

Geographisches Institut  
der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität  
Bonn

Diplomarbeit

„Analoge und digitale geomorphologische Kartographie  
im Turtmantal/Mattertal, Schweizer Alpen“

Vorgelegt von: Jutta Bedehäising

Betreut durch: Prof. Dr. Richard Dikau

Bonn, März 2007

## **Erklärung**

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt und die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem Fall als Entlehnung kenntlich gemacht habe. Das gleiche gilt auch für Zeichnungen, Kartenskizzen und Abbildungen.

Bonn, den 16.03.2007

Jutta Bedehäsing

## **Dank**

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Dikau für die Betreuung dieser Diplomarbeit und die Förderung während des Studiums danken. Auch die gesamte Arbeitsgruppe war immer für Fragen und Diskussionen offen, was ich sehr zu schätzen gelernt habe. Besonderer Dank gilt Jan-Christoph Otto, der sich immer viel Zeit für meine Fragen genommen hat und Michael Krautblatter für die Hilfe im Gelände.

Ohne die Unterstützung und das Verständnis meiner Familie und Großeltern wäre das Studium weitaus schwieriger gewesen.

Zu guter Letzt möchte ich meinem Freund Rainer Schulte danken, der sowohl Höhen und Tiefen miterlebt hat und mir immer zur Seite stand.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Ziele der Arbeit .....	2
1.2	Forschungsstand.....	2
<b>2</b>	<b>Theoretischer Hintergrund .....</b>	<b>5</b>
2.1	Hochgebirge.....	5
2.1.1	Begriffsdefinition Hochgebirge.....	5
2.1.2	Besonderheiten von Hochgebirgen .....	7
2.2	Systeme im Hochgebirge .....	8
2.2.1	Systeme in der physischen Geographie.....	8
2.2.2	Das Talgletschersystem.....	13
2.2.2.1	Das glaziale System .....	14
2.2.2.2	Das proglaziale System .....	15
2.2.2.3	Das paraglaziale System.....	17
2.2.2.4	Das periglaziale System.....	21
2.3	Kartographie.....	25
2.3.1	Definition Kartographie und Karte.....	25
2.3.2	Datengrundlagen und Besonderheiten von Karten .....	27
2.3.3	Kartographische Semiologie.....	28
2.3.4	Kartographie und Objektivität .....	29
2.3.5	Neue Techniken in der Kartographie.....	30
2.4	Geomorphologische Kartierung.....	31
2.4.1	Entwicklung der geomorphologische Kartierung.....	31
2.4.1.1	Entwicklung auf internationaler Ebene.....	31
2.4.1.2	Entwicklung in Deutschland.....	33
2.4.2	Inhalt und Nutzen geomorphologischer Karten .....	35
2.4.3	Das GMK System Deutschland .....	37
2.4.3.1	GMK 25.....	37
2.4.3.2	GMK Hochgebirge .....	42
<b>3</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>45</b>
3.1	HRSC-A Datensatz.....	45
3.2	Kartenmaterial.....	46
3.3	Generelle Vorgehensweise bei der geomorphologischen Kartierung.....	48
3.4	Eigene Vorgehensweise bei der geomorphologischen Kartierung.....	50
3.4.1	Vorarbeiten.....	50
3.4.2	Geländearbeiten.....	51
3.4.3	Kartographische Umsetzung.....	51
<b>4</b>	<b>Untersuchungsgebiete.....</b>	<b>54</b>
4.1	Turtmantal und Mattertal .....	55
4.1.1	Allgemeine Eigenschaften.....	55
4.1.2	Geologie.....	56
4.1.3	Geomorphologie .....	58
4.1.4	Klima .....	60
4.2	Turtmanngletschervorfeld und Rinderalpji .....	63
4.2.1	Turtmanngletschervorfeld.....	63
4.2.2	Rinderalpji.....	66

<b>5</b>	<b>Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie .....</b>	<b>69</b>
5.1	Gletschervorfeld Turtmanngletscher .....	69
5.1.1	GMK 25.....	70
5.1.1.1	Situation und Topographie.....	70
5.1.1.2	Hangneigung .....	70
5.1.1.3	Stufen, Kleinformen, Täler und Rauheit.....	71
5.1.1.4	Substrat- und Oberflächengestein.....	72
5.1.1.5	Hydrographie .....	72
5.1.1.6	Prozess- und Strukturbereiche .....	73
5.1.2	Vergleich GMK 25 und GMK Hochgebirge.....	76
5.1.3	Entwicklung des Turtmanngletschers.....	78
5.1.4	Entwicklung des Gletschervorfelds .....	81
5.2	Rinderalpji .....	85
5.2.1	GMK 25.....	85
5.2.1.1	Situation und Topographie.....	85
5.2.1.2	Hangneigung .....	86
5.2.1.3	Stufen, Kleinformen, Täler und Rauheit.....	87
5.2.1.4	Substrat und Oberflächengestein.....	88
5.2.1.5	Hydrographie .....	89
5.2.1.6	Prozess- und Strukturbereiche .....	90
5.2.1.7	Unsicherheiten .....	93
5.2.2	Vergleich GMK 25 und GMK Hochgebirge.....	95
5.2.3	Entwicklung des Rothorn-Nordost Gletschers .....	95
<b>6</b>	<b>Diskussion der Kartierlegenden.....</b>	<b>100</b>
6.1	GMK 25 .....	100
6.2	GMK Hochgebirge.....	102
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>108</b>
	<b>Kartenverzeichnis .....</b>	<b>109</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>110</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Darstellung eines vereinfachten Systems (aus Inkpen 2005).....	9
Abbildung 2-2: "Breach-Lobes" des Miage Gletschers in Italien. Nachdem der Gletscher zuerst durch seine eigene Endmoräne gestaut wurde, kam es bei einem erneuten Vorstoß zum Durchbruch dieser an mehreren Stellen (aus Benn, et al. 2005).....	15
Abbildung 2-3: Reaktivierung des paraglazialen Sedimentaustzugs durch externe Prozesse (aus Ballantyne 2005). ....	18
Abbildung 2-4: Genetische Blockgletschertypen. A: Talus-Blockgletscher, der unterhalb von Blockhalden entsteht, B: Debris-Blockgletscher aus Moränenmaterial unterhalb von Gletschern (aus Barsch 1988; 1996).....	23
Abbildung 2-5: "The map use cube" Der Würfel zeigt die vier Schwerpunkte der Datenvisualisierung im GIS. Die Interaktionsfähigkeit, der Bekanntheitsgrad der Daten und die Nutzung bestimmen die Funktion einer Karte (aus Kraak & Ormeling 2003; nach MacEachren 1994). ....	26
Abbildung 2-6: Die Informationsschichten der GMK 25 und ihre farbliche Darstellung (aus Barsch 1987).....	38
Abbildung 2-7: Ausschnitt aus der GMK 25 Blatt Königsee zur Verdeutlichung des Prinzips der Informationsschichten. Moränen werden mit der Wölbungssignatur im glazialen Prozessbereich mit entsprechender Materialkennzeichnung dargestellt. ....	39
Abbildung 2-8: Signatur für Moränenwälle aus der GMK Hochgebirge. Je nach Dicke der Signatur und der Füllung des Kreises kann zwischen unterschiedlichen Höhen und Altern der Moränen differenziert werden (aus Kneisel, et al. 1998).....	43
Abbildung 3-1: Vorgehensweise bei einer geomorphologischen Kartierung (verändert nach Otto (2001) in Anlehnung an Leser (1977) ). ....	48
Abbildung 4-1: Untersuchungsgebiete im Turtmanntal/Mattertal, Schweizer Alpen (eigener Entwurf, mittlere Abbildung aus Dikau et al. 2004).....	54
Abbildung 4-2: Geologisches Profil der südlichen Walliser Alpen (aus Labhardt 2001).....	57
Abbildung 4-3: Monatsmittel der Temperaturen (gemessen 2m über dem Untergrund) und den Niederschlägen (ohne Schnee) von Juli 2002 bis September 2005, aufgezeichnet im Hungerlitalli, Turtmanntal (2770m) (verändert nach Otto 2006).....	61
Abbildung 4-4: Blick auf den Turtmannletscher (2006).....	63
Abbildung 4-5: Hillshade des Turtmannletschervorfeldes, berechnet aus dem HRSC-A-Höhenmodell des Turtmanntals. Die Daten stammen aus dem Jahre 2001, der Gletscher hat sich seitdem weiter zurückgezogen. ....	64
Abbildung 4-6: Anthropogene Aufschüttung von glaziofluvialen Sedimenten aus der Sedimentfalle im Vorfeld des Turtmannletschers (2006). ....	65
Abbildung 4-7: Hillshade des Rinderalpji-Gebiets im Mattertal, berechnet aus dem HRSC-A Höhenmodell. ....	66

