berlin, New York. 1972. (=Lehrbuch der Allgemeinen Geographie, Band 10).



[IMH-81]

IMHOF, E.: Bildhauer der Berge. Ein Bericht über alpine Gebirgsmodelle in der Schweiz. Bern. 1981. 64 S.

[KNE-52]

KNEISSL, M.: Reliefherstellung, Anaglyphenkarten und photomechanische Schummerung. In: KNEISSL, M. und PILLEWIZER, W.: Reliefherstellung, Anaglyphenkarten und photomechanische Schummerung. Bamberg. 1952. S. 1-22. (=Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Reihe B: Angewandte Geodäsie - Veröffentlichung Nr. 5)

[KRA-04]

KRAUS, K.: Photogrammetrie, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, Band 1. 7. Auflage. Berlin. 2004. 516 S.

[KRE-06]

KREMPL, S.: Homo Fabber. Vom Personal Computer zum Personal Fabricator. In: c't Magazin für Computer und Technik. Heft 5. 2006. S. 100-105

[KRE-86]

KRETSCHMER, I., DÖRFLINGER, J. und WAWRIK, F.: Lexikon zur Geschichte der Kartographie. Von den Anfängen bis zum Ersten Weltkrieg. Band 2. Wien. 1986. S. 659. (=Die Kartographie und ihre Randgebiete, Band C/2).

[KRI-09]

KRIZ, K.: Einführung in die Kartographie. Lehrbehelf für das Wintersemester 2009/10. UNI Wien. 2009

[KRI-13]

KRIZ, K. und HEUBERGER, M.: Kartenverwandte Ausdrucksformen. Lehrbehelf für das Wintersemester 2013/14. UNI Wien. 2013.

[MAI-06]

MAIR, T. und GRIEDER, S.: Das Landschaftsrelief. Symbiose von Wissenschaft und Kunsthandwerk. Baden. 2006. 176 S.

[MAI-09]

MAIR, T.: Das Landschaftsrelief. Ein Anachronismus oder immer noch ein ausgezeichnetes Objekt zur Landschaftsbetrachtung. Unterägeri. 2009. 13 S.

[MAI-12]

MAIR, T.: The Landscape Relief Model – An anachronism or still a useful object for contemplating the landscape. In: BUCHROITHNER, M. (Hrsg.): True-3D in Cartography: Autostereoscopic and Solid Visualisation of Geodata, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Heidelberg. 2012. 510 S.

[MAY-59]

MAYS, R.: Die Profilverstellung und ihre Anwendung zur Herstellung von Geländereliefs. In: Institut für Angewandte Geodäsie (Hrsg.): Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen. Reihe I: Deutsche Beiträge und Informationen. Heft 10. Frankfurt. 1959. S. 63-67.

[MÜH-63]

MÜHLE, H.: Manuelle Geländemodell-Herstellungsverfahren unter Berücksichtigung des Standes der Technik. In: Deutsche Gesellschaft für Kartographie e. V. (Hrsg.): Kartographische Nachrichten. Jahrgang 13. Heft 5. Gütersloh. 1963. S. 137-147.

[MÜH-65a]

MÜHLE, H.: Herstellung von Tiefziehformen für Kartenreliefs. In: Institut für Angewandte Geodäsie (Hrsg.): Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen. Reihe I: Deutsche Beiträge und Informationen. Heft 31. Frankfurt. 1965. S. 45-54.

[MÜH-65b]

MÜHLE, H.: Moderne Reliefherstellung durch Photopolymerisation. In: Institut für Angewandte Geodäsie (Hrsg.): Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen. Reihe I: Deutsche Beiträge und Informationen. Heft 30. Frankfurt. 1965. S. 27-34.

[MÜH-67]

MÜHLE, H.: Die Vakuumverformung von Kunststoff-Folien zu Kartenreliefs. In: Institut für Angewandte Geodäsie (Hrsg.): Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen. Reihe I: Deutsche Beiträge und Informationen. Heft 34. Frankfurt. 1967. S. 25-45.

[NIE-02]

NIEDERÖST, J.: Das Relief der Urschweiz von Franz Ludwig Pfyffer: Digitale Dokumentation und vermessungstechnische Aspekte. In: Cartographica Helvetica: Fachzeitschrift für Kartengeschichte. Heft 26. Murten. 2002. S. 31-39.

[NIE-05]

NIEDERÖST, J.: Das Relief der Urschweiz von Franz Ludwig Pfyffer (1716-1802): 3D-Rekonstruktion, Analyse und Interpretation. Dissertation. ETH Zürich. 2005. 211 S.