Abbildung 4-8: Blick von unten auf die Rinderalpji aus östlicher Richtung (2006)...	68
Abbildung 4-9: Blick auf die Rinderalpji von oben aus südlicher Richtung. Der untere See besitzt eine Länge von ca. 60m (2006).....	68
Abbildung 5-1: Gebietsfläche in % pro Hangneigungsklasse im Kartiergebiet Turtmann-gletscher. ....	71
Abbildung 5-2: Blick auf Solifluktionsloben auf der östlichen Seite der orographisch rechten Seitenmoräne. Im Hintergrund ist die orographisch linke Seitenmoräne mit deutlicher linearer Erosion zu erkennen. ....	75
Abbildung 5-3: Längenänderung des Turtmann-gletschers von 1885 bis 2005 (aus VAW 1881-2005). ....	78
Abbildung 5-4: Endmoräne des Turtmann-gletschers aus der letzten größeren Vorstoßphase zwischen 1970 und Ende der 90er. Im Hintergrund befindet sich die östliche Seitenmoräne von 1850 (2006). ....	80
Abbildung 5-5: Endstände des Turtmann-gletschers 1999-2006 (2000 fehlt). Zur Orientierung markiert ein violetter Kreis einen kleinen See. Die Buchstaben helfen bei der Orientierung im Text. (1999 & 2002 Dikau, 2001 & 2003-2006 Otto). ....	84
Abbildung 5-6: Hangneigungskarte des Kartiergebietes Rinderalpji, errechnet aus dem HRSC-A Höhenmodell mit einer Auflösung von 1m. ....	87
Abbildung 5-7: Westlicher See an einer Moräne auf der Rinderalpji. Der Pfeil deutet auf das abschmelzende Toteis, der Kreis markiert eine Person zum Größenvergleich (2006). ....	90
Abbildung 5-8: Ausschnitte aus der Dufour- (I), Siegfried (II)- und der Landeskarte der Schweiz (III), die mit dem Hillshade (IV) die Entwicklung des Rinderalpji-Gebiet illustrieren sollen. Das gelbe Kreuz markiert den Rothorn-Nordost Gletscher, die Pfeile und Buchstaben werden im Text erläutert.....	98

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2-1: Aufbau der Legende GMK 25.....	40
Tabelle 2-2: Aufbau der Legende GMK Hochgebirge. ....	42
Tabelle 4-1: Klimadaten ausgewählter Stationen im Wallis (30-jähriges Mittel von 1901-1960 außer bei der Station in Evolène, die erst 1987 errichtet wurde) (aus Nyenhuis 2005).....	60

## **Verzeichnis der Beilagen**

Beilage 1: Geomorphologische Karte 1:10.000 des Turtmanngletschervorfelds,  
Turtmanntal, Wallis, Schweizer Alpen (GMK 25)

Beilage 2: Geomorphologische Karte 1:10.000 des Turtmanngletschervorfelds,  
Turtmanntal, Wallis, Schweizer Alpen (GMK Hochgebirge)

Beilage 3: Geomorphologische Karte 1:5.000 des Rinderalpji-Gebiets, Mattertal,  
Wallis, Schweizer Alpen (GMK 25)

Beilage 4: Geomorphologische Karte 1:5.000 des Rinderalpji-Gebiets, Mattertal,  
Wallis, Schweizer Alpen (GMK Hochgebirge)

## **Abkürzungen**

AppGeMa	Working Group on Applied Geomorphological Mapping
DEM/DHM	Digital elevation model/Digitales Höhenmodell
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGmBaK	Digitale geomorphologische Basiskarte
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
GB	Gigabyte
GIS	Geographisches Informationssystem
GMK 100	Geomorphologische Karte 1:100.000
GMK 25	Geomorphologischen Karte 1:25.000
HRSC-A	High Resolution Stereo Camera- Airborne
IAG	International Association of Geomorphologists
ICA	International Cartographic Association
IGU	International Geographical Union
PACE	Permafrost and Climate in Europe

## 1 Einleitung

Hochgebirge bieten der geomorphologischen Kartographie besondere Herausforderungen. Dem Kartierer erschweren nicht nur die häufig schlechte Erreichbarkeit, sondern auch steile Hänge, loses Geröll und die Abhängigkeit von guter Witterung die Arbeiten. Die Kartierlegenden mit denen vorhandene Formen, Prozesse und Materialien aufgenommen und später in der Karte dargestellt werden, müssen ebenfalls hohen Ansprüchen genügen. Sie müssen ermöglichen, dass verschiedensten Elemente übersichtlich präsentiert und trotzdem möglichst genau dargestellt werden. Dies wird in Hochgebirgen durch große Reliefunterschiede auf kleinem Raum, die auch häufig eine Intensivierung geomorphologischer Prozesse bedingen, erschwert. Hinzu kommt der polygenetische Charakter vieler Formen, der aber kein Alleinstellungsmerkmal für Gebirge ist. Damit ist gemeint, dass Formen durch mehrere Prozesse die gleichzeitig oder zeitlich versetzt ablaufen, geprägt werden.

Die geomorphologische Kartographie dient nicht nur der Darstellung, sondern ist auch eine Untersuchungsmethode um die Genese und das aktuelle Prozessgeschehen eines Systems zu verstehen.

In dieser Arbeit wird das geomorphologische Kartieren im Gelände als analoge Kartographie, die Arbeit am Computer, die neben der Übertragung der analogen Kartierung auch neue Analysen z.B. mit Höhenmodellen einschließt, als digitale Kartographie definiert. Das spätere Ergebnis kann dabei sowohl eine digitale Karte auf dem Computer, als auch eine analoge, fassbare Papierkarte sein.

Nachdem in den folgenden Unterkapiteln der Einleitung die Ziele dieser Diplomarbeit und der Forschungsstand vorgestellt werden, wird in Kapitel 2 zunächst der theoretische Hintergrund der Diplomarbeit veranschaulicht. Anschließend werden in Kapitel 3 das verwendete Material und die Methoden betrachtet, bevor in Kapitel 4 die Untersuchungsgebiete beschrieben werden. Die Ergebnisse der geomorphologischen Kartierung sowie die Diskussion der geomorphologischen Inhalte erfolgt in Kapitel 5. Eine Diskussion der geomorphologischen Kartierlegenden findet in Kapitel 6 statt. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung in Kapitel 7 und dem Ausblick im letzten Kapitel.