[ODE-29]

ODERMATT, F.: Joachim Eugen Müller. 1752-1833. In: Die Alpen. Monatsschrift des Schweizer Alpenclub. Bern. Heft 121. 1929. S. 15-26

[OTT-73]

OTTIGER, T.: General Franz Ludwig Pfyffer von Wyher, Schöpfer des Reliefs der Urschweiz. Zur Geschichte des ältesten Reliefs der Schweiz. In: Geographica Helvetica: Schweizerische Zeitschrift für Geographie. Volume 28. Heft 2. 1973. S. 69-88.

[PEA-08]

PEARSON, A. et al.: The Terrain Models of Joachim Eugen Müller (1752-1833) and the

Production of the "Atlas Suisse par Meyer et Weiss." An Analytical Study Using Non-Contact 3D Digitizing Techniques. In: Institut für Kartographie, ETH Zürich (Hrsg.): Mountain Mapping and Visualisation. Proceedings of the 6<sup>th</sup> ICA Mountain Cartography Workshop. 11-15 February 2008, Lenk, Switzerland. Zürich. 2008. S. 163-169

[PEN-04]

PENCK, A.: Neue Reliefs der Alpen. In: HETTNER, A. (Hrsg): Geographische Zeitschrift. Jahrgang 10. Leipzig. 1904. S. 26-38 und 95-101.

[PIL-52]

PILLEWIZER, W.: Die amerikanische Methode der Reliefherstellung. In: KNEISSL, M. und PILLEWIZER, W.: Reliefherstellung, Anaglyphenkarten und photomechanische Schummerung. Bamberg. 1952. S. 25-27. (=Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Reihe B: Angewandte Geodäsie - Veröffentlichung Nr. 5)

[RAS-03]

RASE, W.: Von 2D nach 3D – perspektivische Zeichnungen, Stereogramme, reale Modelle. In: Deutsche Gesellschaft für Kartographie e. V. (Hrsg.): Kartographische Schriften. Band 7. Visualisierung und Erschließung von Geodaten. Bonn. 2003. S. 13-24.

[RAS-10]

RASE, W.: Karten aus dem 3D-Drucker. In: Deutsche Gesellschaft für Kartographie e. V. (Hrsg.): Kartographische Nachrichten. 60. Jahrgang. Heft 1. Bonn. 2010. S. 38-41.

[RAS-12]

RASE, W.: Creating Physical 3D Maps Using Rapid Prototyping Techniques. In: BUCHROITHNER, M. (Hrsg.): True-3D in Cartography: Autostereoscopic and Solid Visualisation of Geodata. Berlin. 2012. S. 119-134.

[RAT-22]

RATHJENS, K.: Das neue Wenschowsche Reliefverfahren. In: LANGHANS, P. (Hrsg.): Dr. A. Petermanns Mitteilungen aus Justus Perthes' Geographischer Anstalt. 68. Jahrgang. Gotha. 1922. S. 4-5.

[RÄB-08]

RÄBER, S. und HURNI, L.: An Ambitious Relief Model Project. A Combination of a Handmade, a Computer-Generated and a Profiled Relief Model. In: Institut für Kartographie, ETH Zürich (Hrsg.): Mountain Mapping and Visualisation. Proceedings of the 6<sup>th</sup> ICA Mountain Cartography Workshop. 11-15 February 2008, Lenk, Switzerland. Zürich. 2008. S. 185-193.

[RÄB-15]

RÄBER, S.: Alpine Relief Models. In: KRIZ, K. (Hrsg): Mountain Cartography. 16 Years ICA Commission on Mountain Cartography (1999-2015). Wien. 2015. S. 105-112. (=Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Band 21)

[RIE-09]

RIEDL, A., RIEDL, D. und MITTERMAIER, R.: Einführung in die Geoinformation. Lehrbehelf für das Wintersemester 2009/10. UNI Wien. 2009

[SCH-65]

SCHÖNHERR, D.: Beiträge zur Kunstgeschichte Tirols. Paul Dax. 1865. S. 317-354.

[SCH-87]

SCHWARZ, U.: Die Darstellung der dritten Dimension. Ein Beitrag zur Geschichte der Kartographie. In: Geowissenschaften in unserer Zeit. Jahrgang 5. Heft 5. Weinheim. 1987. S. 157-165.

[SEM-99]

SEMANN, M. und HELL, G.: Kartographischer Reliefbau: Heutige Möglichkeiten mit Rapid Prototyping Verfahren. In: Deutsche Gesellschaft für Kartographie e. V. (Hrsg.): Kartographische Nachrichten. 49. Jahrgang. Heft 5. Bonn. 1999. S. 185-192.

[STE-16]

STENDER, F.: Freie Geodaten in der topographischen Kartographie - Realisierung einer topographischen Karte 1:25.000 im Hochgebirge. Masterarbeit. Universität Wien. 2016. 125 S.

[SZA-86]

SZARAWARA, K. und BRUNNER, F.: Das Geländemodell in der Geographie. Anmerkungen zur Herstellung und Anwendung von Geländemodellen im Schul- und Hochschulbereich. In: Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität. Band 26. Graz. 1986. S. 227-241.

[WEL-13]

WELTER, J.: Solid Landscape Models in the Twenty-first Century – A Balanced Approach. In: The Cartographic Journal. The World of Mapping. 50. Jahrgang. Heft 3. 2013. S. 300-304.

[WIL-90]

WILHELMY, H.: Kartographie in Stichworten. 5. Auflage. Unterägeri. 1990. 391 S.

[WIT-79]

WITT, W.: Lexikon der Kartographie. Band B. Wien. 1979. 707 S. (=Die Kartographie und ihre Randgebiete, Band B).

[WYS-14]

WYSS, M.: 3D-Printed Landform Models. In: North American Cartographic Information Society (Hrsg.): Cartographic Perspectives. Heft 79. Milwaukee. 2014. S. 61-67.

[ZEM-86]

ZEMANN, A.: Reliefbau in Österreich. Diplomarbeit. Universität Wien. 1986. 148 S.

[ZUP-70]

ZUPFER, O.: Die topographischen Methoden der österreichischen Landesaufnahmen. In: BEV (Hrsg.): Die amtliche Kartographie Österreichs. Wien. 1970. S. 113-138

[ZUR-50]

ZURFLÜH, H.: Das Relief. Anleitung zum Bau von Reliefs für Schule und Wissenschaft. Bern. 1950. 62 S.

## Onlinequellen

[3dm-18]

3D MAKE. DRUCK. DESIGN. TECHNOLOGY. Ebner Verlag GmbH & Co KG (Hrsg.):  
<https://www.3dmake.de/3d-druck-industrie/eos-p-770/>

[3ds-18]

3D SYSTEMS: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/prox-950>

[ama-18]

AMAP Austria - Austrian Map Online: Hrsg.: Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen:  
<http://www.austrianmap.at/amac/index.php?SKN=1&XPX=637&YPX=492>

[arc-18a]

ARCGIS:  
<http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>

[arc-18b]

ARCTRON 3D: Vermessungstechnik & Softwareentwicklungs GmbH:  
<http://www.arctron.de/de/produkte/leica/tachymeter/>

[bev-18: 1]

BUNDSAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN:  
[www.bev.gv.at/portal/page?\\_pageid=713,1570459&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1570459&_dad=portal&_schema=PORTAL)

[bev-18: 2]

BUNDSAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN:  
[http://www.bev.gv.at/portal/page?\\_pageid=713,1572975&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1572975&_dad=portal&_schema=PORTAL)

[bev-18: 3]

BUNDSAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN:  
[http://www.bev.gv.at/portal/page?\\_pageid=713,1572954&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1572954&_dad=portal&_schema=PORTAL)

[bev-18: 4]

BUNDSAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN:



[http://www.bev.gv.at/portal/page?\\_pageid=713,1573999&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1573999&_dad=portal&_schema=PORTAL)

[car-18]

CARL AUGUST RATHJENS: [https://de.wikipedia.org/wiki/Carl\\_August\\_Rathjens](https://de.wikipedia.org/wiki/Carl_August_Rathjens)

[dat-18]

DATA.GV.AT - OFFENE DATEN ÖSTERREICH: Hrsg.: Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort: <https://www.data.gv.at/>

[dat-18a]

DATA.GV.AT - OFFENE DATEN ÖSTERREICH: Hrsg.: Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/d88a1246-9684-480b-a480-ff63286b35b7>

[dat-18b]

DATA.GV.AT - OFFENE DATEN ÖSTERREICH: Hrsg.: Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/254757be-69ef-4a6c-a4c1-1432815d7522>

[dat-18c]

DATA.GV.AT - OFFENE DATEN ÖSTERREICH: Hrsg.: Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/0454f5f3-1d8c-464e-847d-541901eb021a>