## 1 Einleitung

### 1.1 Ziele der Arbeit

Die Ziele dieser Diplomarbeit können in zwei Ebenen, eine methodische und eine inhaltliche, unterteilt werden.

Die methodischen Ziele umfassen die Überprüfung der deutschen Kartierlegenden zur geomorphologischen Kartierung GMK 25 und GMK Hochgebirge auf ihre Eignung zur Aufnahme und Darstellung in großen Maßstäben (1:10.000 und 1:5.000). Zusätzlich soll festgestellt werden, wie die Kartierlegenden für Gebiete in Hochgebirgen geeignet sind. Dabei sollen die GMK Hochgebirge, die als eine vereinfachte Form der GMK 25 extra für Bergregionen entwickelt wurde, mit der GMK 25, die für alle Gebiete geeignet sein soll, verglichen werden und die jeweiligen Vor- und Nachteile herausgearbeitet werden.

Insgesamt werden vier geomorphologische Karten in zwei unterschiedlichen Kartiergebieten entwickelt, jeweils eine GMK 25 und GMK Hochgebirge in den Maßstäben 1:10.000 und 1:5.000.

Die Ziele der zweiten Ebene beschäftigen sich mit dem geomorphologischen Inhalt der Karten. Durch die Kartierung im Gelände und die digitale Aufbereitung am Computer sollen die Untersuchungsgebiete hinsichtlich ihrer Genese, ihrer Geomorphometrie, ihres Substrats und ihres aktuellen Prozessgefüges charakterisiert werden.

Da in beiden Gebieten Gletscher vorhanden sind, die ihre Umgebung stark geprägt haben, ist ein weiteres Ziel die Entwicklung des jeweiligen Gletschers zu rekonstruieren und vorzustellen. Dabei soll zusätzlich beim Turtmangletscher auf die Veränderung seines direkten Vorfelds in den letzten Jahren eingegangen werden.

### 1.2 Forschungsstand

Die geomorphologische Kartographie blickt inzwischen auf eine fast 100-jährige Geschichte zurück. Seit den ersten Karten von Gehne (1912) und Passarge (1914) sind im internationalen und nationalen Rahmen neue Kartierlegenden entwickelt worden. Trotz einiger Versuche existiert bis heute keine einheitliche, international akzeptierte geomorphologische Legende. Vielmehr sind verschiedene nationale und regionale Kartierschlüssel vorhanden, so z.B. in den Niederlanden, Frankreich, Ungarn, Russland, Polen, Schweden und Deutschland. Die in dieser Arbeit verwendete deutsche Kartierlegende GMK 25 wurde in ihrer letzten Fassung 1980 von Leser &

## 1 Einleitung

Stäblein veröffentlicht. Das zweite genutzte Kartiersystem GMK Hochgebirge wurde von Kneisel et al. (1998) als eine Vereinfachung der GMK 25 für das komplizierte Relief im Hochgebirge entwickelt. Die GMK 25 Legende wurde im Rahmen des Schwerpunktprogramms „geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland“ in unterschiedlichen Maßstäben und Gebieten getestet (vgl. z.B. Fischer 1984; Leser & Zollinger 1987; Mani & Kienholz 1988). Die GMK Hochgebirge wurde bisher kaum angewendet (Kneisel & Tressel 2000). Ein direkter Vergleich der beiden Kartierlegenden im gleichen Untersuchungsgebiet wurde meinem Wissen nach bisher nicht durchgeführt. Diese Lücke soll in dieser Arbeit geschlossen werden.

Durch neue technische Entwicklungen z.B. in der Handhabung großer Datenmengen und die Einführung von Geoinformationssystemen (GIS) bieten sich auch der geomorphologischen Kartographie neue Möglichkeiten. Höhenmodelle erlauben eine realistische Darstellung des Reliefs und die Ableitung geomorphometrischer Daten. Das deutsche Kartiersystem ist für die Verwendung in einem GIS geeignet (vgl. z.B. Otto & Dikau 2004), es existiert aber keine neuere Arbeitsvorschrift, die die technischen Entwicklungen mit einbezieht.

Die in dieser Diplomarbeit erstellten Karten vereinen sowohl die traditionellen Kartierlegenden als auch neue digitale Fernerkundungsdaten.

Das erste Untersuchungsgebiet, das Vorfeld des Turtmangletschers ist bereits in verschiedenen geomorphologischen Arbeiten berücksichtigt worden (vgl. Kapitel 4.1.3.) Das gesamte Turtmantal, in dessen südlichem Ende sich der Gletscher befindet, wurde vollständig im Maßstab 1:25.000 von Otto (2001) (Otto & Dikau 2004) geomorphologisch kartiert und ist auch als WebGis im Internet verfügbar (aufrufbar unter <http://www.giub.uni-bonn.de/otto/>). Karten über die Gletscherstände des Turtmangletschers zwischen 1850 und 1986 existieren von Tscherrig (1965) und Eybergen (1986), neuere Gletscherstände und vorhandene Moränen wurden von Wolff (2006) kartiert. Eine detailliertere vollständige geomorphologische Kartierung des Gletschervorfelds im Endmaßstab 1:10.000 wurde vor dieser Arbeit noch nicht durchgeführt.

Das zweite Kartiergebiet, die Rinderalpji im Mattertal wurde bisher meinem Wissen nach nicht geomorphologisch untersucht. Neben den Arbeiten von Gruber und Hoelzle (2001), die die Permafrostverbreitung im Mattertal modelliert haben, finden

## 1 Einleitung

im südlichen Gebiet Untersuchungen zum Felspermafrost statt (Krautblatter & Hauck submitted). Die geomorphologischen Kartierungen im Maßstab 1:5.000 in dieser Arbeit zeigen, dass es sich um ein sehr interessantes alpines Gebiet handelt und weitere Untersuchungen sinnvoll und aufschlussreich wären.

## 2 Theoretischer Hintergrund

### 2.1 Hochgebirge

Die beiden in dieser Arbeit behandelten Untersuchungsgebiete befinden sich in den Schweizer Alpen. Nach Troll (1966) sind die Alpen ein klassisches Beispiel für ein Hochgebirge. In den folgenden Abschnitten soll dargelegt werden, wie Hochgebirge definiert werden können und welche Probleme bei der Abgrenzung existieren. Abschließend werden kurz die Besonderheiten aufgezeigt, die Hochgebirge von ihrem Umland unterscheiden und die sie als ergiebige Untersuchungsgebiete kennzeichnen.

#### 2.1.1 Begriffsdefinition Hochgebirge

Es gestaltet sich schwierig den Begriff Hochgebirge zu definieren und abzugrenzen. Eine geeignete Definition muss viele verschiedene Gebiete in unterschiedlichen Klimazonen einschließen. Eine bekannte Begriffsbestimmung stammt von Troll (1966, S. 145): „Hochgebirge sind Gebirge, die sich in dem jeweiligen Klimagürtel zu solcher Meereshöhe erheben, daß sie den Formenschatz, das Pflanzenkleid, die Verwitterungsböden und den Landschaftscharakter annehmen, die man mit der ursprünglich in den Alpen gewonnenen Vorstellung eines Hochgebirges verbindet. Dazu gehört, daß sich die Gebirge über die obere Grenze des Waldes und Baumwuchses erheben; weiter, daß sie in der Eiszeit bzw. in den Eiszeiten über die damalige Schneegrenze aufragten, so daß sich der an den nivalen Klimabereich gebundene Formenschatz ausbilden konnte; schließlich, daß in der heutigen Landschaft durch eine starke Wirkung der Bodengefrorenis der mechanische Gesteinszerfall, die Strukturbodenbildung und die solifluidale Bodenabtragung flächenhaft wirksam werden können.“

Troll nennt in seiner Definition keine absolute Höhe, die ein Hochgebirge auszeichnet. Auch andere Autoren sind der Meinung, dass die Höhe nur ein zusätzliches Attribut sein kann, als Definition aber ungeeignet ist (vgl. Rasemann 2004). Dies liegt daran, dass z.B. die Vegetationsgrenze von 5000m in den Trockengebieten, bis auf Meeresspiegelhöhe in den hohen Breiten reicht (Troll 1966).

Für die Abgrenzung von Hochgebirgen wird die Baum- und Waldgrenze herangezogen, die in den mittleren Breiten als ein verlässliches Abgrenzungsmerkmal angesehen wird. In den Alpen liegt sie zwischen 1500m in den ozeanisch geprägten Gebie-

## 2 Theoretischer Hintergrund

ten, und 2300m in den zentralen Bereichen. In den Tropen kann diese Abgrenzung problematisch sein. Dort ist die Baumgrenze häufig durch zu große Trockenheit bedingt (Troll 1966). Zusätzlich ist zu beachten, dass die Waldgrenze durch menschliche Einflüsse herabgesetzt werden kann.

Als weiteres Kriterium in Trolls Hochgebirgsdefinition wird das Aufragen über die eiszeitliche Schneegrenze genannt. Dies hat in allen Hochgebirgen zu ähnlichen Reliefformen geführt, die durch die unterschiedlichen Einflüsse der jeweiligen geographischen Breite jedoch modifiziert werden. Charakteristische Formen sind u. a. Kare, Trogtäler, Grate und Gipfel. Zusätzliche Merkmale sind die starke Schuttproduktion und das gemeinsame Vorkommen von nacktem Fels und schuttbedeckten Hängen. Die Grenze des periglazialen Bodenabtrages ist das dritte von Troll verwendete Kriterium. Er geht davon aus, dass die Böden der Hochgebirge alle einer „bodenkundlich-geomorphologischen Dynamik“ unterliegen (Troll 1966). Das bedeutet, dass in den Bereichen unterhalb der Schneegrenze Prozesse der physikalischen Verwitterung, der Schuttbildung und des Materialtransports unter starker Einwirkung von Frost und Frostwechseln vorherrschen. Diese erzeugen charakteristische Formen wie z.B. Frostmusterböden, Solifluktionsloben und Blockgletscher (Rasemann 2004). Die Untergrenze der Zone des periglazialen Bodenabtrags liegt in den randlichen Bereichen der Alpen zwischen 1700 und 2000m und in den Zentralalpen bei 2200m Der Vorteil dieser Untergrenze liegt darin, dass sie nicht auf eine bestimmte Klimazone begrenzt ist (Troll 1966).

Jentsch und Liedtke (1980) sind der Meinung, dass die Definition von Troll nicht ausreicht, da sonst beispielsweise auch die höheren Bereiche der Vogesen und des Schwarzwalds zu den Hochgebirgen gehören würden, die jedoch normalerweise den Mittelgebirgen zugeordnet werden. Zusätzlich kritisieren sie, dass Troll nur Gebiete oberhalb der Waldgrenze erfasst und somit die subnivale Stufe zum Forschungsgegenstand wird. Die Autoren schlagen aus diesem Grunde folgende Ergänzungen zur Begriffsbestimmung von Troll vor:

- Hochgebirge bestehen aus Voll- und Hohlformen und besitzen eine Reliefenergie von mehr als 1500m.
- Flache Altformen sind weitgehend aufgezehrt.
- Es treten Grate, Gipfelpyramiden und Hörner auf.

## 2 Theoretischer Hintergrund

- Es ist ein steiles Relief mit mehr als 30° vorhanden und es existieren Hangschutthalden.
- Hochgebirge zeichnen sich durch mehrere übereinander liegende Höhenstufen aus.
- Es herrscht ein raueres Klima im Vergleich zum Umland. (Jentsch & Liedtke 1980)

Insgesamt ist an diesen Ausführungen zu sehen, dass eine allumfassende Definition von Hochgebirgen kaum möglich ist und dass je nach Fragestellung der Fokus auf verschiedene Charakteristika gelegt werden muss. Da jedoch die Alpen die vorgestellten Eigenschaften besitzen und auch von Troll (1966) expliziert als Hochgebirge genannt werden, sind die in dieser Arbeit untersuchten Gebiete ebenfalls als Hochgebirge anzusehen.

### 2.1.2 Besonderheiten von Hochgebirgen

Hochgebirge können interessante Räume sein. Sie können z. B. auf den Urlauber in den Alpen anziehend schön wirken, weil sie Erholung bringen und das Gefühl von Freiheit vermitteln. Für den Bewohner im Tal dagegen können sie drohend und gefährlich erscheinen, wenn ständig Lawinen oder Murgänge das eigene Haus gefährden.

In Gebirgsräumen laufen intensivere Prozesse als im Umland ab, da Strahlung, Temperatur und Niederschlag aufgrund der höheren Reliefenergie intensivere Prozesse, z.B. Murgänge, Solifluktion und Lawinen verursachen. Die aufgrund der Höhe intensivere Strahlung erfordert Anpassungsmechanismen der Vegetation. In Hochgebirgen existieren verstärkte Expositionsunterschiede zwischen Nord- und Südhänge, die die ablaufenden Prozesse beeinflussen. Die Temperatur wird mit zunehmender Höhe geringer, und es herrschen je nach Breitengrad Tages- oder Jahreszeitenklimate vor, die die vorhandenen Prozesse beeinflussen. Die Temperatur bestimmt die Intensität der Frostwechsel, die die Verwitterung von Gesteinsmaterial und das Vorhandensein von Permafrost und Gletschern steuern. Gebirge sind orographische Hindernisse für die allgemeine Zirkulation in der Atmosphäre und sind somit häufig niederschlagsreicher als ihr Umland. Dabei ist zu beachten, dass innerhalb eines Hochgebirges eine große Variabilität durch Relief, Höhe und Exposition vorherrscht. Ein weiteres Zeichen für eine hohe Vielfalt ist die ausgeprägte vertikale Höhenstufung der Vegetati-

## 2 Theoretischer Hintergrund

on, des Klimas und der vorherrschenden Prozesse, die im größeren Maßstab in den verschiedenen Klimazonen der Erde vorhanden sind (Stahr & Hartmann 1999). Insgesamt liegt in den Hochgebirgen eine große Variabilität auf kleiner Fläche vor, dass diese zu lehrreichen, aber auch komplizierten Untersuchungsgebieten machen.

### 2.2 Systeme im Hochgebirge

Nachdem vorgestellt wurde, wie Hochgebirge definiert werden können, soll in den folgenden Abschnitten näher auf die in alpinen Gebieten ablaufenden Prozesse und die vorhandenen Formen eingegangen werden. Dazu werden zuerst systemtheoretische Grundlagen betrachtet, die ein übergeordnetes Konzept wissenschaftlicher Untersuchung bilden. Anschließend werden konkrete Systeme näher betrachtet. Dabei soll der Fokus auf Prozessen und Formen im Gletschervorfeld liegen. Die Veränderungen in der Umgebung abschmelzender Gletscher werden ebenfalls verstärkt dargestellt, da die Ausdehnung der Gletscher in den europäischen Alpen und damit auch in den in dieser Arbeit untersuchten Gebieten zurück geht.

#### 2.2.1 Systeme in der physischen Geographie

In den folgenden Ausführungen soll nach einem kurzen geschichtlichen Abriss der Entwicklung der Systemtheorie in der Physischen Geographie zunächst der Begriff „System“ definiert werden. Anschließend werden funktionale und strukturelle Klassifikationen von Systemen vorgestellt. Zuletzt soll diskutiert werden, welchen Nutzen systemtheoretische Ansätze für die Physische Geographie besitzen und wie Veränderungen in Systemen betrachtet werden können.