[dat-18d]

DATA.GV.AT - OFFENE DATEN ÖSTERREICH: Hrsg.: Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/a83f651d-9942-4699-92f5-a01051a43992>

[eos-18a]

EOS GMBH, ELECTRO OPTICAL SYSTEMS: FORMIGA P 110  
[https://www.eos.info/systeme\\_loesungen/kunststoff/systeme\\_und\\_zubehoer/formiga\\_p\\_110](https://www.eos.info/systeme_loesungen/kunststoff/systeme_und_zubehoer/formiga_p_110)

[eos-18b]

EOS GMBH, ELECTRO OPTICAL SYSTEMS: EOS P 770  
[https://www.eos.info/systeme\\_loesungen/eos-p-770](https://www.eos.info/systeme_loesungen/eos-p-770)

[eos-18c]

EOS GMBH, ELECTRO OPTICAL SYSTEMS:  
[https://www.eos.info/additive\\_fertigung/fuer\\_technologie\\_interessierte](https://www.eos.info/additive_fertigung/fuer_technologie_interessierte)

[ern-18]

ERNST SCHEFER RELIEFBAU:  
<http://www.reliefbau.ch/images/ReliefsNeu/EigerMoenchJungfrau.jpg>

[ger-18]

GEORELIEF GbR: [www.georelief.de/salzkammergut-617.html](http://www.georelief.de/salzkammergut-617.html)

[geo-11]

GEO REISECOMMUNITY: karli98:

<http://www.geo.de/reisen/community/bild/452250/Schoenau-am-Koenigssee-Deutschland-Koenigssee-und-Watzmann>

[geo-18]

GEOLAND.AT: <http://www.geoland.at/site/geodata.html>

[his-16]

HISTORISCHES ALPENARCHIV DER ALPENVEREINE IN DEUTSCHLAND, ÖSTERREICH UND SÜDTIROL: <http://www.alpenarchiv.at/> (Suche-Sammlung-Wetterstein)

[hsl-18]

HISTORISCHES LEXIKON DER SCHWEIZ (HLS): <http://www.hls-dhs-dss.ch/textes/d/D29363.php>

[ica-14]

ICA - International Cartographic Association: <http://icaci.org/mission/>

[isp-16]

ISPRS - International Society for Photogrammetry and Remote Sensing: <http://www.isprs.org/documents/statutes16.aspx>

[ldf-17]

LEXIKON DER FERNERKUNDUNG, Hrsg.: BALDENHOFER, K.: Erd Ware, Geographische Software, Friedrichshafen, 2017: <http://www.fe-lexikon.info/FeLexikon.htm>

[lpd-14]

LP DAAC: LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER, Hrsg.: USGSS, NASA, 2014: [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/aster/aster\\_products\\_table/astgtm](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/aster/aster_products_table/astgtm)

[mai-04]

TONI MAIR, 2004: <http://www.mair-relief.ch/werke.php>

[mai-14]

Zeitungsartikel über Toni Mair vom 28.08.2014:

[http://www.ika.ethz.ch/medien/presse/2014\\_08\\_28\\_tierwelt\\_portrait.pdf](http://www.ika.ethz.ch/medien/presse/2014_08_28_tierwelt_portrait.pdf)

[pus-18a]

PUSCH, W.: Bergmodelle: <http://www.bergmodelle.de/nota-bene/herstellung/eine-hartenuss-shivling-1-10-000/>

[pus-18b]

PUSCH, W.: Bergmodelle:

<http://www.bergmodelle.de/serienreliefs/serienreliefs/watzmann/>

[pus-18c]

PUSCH, W.: Bergmodelle: <http://www.bergmodelle.de/nota-bene/herstellung/>

[pus-18d]

PUSCH, W.: Bergmodelle: <http://www.bergmodelle.de/nota-bene/philosophie-des-reliefbaus/>

[pus-18e]

PUSCH, W.: Bergmodelle: <http://www.bergmodelle.de/individuelle-reliefs/großreliefs/messner-mountain-museum-firmian/>

[qui-18]

QUIZLET: Photogrammetrie und Fernerkundung:  
<https://quizlet.com/93310009/photogrammetrie-und-fernerkundung-flash-cards/>

[reg-13a]

REGIORELIEF, 2013: <http://www.regiorelief.ch/index.htm>

[reg-13b]

REGIORELIEF, 2013: <http://www.regiorelief.ch/prod04.htm>

[rel-15]