Der Begriff „System“ tauchte das erste Mal im 17. Jahrhundert mit der Entwicklung der modernen Wissenschaft auf (Inkpen 2005). In den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts stellte der Biologe Von Bertalanffy einen Entwurf zur generellen Systemtheorie vor (Von Bertalanffy 1951). In den Fokus der Physischen Geographie rückte die Theorie erstmals mit einem Aufsatz von Strahler (1958), der den Systemansatz von Von Bertalanffy auf Arbeiten in der fluvialen Geomorphologie übertrug. (Chorley & Kennedy 1971). 1971 formalisierten Chorley und Kennedy den Systemansatz für die Physische Geographie in einem Buch, welches als Grundlage für die Vorstellung der unterschiedlichen Systemklassifikationen in dieser Arbeit dienen soll.

## 2 Theoretischer Hintergrund

Die Hauptbestandteile eines Systems sind Objekte oder Variablen, die durch funktionale Beziehungen verbunden sind (vgl. Abbildung 2-1). Ein System hat in der Regel eine definierte Grenze, zeichnet sich aber auch durch Beziehungen zu anderen Systemen über die eigene Grenze hinweg aus.

Ein System soll sich von einem Modell unterscheiden, das als abstrakte und unkomplette Version der Realität gesehen werden kann und einem bestimmten Zweck dienen soll. Ein System dagegen ist eine Abstraktion der Realität und soll diese universell widerspiegeln (Inkpen 2005).

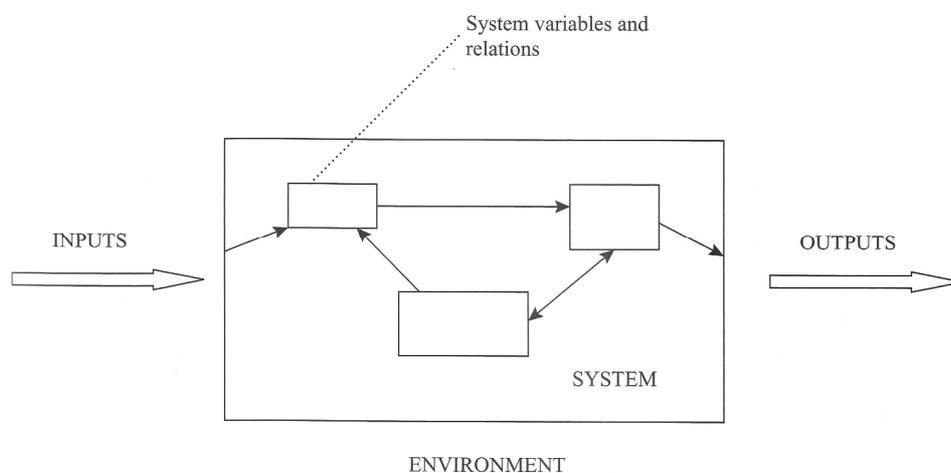


Abbildung 2-1: Darstellung eines vereinfachten Systems (aus Inkpen 2005).

Chorley und Kennedy (1971) zeigen, dass verschiedene Möglichkeiten zur Klassifikation von Systemen existieren, so können z.B. in einer funktionalen Unterteilung drei Systemtypen unterschieden werden:

### 1. Isolierte Systeme

Isolierte Systeme beziehen weder Energie noch Masse von außerhalb ihrer Grenzen. Sie kommen normalerweise unter Laborbedingungen vor und dienen zur Untersuchung der Wirkungen, die externe Einflüsse auf die Komponenten des Systems besitzen.

### 2. Geschlossene Systeme

Geschlossene Systeme zeichnen sich durch eine Begrenzung aus, die für Energie, nicht aber für Masse durchlässig ist. Die Erde mit ihrer Atmosphäre kann als geschlossenes System angesehen werden.

## 2 Theoretischer Hintergrund

### 3. Offene Systeme

Die meisten natürlichen Systeme sind offene Systeme, in denen sowohl Masse als auch Energie mit der Umwelt ausgetauscht wird. Durch den Durchfluss von Energie und Masse kann ein bestimmter hierarchischer Aufbau beibehalten werden und es wird verhindert, dass das System einer maximalen Entropie zustrebt.

Die zweite Möglichkeit Systeme einzuteilen sehen Chorley und Kennedy (1971) in einer strukturellen Klassifikation, die auf der internen Komplexität der jeweiligen Systeme beruht. Sie unterscheiden elf verschiedene Systemtypen, von denen sie die folgenden vier als wichtig für die Physische Geographie erachten:

#### 1. Morphologische Systeme

Morphologische Systeme bilden die physikalischen Eigenschaften von Systemen ab, beispielsweise ihre Geometrie, ihre Zusammensetzung oder ihre Stärke. Die Zeit bleibt dabei unberücksichtigt, weswegen Ahnert (1996) diesen Systemtyp auch als „statisches System“ bezeichnet. Ahnert unterteilt die statischen Systeme zusätzlich in Form-, Material und Form-/Materialsysteme. Im Vordergrund steht dabei die regelhafte Assoziation von Material und/oder Formen, wie das zum Beispiel bei einer Felswand in Verbindung mit einer Schutthalde der Fall ist.

#### 2. Kaskadensysteme

Kaskadensysteme werden von Chorley und Kennedy (1971) als eines der wichtigsten dynamischen Systeme gesehen. In diesen Systemen ist der Output eines Subsystems der Input eines anschließenden Subsystems. Regler spielen eine große Rolle, da sie entweder zu einer Speicherung des Inputs führen oder diesen sofort in ein weiteres Subsystem leiten können. Die Feuchte eines Bodens entscheidet beispielsweise unter anderem darüber ob ein Niederschlag aufgenommen werden kann oder ob Oberflächenabfluss entsteht. Regler können verwundbare Punkte für den menschlichen Eingriff sein oder Kontaktpunkte mit morphologischen Systemen repräsentieren.

Kaskadensysteme können in unterschiedlicher Weise untersucht werden. Wird das System als „White Box“ angesehen, so wird versucht so viele Speicher, Prozesse und Regulatoren wie möglich zu identifizieren und zu analysieren. Von einer „Grey Box“ wird gesprochen, wenn nur die Betrachtung einzelner Subsysteme im Vordergrund steht. Bei einer „Black Box“ wird das gesamte System als Einheit betrachtet. Allein der Input in das System und der Output stehen im

## 2 Theoretischer Hintergrund

Vordergrund.

Ahnert (1996) schlägt für den Begriff Kaskadensystem den Begriff Prozesssystem vor, da die ablaufenden Prozesse nicht immer einer Kaskade im eigentlichen Sinne entsprechen. Er betont zusätzlich, dass die Zeit in diesem Systemtyp eine Rolle spielt.

### 3. Prozessresponsssysteme

Prozessresponsssysteme bestehen aus einer Verschneidung eines morphologischen Systems mit einem Kaskadensystem. Die Verbindung besteht durch morphologische Stadien, die sich entweder mit den Speichern oder den Regulatoren des Kaskadensystems überschneiden oder eng mit ihnen korrelieren. Die beiden Systemtypen sind häufig durch negative Rückkopplung verbunden. Dies hat zur Folge, dass eine Veränderung im System Kräfte hervorruft, die diese Veränderung wieder abschwächt. Verwittert beispielsweise ein Hang und bildet sich an diesem eine Schutthalde, so verhindert die Schutthalde mit ihrer Bedeckung des Hangs eine weitere Verwitterung und es stellt sich nach einer gewissen Anpassungszeit ein neuer Gleichgewichtszustand ein, wenn es nicht zu weiteren Störungen des Systems kommt. Mit positiver Rückkopplung werden dagegen sich selbstverstärkende Verbindungen bezeichnet. Nimmt die Infiltrationskapazität eines Bodens an einem Hang ab, so nimmt der Oberflächenabfluss zu und verstärkt die Erosion des Hanges. Dies führt wiederum zu einer Abnahme der Infiltrationskapazität, da der Boden geringmächtiger wird. Eine typische Folge wäre dabei die letztendlich die Selbstzerstörung des Systems.