RELIEF SHADING, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zürich:  
<http://www.reliefshading.com/techniques/wenschow/> 19.4.18

[rie-18]

RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GMBH, Copyright 2018,  
<http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/selelection-guide/>

[ros-01]

GEOINFORMATIK SERVICE/LEXIKON UNI ROSTOCK: <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=693>

[sha-18]

SHAPEWERK, 2018: <https://storage.googleapis.com/shapewerk-assets.appspot.com/40288096432a24d40143305e39090003/References3Page/image63.jpg>

[spe-01]

SPEKTRUM - LEXIKON DER KARTOGRAPHIE UND GEOMATIK, Hrsg.: Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2001: <http://www.spektrum.de/lexikon/kartographie-geomatik/>

[sta-11]

STADTMUSEUM DRESDEN, 2011: <http://www.stadtmuseum-dresden.de/aufstieg-stadt>

[stm-13a]

SOLID TERRAIN MODELING INC., 2018:  
[http://www.solidterrainmodeling.com/pdf\\_brochures/brochure.pdf](http://www.solidterrainmodeling.com/pdf_brochures/brochure.pdf)

[stm-13b]

SOLID TERRAIN MODLEING INC., 2018:

<http://www.solidterrainmodeling.com/gallery/photogallery/#gallery/2605/440/0>

[tan-14]

TanDEM-X – Die Erde in drei Dimensionen, Hrsg.: DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2014: [https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10378/566\\_read-426/#/gallery/345](https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10378/566_read-426/#/gallery/345) ; <https://tandemx-science.dlr.de/> ; [https://tandemx-science.dlr.de/pdfs/TD-PD-AO-0033\\_DEM\\_Announcement\\_of\\_Opportunity.pdf](https://tandemx-science.dlr.de/pdfs/TD-PD-AO-0033_DEM_Announcement_of_Opportunity.pdf)

[ter-14a]

TERRAIN MODELS, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zürich, 2014:  
<http://www.terrainmodels.com/exchaquet.html>

[ter-14b]

TERRAIN MODELS, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zürich, 2014:  
[www.terrainmodels.com/french.html](http://www.terrainmodels.com/french.html)

[ter-14c]

TERRAIN MODELS, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zürich, 2014:  
<http://www.terrainmodels.com/imhof.html>

[ter-15a]

TERRAIN MODELS, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zürich, 2015:  
[http://www.terrainmodels.com/Meili/saentis\\_2.html](http://www.terrainmodels.com/Meili/saentis_2.html)

[ter-15b]

TERRAIN MODELS, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zürich, 2015:  
[http://www.terrainmodels.com/lmfeld/jungfrau\\_1900.html](http://www.terrainmodels.com/lmfeld/jungfrau_1900.html)

[ter-15c]

TERRAIN MODELS, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zürich, 2015:  
[http://www.terrainmodels.com/Meili/pilatus\\_meili3.html](http://www.terrainmodels.com/Meili/pilatus_meili3.html)

[ter-15d]

TERRAIN MODELS, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zürich, 2015:  
<http://terrainmodels.com/imhof.html>

[ter-18]

TERRAIN MODELS, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zürich, 2018:  
<http://terrainmodels.com/mair.html>

[tey-18]

TEYLER NET - Behind the scenes of the Teylers Museum, 2018:

<http://teylersmuseum.ning.com/profiles/blogs/het-topje-van-de-mont-blanc>

[usg-15a]

USGS Long Term Archive: <https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>

[usg-15b]

USGS Long Term Archive: <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>

[ver-15]

1A-VERMESSUNG: Lalk GmbH & Co. KG.: <https://www.1a-vermessung.de/shop/nestle-mechanischer-theodolit-bc-9/2723/2184>



## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gelände - Karte - Relief [IMH-63:55] .....	8
Abbildung 2: Treppenstufenmodell des Shivling (6.543 m Höhe) im Garhwal Himal in Indien im Maßstab 1:10.000, 50 x 50 cm, Achteck [pus-18a] .....	11
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Vertikal- oder Profilplattenreliefs [IMH-63: 88] .....	12
Abbildung 4: Ausmodelliertes Relief ohne Darstellung der Oberflächenbedeckung des Shivling (6.543 m Höhe) im Garhwal Himal in Indien im Maßstab 1:10.000, 50 x 50 cm, Achteck [pus-18a].....	12
Abbildung 5: Relief mit Oberflächenbedeckung und naturähnlich bemalt (=topographische Reliefs) des Shivling (6.543 m Höhe) im Garhwal Himal in Indien im Maßstab 1:10.000, 50 x 50 cm, Achteck [pus-18a].....	13
Abbildung 6: Thematisch bemaltes Relief (=Geologisches Relief) der Glarner Alpen von Jakob Oberholzer, 1911, im Maßstab 1:50.000, 70,5 x 95 cm, geologisch bemalt von Max R. Geiser samt Legende, Fotomontur von Stefan Räber [RÄB-08: 189].....	13
Abbildung 7: Kartenrelief mit aufgedruckter Karte. Ausschnitt des Eiger, Mönch und Jungfraureliefs von Ernst Schefer, Maßstab 1:15.000, Masse: 86 x 96 cm, Äquidistanz 20 m [ern-18].....	14
Abbildung 8: Reliefkarte nach Witt: Kunststoffolie, auf die eine Karte aufgedruckt ist und mittels Vakuum geformt wurde, Salzkammergut im Maßstab: 1:300.000, 385 x 290 x 15 cm, Überhöhungsfaktor: 1,4 [ger-18].....	15
Abbildung 9: Senkrechte Parallelprojektion auf eine Horizontalebene [HAK-02: 88] .....	16
Abbildung 10: Watzmann und Königsee, Foto mit Blickrichtung Südwesten [geo-11] .....	17
Abbildung 11: Ausschnitt rund um den Watzmann aus der ÖK50 [ama-18].....	17
Abbildung 12: Watzmann Modell von Wolfgang Pusch [pus-18b] .....	18
Abbildung 13: Unbekannt, Wetterstein, Maßstab: unbekannt, Relief, Holzfundament mit gestärkter Leinwand überzogen, bemalt, Datierung: ca. 15./16. Jh. (wahrscheinlich das älteste Relief der Alpen), Maße: 170 x 70 cm ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823 (Darstellung auf diesem Relief: Von der Zugspitze bis zum Ferchensee)22	
Abbildung 14: Ausschnitt Wetterstein: Drahtbäume, Flur- und Bergnamen auf Papierzettel ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823.....	23

Abbildung 15: Ansicht des Reliefs der Urschweiz von Franz Ludwig Pfyffer. Die Abbildung zeigt Teile des Zuger und Vierwaldstätter Sees. ©Jana Niederöst [NIE-05: 3] .....	25
Abbildung 16: Das Innenleben des Reliefs der Urschweiz. ©Georg Anderhub, Luzern [CAV-98: 16].....	26
Abbildung 17: Säntisrelief von Albert Heim und Carl Meili im Maßstab 1:5.000, 1903 [ter-15a] .....	28
Abbildung 18: Jungfraugruppe von Xaver Imfeld im Maßstab 1:2.500, 1900, bemalt von Fridolin Becker 1902. [ter-15b].....	29
Abbildung 19: Pilatus, 1:10.000, 85 x 126 cm, 1908–1913, Xaver Imfeld, Fertigstellung: Carl Meili, Hans Hürlimann unter Anleitung von Albert Heim. [ter-15c] .....	29
Abbildung 20: Große Windgällen von Eduard Imhof im Maßstab 1:2.000, 163 x 307 cm, 1938. [ter-15d].....	30
Abbildung 21: Bietschhorn von Eduard Imhof im Maßstab 1:2.000, 137 x 170 cm, 1938. [ter-15d].....	31
Abbildung 22: Großglockner von Paul Oberlercher im Maßstab 1:2.000, 1893, Abguss des Mittelstückes; eigene Aufnahme.....	32
Abbildung 23: Kanton Aargau von Toni Mair im Maßstab 1:10.000, 23m <sup>2</sup> , 2001 [mai-04].	34
Abbildung 24: Reliefs der 14 Achttausender von Wolfgang Pusch im Maßstab 1:25.000, 2018, ausgestellt im Messner Mountain Museum [pus-18e] .....	35
Abbildung 25: Messtischaufnahme – Lage und Höhe umliegender Punkte werden aufgenommen und auf das Messtischblatt aufgetragen [IMH-68: 120].....	37
Abbildung 26: Theodolit vs. digitales Tachymeter [arc-18b] [ver-15].....	38
Abbildung 27: Anordnung eines Bildfluges [HAK-02: 319].....	41
Abbildung 28: Ablauf in der Photogrammetrie [spe-01: Phtogrammetrie] .....	42
Abbildung 29: Geometrische Auflösung von Fernerkundungssatelliten [AUB-11].....	45
Abbildung 30: Elektromagnetisches Spektrum [ALB-09: 11] .....	46
Abbildung 31: Laserscanning Verfahren [KRA-04: 450, 486] .....	49
Abbildung 32: Digitales Geländemodell (DGM) und Oberflächenmodell (DOM) [KRA-04: 354] .....	51