### 4. Kontrollsysteme

Prozessresponsysteme besitzen häufig Schlüsselvariablen oder „Ventile“, an denen eingegriffen werden muss, um Veränderungen zu produzieren. Wenn der Mensch direkt oder indirekt in diese Systeme eingreift, so handelt es sich um ein Kontrollsystem. Die Besonderheit an diesem System ist, dass sozioökonomische Systeme mit dem physischen Prozessresponsystem interagieren und die Schlüsselvariablen kontrollieren.

Vorteile der Systemtheorie liegen darin, dass die formalen Eigenschaften eines Systems für verschiedene Wissenschaften gleichartig sind, auch wenn die Inhalte anders gefüllt werden (Ahnert 1996). Dies kann die Verständigung zwischen verschiedenen Wissenschaften erleichtern. Chorley und Kennedy (1971) legen

## 2 Theoretischer Hintergrund

beispielsweise darauf Wert, dass der Dialog zwischen Physischer Geographie und der Humangeographie erleichtert wird. Daneben ermöglicht die Betrachtung eines Systems, dass sich die Forschung nicht auf eine Untersuchungseinheit fokussiert, sondern dass die gesamten Beziehungen dieser Einheit zu anderen betrachtet werden können. Das Denken wird durch die Systemtheorie in eine bestimmte Richtung gelenkt und kann auch formal repräsentiert werden. Auch für die Verständigung zwischen den einzelnen Fachbereichen innerhalb der Physischen Geographie ist dies von Vorteil. Insgesamt hat kein anderer Ansatz einen so großen Einfluss auf das holistische und universelle Verständnis der physischen Realität gehabt.

Auch wenn Systeme häufig als eine Darstellung der Realität betrachtet werden, sollte bedacht werden, dass sie häufig nur das zeigen, was der Forscher als wichtig empfindet (Inkpen 2005).

Abschließend soll noch kurz darauf eingegangen werden, wie das Verhalten von geomorphologischen Systemen betrachtet werden kann.

Bis heute ist das wissenschaftliche Denken in der Physischen Geographie durch die Vorstellung an lineare Veränderungen in Systemen dominiert. Es wird davon ausgegangen, dass schwache Einflüsse auch nur schwache Veränderungen zur Folge haben, doppelte Einflüsse sollen zu einer Verdopplung im Ergebnis führen. Negative Rückkopplungen führen zu einer Unterdrückung starker Abweichungen von der Norm. In der linearen Welt besteht die Idee, dass alles auf einen Gleichgewichtszustand zustrebt und das Systemverhalten somit vorhersagbar ist (Thornes 2003). Ahnert (1994) kritisiert, dass viele verschiedene Diskussionen von Gleichgewicht existieren. Er unterscheidet zwischen Gleichgewicht, welches herrscht, wenn der Materialaustrag zwischen Zeit- und Raumeinheit dem Materialeintrag entspricht und einem dynamischen Gleichgewicht, welches durch die Selbstregulierung der einwirkenden Kräfte erhalten wird (negative Rückkopplung). Die Tendenz zum dynamischen Gleichgewicht sieht er in allen Prozessresponsssystemen.

Die Erkenntnis, dass in geomorphologischen Systemen Schwellenwerte existieren und der Output von Energie und Material nicht proportional zum Input ist, führte Phillips (1992) zu der Frage, ob Gleichgewichte überhaupt existieren. Er kommt zu dem Schluss, dass ein Gleichgewichtszustand nicht die Norm eines Systems ist, sondern nur in beschränkten räumlichen und zeitlichen Skalen vorkommt. Zusätzlich dient das Gleichgewicht als ein Attraktor, dem sich ein System annähert, den es aber

## 2 Theoretischer Hintergrund

nie erreicht.

Nichtlineares Verhalten und emergente Eigenschaften wurden lange Zeit als „Noise“, als nicht erklärbare, unwichtige Abweichungen der Daten gesehen. Inzwischen wurde erkannt, dass zum Verständnis dieses Verhalten neue Ansätze notwendig sind (Richards 2002). Als Beispiel für Komplexität in der physischen Geographie können deterministische Chaos, Selbstorganisation und selbst organisierte Kritizität (SOC) gesehen werden (Richards 2002). Die Akzeptanz des Vorhandenseins von Nichtlinearität und Komplexität fällt vielen Wissenschaftlern schwer, da konkrete Vorhersagen des Systemsverhaltens nicht mehr möglich sind. Phillips (2003) zeigt in seinem Aufsatz, dass es bereits viele Ansätze in der Geomorphologie gibt, die sich mit Nichtlinearität beschäftigen (z.B. Schwellenwerte, Speichereffekte, Rückkopplungen, multiple Gleichgewichte...). Neuere Konzepte in der Geomorphologie beschäftigen sich mit der Resilienz (Holling 1973), also damit, welche Intensität Einflüsse auf ein System besitzen müssen, um von diesem nicht mehr absorbiert werden zu können und einem neuen Attraktor zuzustreben.

### 2.2.2 Das Talgletschersystem

Nachdem auf die allgemeinen systemaren Grundlagen eingegangen wurde, sollen nun konkret Systeme im Hochgebirge betrachtet werden.

Unter dem Begriff des Talgletschersystems werden Sedimente und Formen zusammengefasst, die durch Talgletscher in Hochgebirgen entstehen (Boulton & Eyles 1979; Eyles 1983). Eyles (1983) unterteilt das Talgletschersystem in weitere Ebenen. Landelemente sind dabei die kleinsten Entitäten und bestehen aus einheitlichen Formen und Materialien. Auf einer höheren Ebene bilden ähnliche Landelemente zusammen so genannte „land facets“, die wiederum Teile des Talgletschersystems bilden. Harrison nutzt diesen Ansatz, um zu zeigen, dass die Beziehungen zwischen Formen verschiedener Ebenen wichtig sind und als emergente Systemeigenschaften zu betrachten sind (Harrison 2005).

Talgletscher entwickeln sich dadurch, dass bei großem Schneeüberschuss aus einem Kar eine Gletscherzunge herausfließt und einer bereits vorhandenen Tallinie folgt (Ahnert 1996). Nach Benn et. al (2005) handelt es sich bei einem Talgletschersystem um ein umfassendes System, welches nicht nur das glaziale System im engeren Sinne beschreibt, sondern auch subraglaziale, subglaziale, proglaziale, paraglaziale und pe-

## 2 Theoretischer Hintergrund

periglaziale Systeme mit einbezieht. Auch wenn es große Unterschiede zwischen Talgletschersystemen gibt, so existieren auch Gemeinsamkeiten, die aus dem starken Einfluss des Reliefs auf die Form des Gletschers, auf den Sedimenttransport und auf die Akkumulation resultieren. Die Menge des Schutts, der von den Hängen in das Gletschersystem kommt, spielt eine große Rolle für die Verfügbarkeit von Sediment und deswegen auch für die Prozesse und Formen.

Die Vorteile den Ansatz des Talgletschersystems zu nutzen liegen darin, dass eine holistische Betrachtung erfolgen kann. Dies ist unter anderem auch für die in dieser Arbeit durchgeführte Kartenerstellung notwendig.

In den folgenden Abschnitten soll auf die Subsysteme des Talgletschersystems eingegangen werden. Es werden glaziale Systeme im engeren Sinne, proglaziale, paraglaziale und periglaziale Systeme näher betrachtet.

### 2.2.2.1 Das glaziale System

Dieses System wird in den höchsten Gebieten der Gebirge angetroffen und zeichnet sich durch die Erosion, Akkumulation und den Transport von Material durch Eis aus. Der Schutt stammt aus gravitativen Massenbewegungen von den umliegenden Hängen und aus der Erosionsleistung des Gletschers selbst (Barsch & Caine 1984). Die Menge des Materials von den Hängen ist von dem vorhandenen Relief, der Verteilung der Sedimentquellen und den Gesteinsarten abhängig (Benn, et al. 2005). Barsch und Caine (1984) gehen davon aus, dass das glaziale System effektiv im Sedimenttransport bis zu den Gletscherrändern ist, an denen charakteristische Formen akkumuliert werden und Verbindungen zum fluvialen System hergestellt werden können. An Rändern schuttreicher Gletscher im Hochgebirge können große Moränenkomplexe abgelagert werden, die den Gletscher an erneuten Vorstößen hindern können. Bleiben große Moränenwälle bestehen, so liegt das an der geringen Kopplung zum fluvialen System, das eine zu geringe Transportkapazität aufweist. Diese Entkopplung des fluvialen und des glazialen Systems ist häufig in Hochgebirgen anzutreffen. Große Endmoränen können zu einem späteren Zeitpunkt dadurch zerstört werden, dass der Gletscher sie bei einem Vorstoß an Schwachstellen durchbricht. Daraus kann ein Gletscher mit mehreren Loben („Breach-lobes“) entstehen (vgl. Abbildung 2-2).

## 2 Theoretischer Hintergrund

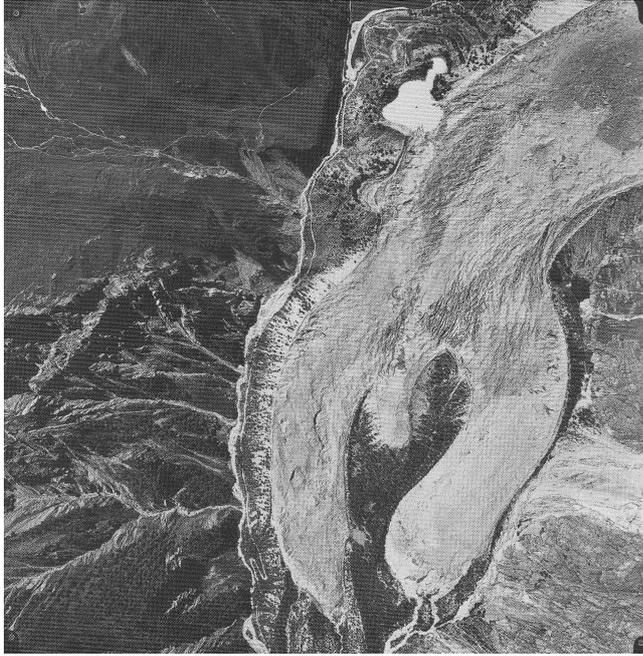


Abbildung 2-2: "Breach-Lobes" des Miage Gletschers in Italien. Nachdem der Gletscher zuerst durch seine eigene Endmoräne gestaut wurde, kam es bei einem erneuten Vorstoß zum Durchbruch dieser an mehreren Stellen (aus Benn, et al. 2005).

Ist die Sedimentzufuhr geringer und/oder besteht eine gute Kopplung zum fluvialen System so entwickeln sich selten größere Moränen, die nicht selten als durchgehender Wall im Gletschervorfeld anzutreffen sind (Benn, et al. 2005).

Neben diesen Akkumulationsformen existieren auch typische Erosionsformen in vergletscherten Gebieten. Dazu gehören beispielsweise Trogtäler, Hängetäler, Rundhöcker, Kare, aber auch Gletscherschrammen (Ahnert 1996).

### 2.2.2.2 Das proglaziale System

Als Input in ein proglaziales System kann der vom Gletscher abgelagerte Schutt gesehen werden. Dieser wird durch fluviale, glaziolakustrine und äolische Prozesse umgearbeitet und weiter transportiert (Benn, et al. 2005). Neben glazigenem Material sind weitere Inputs in das glaziale System gravitative Massenbewegungen und äolisch transportiertes Material, sowie die Abgabe von Schmelzwässern aus dem Gletscher.

Das den Gletscher verlassende Wasser zeigt charakteristische Abflussschwankungen sowohl auf einer täglichen, als auch auf einer jährlichen Skala. Im Tagesverlauf kommt es zu Veränderungen der Abflussmenge, da die Lufttemperatur ansteigt und dadurch mehr Eis geschmolzen und als Wasser abgegeben werden kann. Abflussspit-

## 2 Theoretischer Hintergrund

zen entstehen häufig mehrere Stunden nach der Höchsttemperatur, da das Wasser Zeit benötigt um durch das Kanalsystem im Gletscher zu fließen. Gegen Ende der Auftausaison wird die Verzögerungszeit geringer, da die Kanäle innerhalb eines Gletschers besser ausgeprägt sind, wenn dieser sie nicht durch zu starke Bewegungen zerstört. Zusätzlich existieren außerhalb des Äquators, saisonale Schwankungen der Schmelzwässer. Im Winter sind die Abflüsse in der Regel gering, sie nehmen aber mit zunehmender Ablation im Jahresverlauf zu. Neben diesen regelmäßigen Schwankungen können große Wetterereignisse, Veränderungen der englazialen und subglazialen Wasserleitbahnen oder das Stauen von Wasser durch Eis zu veränderten Abflussganglinien führen. Langfristige Modifikationen sind eine Folge des Klimawandels (Benn & Evans 1998).

Die Veränderungen im Abfluss haben zur Folge, dass proglaziale fluviale Systeme auch eine variable Sedimenttransportkapazität besitzen. In Zeiten mit geringem Abfluss können Sedimente abgelagert werden und dadurch Sandbänke entstehen, die in Zeiten mit hohem Abfluss wieder erodiert werden können. Die Sandbänke beeinflussen andererseits wieder das Abflussverhalten. Dies zeigt, dass die ablaufenden Prozesse und die vorhandenen Formen miteinander rückgekoppelt sind. (Lane & Richards 1997) Das Verhalten des Systems ist somit von vorhergehenden Systemzuständen abhängig, was als Pfadabhängigkeit (vgl. z.B. Dikau 2006) bezeichnet wird.

Wird das Verhalten von fluvialen Systemen im gesamten Gletschervorfeld betrachtet, so kann die Entstehung von Sandern, oder bei gröberem Material, wie es in alpinen Gebieten üblich ist, die Entstehung von Schotterfeldern beobachtet werden. Bei vorstoßenden oder stationären Gletschern mit einem hohen Abfluss ist die Verbindung zwischen dem glazialen und dem proglazialen System stark ausgeprägt. Wird das vom Gletscher bereitgestellte Material effektiv umverteilt, so können ganze Täler aufgeschottert werden und als Sedimentspeicher dienen. Wenn sich ein Gletscher zurückzieht, so kann die Sedimentzufuhr in das Gletschervorfeld gestört sein. Es kann ein See mit Eiskontakt entstehen, der Material auffängt, Hänge können durch Vegetation stabilisiert werden und die Sedimentspeicher, z.B. in Form von Moränen, können erodiert sein. Weiterhin kann die abnehmende Sedimentfracht dazu führen, dass sich die Gletscherbäche in das Gletschervorfeld einschneiden und es zur Terrassenbildung kommt (Benn, et al. 2005).