---

Abbildung 33: Gemessenes und gerechnetes DGM [HAK-02: 345] .....	52
Abbildung 34: Knoten und Kanten eines Triangulated Irregular Network (TIN) [arc-18a] ...	53
Abbildung 35: Strukturierung mittels Gitternetz (links) und Strukturierung mittels hybridem Netz (Gitternetz und Dreiecksvermaschung) (rechts) [AUM-94: 11] .....	54
Abbildung 36: Mont-Blanc von Charles-François Exchaquet, Holzschnitzerei, 1788, [tey-18] .....	60
Abbildung 37: Freie Modellierung [ZUR-50: 30ff.] .....	61
Abbildung 38: Sandkastenmethode [SZA-86: 228] .....	62
Abbildung 39: Modellierung mit Fixpunkten [ZUR-50: 34f.] .....	63
Abbildung 40: engmaschiges Profil entlang von Graten bzw. vom Gipfel bis ins Tal entlang [MAI-06: 78].....	64
Abbildung 41: Treppenstufenmodell [IMH-63: 88].....	65
Abbildung 42: Ablauf der Erstellung eines Treppenstufenmodells nach Imhof [IMH-81: 148] .....	67
Abbildung 43: Ablauf der Erstellung eines Treppenstufenmodells nach Mair [MAI-09: 10]	69
Abbildung 44: Glasplattenrelief [MÜH-63: 145] .....	72
Abbildung 45: Reliefschneidemaschine nach Wenschow. Links der Gipsblock mit Fräskopf. Rechts Kartenvorlage mit Führungsstift und Kugelkalotte oberhalb. [KNE-52: 10]...77	77
Abbildung 46: Wenschow-Verfahren - Abfahren der Höhenlinien mit Hilfe einer Lupe [KNE- 52: 11].....	78
Abbildung 47: Treppenstufenmodell mittels Wenschows-Verfahren erstellt. Im Hintergrund sieht man die Höhenschichten der Haupthöhenlinien. Im Vordergrund sind bereits die Zwischenhöhenlinien ausgefräst. [KNE-52: 10].....	78
Abbildung 48: Beim italienischen Verfahren ist der Höhenlinienplan auf einer Walze aufgespannt und der Gipsblock in einem Schlitten befestigt. Der Fräskopf ist mit fünf verschiedenen Fräsköpfen ausgestattet. [KNE-52: 3] .....	79
Abbildung 49: Funktionsweise der Stereolithographie [HAU-14: 40].....	84
Abbildung 50: Laser-Stereolithographie-Maschine der Firma 3D Systems, Modell ProX 950 [3ds-18].....	85

---

Abbildung 51: Eiger Relief - Stereolithographie, unlackiert; ©Mika Semann.....	86
Abbildung 52: Funktionsweise des Lasersinterns [KRE-06: 104].....	87
Abbildung 53: Arbeitsablauf des Lasersinterns - von der digitalen Vorlage bis zum fertigen Modell [eos-18c].....	87
Abbildung 54: Geländerelief von St. Moritz inklusive markierter Wander-, Ski- und Ausflugsmöglichkeiten [sha-18] .....	88
Abbildung 55: Funktionsweise des FDM [KRE-06: 104] .....	89
Abbildung 56: Fertigungsprozess des LOM Verfahrens [HAU-14: 46] .....	90
Abbildung 57: LOM Modell (links) und Nahaufnahme eines mittels LOM erstellten Modells (rechts) [CAL-01: 68] .....	91
Abbildung 58: Reliefmodell von Dresden im Maßstab 1:16.250, 2 x 1,5 m, Fertigstellung 2006, Thomas Hahmann in Kooperation mit dem Stadtmuseum Dresden und der TU Dresden. Das Relief wurde für die Ausstellung „Dresden macht Geschichte“ zum 800jährige Jubiläum der erstmaligen Erwähnung der Stadt Dresden konstruiert. Die Videoanimation über die Entwicklung Dresdens seit dem Jahr 8000 v. Chr. bis heute wird über einen Projektor mit Hilfe eines zusätzlichen Spiegels auf das Modell projiziert. [HAH-12] [sta-11] .....	92
Abbildung 59: Testfräsung mit einer CNC-Maschine des Raplab der ETH Zürich (links), Kugelfräskopf einer CNC-Maschine (rechts oben), Geländerelief nach der ersten Bearbeitungsphase [RÄB-08: 192].....	93
Abbildung 60: Relief der Glarner Alpen von Jakob Oberholzer (vorne) samt CNC-gefrästem Prototypen (hinten) [RÄB-08: 192].....	93
Abbildung 61: CNC gefrästes Modell vom Mt. Everest der Firma Solid Terrain Modeling während dem Farbauftrag mittels Tintenstrahldüsen [stm-13b] .....	94
Abbildung 62: Papercraft Mountains – Matterhorn im Maßstab 1:15.000, Maße 112 x 133 x 133 mm [DUG-17].....	96
Abbildung 63: Graviertes Laserstrahlrelief in Glas [RAS-12: 127] .....	96
Abbildung 64: „Regiorelief“ der Zentralschweiz aus Schokolade von Ueli Häusermann im Maßstab 1:400.000 [reg-13b].....	97
Abbildung 65: Ausschnitt Wettersteinrelief: Leinwand auf Holz ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823 .....	99

---

Abbildung 66: Ausschnitt Wettersteinrelief: Drahtbäume, Flur- und Bergnamen auf Papierzettel, Häuser ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823 .....	100
Abbildung 67: Ausschnitt Wettersteinrelief: Flussläufe ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823 .....	100
Abbildung 68: Ausschnitt Wettersteinrelief: Querschnitt ©Alpenverein-Museum, ÖAV Kunst/2823 .....	101
Abbildung 69: Imfeld Xaver, Matterhorn, Maßstab: 1:5.000, Relief, Technik: Gips, bemalt, 1903, Maße: 96 x 140,5 cm ©Alpenverein-Museum, Österreichischer Alpenverein/2757 .....	103
Abbildung 70: Detailaufnahme der Bäume aus Gips; eigene Aufnahme.....	103
Abbildung 71: Detailaufnahme der Hütte und Gewässer; eigene Aufnahme .....	104
Abbildung 72: Ausschnitt mit südlicher Blickrichtung aus Imfeld Xaver, Matterhorn, Maßstab: 1:5.000, Relief, Technik: Gips, bemalt, 1903, Maße: 96 x 140,5 cm ©Alpenverein-Museum, Österreichischer Alpenverein/2757 .....	104
Abbildung 73: Ausschnitt mit Blick auf den Hörnligrat aus Imfeld Xaver, Matterhorn, Maßstab: 1:5.000, Relief, Technik: Gips, bemalt, 1903, Maße: 96 x 140,5 cm ©Alpenverein-Museum, Österreichischer Alpenverein/2757 .....	105
Abbildung 74: Detailaufnahme des fließenden Gletschers; eigene Aufnahme .....	105
Abbildung 75: Detailaufnahme der Gletscherspalten, Eisbrüche und Felsen; eigene Aufnahme .....	106
Abbildung 76: Detailaufnahme der Felsstrukturen in der Gipfelregion; eigene Aufnahme .....	106
Abbildung 77: Eiger von Mika Semann im Maßstab: 1:12.500, 1998, Maße: 50 x 20 cm; ©Mika Semann.....	108
Abbildung 78: Wabenartige Strukturen im Inneren des Reliefs, Seitenansicht; ©Mika Semann.....	108
Abbildung 79: Sichtbare Querstrukturen im Felsen als Artefakte der additiven Fertigung (Zündholz als Größenvergleich); ©Mika Semann .....	109
Abbildung 80: Stark generalisierte senkrechte Felswände (Zündholz als Größenvergleich) ©Mika Semann.....	109



Abbildung 81: FDM-Druck des Matterhorns von Wolfgang Pusch im Maßstab 1:50.000,  
Maße: 10 x 10 cm; eigene Aufnahme ..... 113

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gliederung der ebenen kartenverwandten Ausdrucksformen nach Hake [2002: 176] und Kriz [2013: Kap.4: 15ff.].....	7
Tabelle 2: Vergleich der Äquidistanzen in amtlichen topographischen Hochgebirgskarten	50
Tabelle 3: Mittlerer Höhenfehler digitaler Geländemodelle (Höhenraster, Höhenschichtlinien, Strukturinformationen) des BEV je nach Geländeform bzw. Bodenbedeckung [bev-18: 2] .....	56
Tabelle 4: Herstellungsverfahren nach Methodik (eigene Darstellung) .....	58

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 28.08.2018