## 2 Theoretischer Hintergrund

Auch äolische Prozesse können im freigelegten Gletschervorfeld leicht die in den Sedimenten vorhandenen tonigen, schluffigen oder feinsandigen Korngrößen ausblenden und an anderer Stelle erneut abgelagern (Benn, et al. 2005).

### 2.2.2.3 Das paraglaziale System

Durch den Rückzug eines Gletschers in einem Talgletschersystem werden Oberflächen und Speicher frei, die vorher durch den Gletscher bedeckt oder gestützt wurden. Glaziale Prozesse treten in den Hintergrund, fluviale, äolische, gravitative und hangaquatische Prozesse beginnen sich einem neuen Gleichgewicht anzunähern und verändern das ehemals vergletscherte Gebiet (Ballantyne 2005; Benn & Evans 1998). Um die herrschenden Prozesse genauer zu charakterisieren, führen Church und Ryder (1972) den Begriff „paraglazial“ ein. Sie verstehen darunter: „nonglacial processes that are directly conditioned by glaciation“. Zu diesen Prozessen gehören sowohl proglaziale Prozesse als auch die Prozesse, die als direktes Ergebnis der ehemaligen Vergletscherung in und um Bereiche früherer Gletscher auftreten (Church & Ryder 1972). Ballantyne (2005, S. 432) erweitert das Konzept von Church und Ryder und fasst unter dem Begriff paraglazial „non-glacial earth surface processes, sediment accumulations, landforms, landsystems and landscapes that are directly conditioned by glaciation and deglaciation“ zusammen. Somit sollen nicht nur Prozesse, sondern auch Materialien und Formen berücksichtigt werden. Church und Ryder gehen davon aus, dass die Zeitspanne in der paraglaziale Prozesse wirken, begrenzt ist. Sie definieren eine paraglaziale Periode als die Zeitspanne in der paraglaziale Prozesse auftreten (Church & Ryder 1972). Ballantyne (2005, S. 432) versteht darunter „the timescale over which a glacially conditioned sediment source either becomes exhausted or attains stability in relation to particular reworking processes“. Er erläutert mit dieser Definition die Gründe für das Ende einer paraglazialen Periode, definiert die Zeit aber nicht genauer. Dies ist auch gar nicht möglich, da die Anpassungszeit an nicht-glaziale Bedingungen in einzelnen Gebieten, aber auch in den diversen Systemkomponenten stark variiert (Ballantyne 2002). Die in paraglazialen Gebieten ablaufenden Prozesse, beispielsweise gravitative Massenbewegungen oder fluviale und äolische Prozesse, sind nicht auf diese paraglazialen Bereiche beschränkt, sondern kommen vielmehr in vielen geomorphologischen Systemen vor. Paraglaziale Systeme können somit weder durch die Periode der paraglazialen Formanpassung, noch durch die vorherrschenden Prozesse gekennzeichnet werden. Charakteristisch

## 2 Theoretischer Hintergrund

dagegen sind für sie, dass durch den Rückzug von Gletschern instabile oder metastabile Sedimentespeicher freigesetzt werden, die durch verschiedene Prozesse in verschiedenen Zeitskalen erschlossen und umgearbeitet werden können. Es steht in paraglazialen Systemen mehr Material zur Verfügung, als in von Gletschern unbeeinflussten Gebieten (Ballantyne 2005).

Wird von einem linearen Systemverständnis ausgegangen, so kann angenommen werden, dass der erhöhte Sedimentaustrag aus dem paraglazialen System mit der Zeit geringer wird. Dies kann nur der Fall sein, wenn klimatische, tektonische oder anthropogene Einflüsse konstant bleiben. Verändern sich aber die Rahmenbedingungen, so kann der Sedimentaustrag, beispielsweise durch ein klimatisches Extremereignis, wieder ansteigen, da stabilisierte Speicher wieder destabilisiert werden. Ballantyne (2005) geht davon aus, dass auch nach Abschluss der paraglazialen Periode externe Einflüsse zu einer Remobilisierung von glazialen Sediment führen können (vgl. Abbildung 2-3).

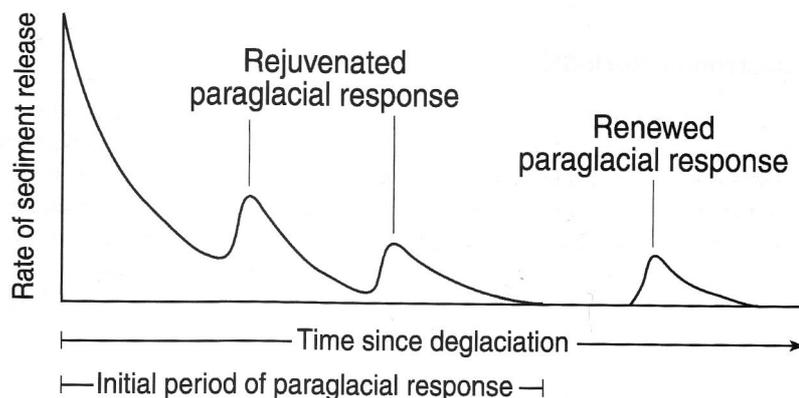


Abbildung 2-3: Reaktivierung des paraglazialen Sedimentaustrags durch externe Prozesse (aus Ballantyne 2005).

Neben den externen Einflüssen können systeminterne Eigenschaften, beispielsweise Schwellenwerte oder Selbstorganisierte Kritizität (Bak 1996) zu einer nichtlinearen Reaktion des paraglazialen Systems führen und den Sedimentaustrag unvorhergesehen verändern.

Zur Erleichterung der Erklärung der spezifischen Sediment-Form Assoziationen unterscheidet Ballantyne (2005) sechs paraglaziale Subsysteme: Felshänge, Schutthänge, Gletschervorfelder, alluviale, lakustrine und Küstensysteme. Dabei soll hier der Fokus auf den ersten vier Subsystemen liegen, da die beiden anderen keine oder nur

## 2 Theoretischer Hintergrund

eine untergeordnete Rolle in den in dieser Arbeit behandelten Untersuchungsgebieten spielen.

### 1. Felshänge

Eine Vergletscherung und der Rückzug von Gletschern beeinflusst Felshänge in zweifacher Weise. Einerseits können durch glaziale Erosion Hänge versteilt und verlängert werden. Das führt dazu, dass die Scherspannung erhöht wird. Andererseits wird, während Eismassen auf den Hängen aufliegen, Druck auf diese ausgeübt und die Spannung innerhalb des Gesteins verstärkt. Durch das Abschmelzen eines Gletschers kommt es zur Druckentlastung. Dabei ist eine Erweiterung des Kluftsystems im Gestein möglich. Je nach Kluftdichte, Geologie und Orientierung der Klüfte kann dies verschiedene Folgen (Bergstürze, langsame Sackungen, erhöhte Steinschlagaktivität) haben. Diese Prozesse haben verschiedene Formen und Ablagerungen zur Folge. Sie reichen von Abrisskanten und erweiterten Klüften, bis zu Schuttkegeln und Ablagerungen durch Felsstürze.

Insgesamt werden große Mengen an Sediment geliefert, die durch neue Gletschervorstöße umverteilt werden können, als Ausgangsmaterial für Blockgletscher dienen oder durch fluviale und äolische Prozesse weiter transportiert werden können. Damit bestehen Kopplungen zu glazialen, proglazialen und periglazialen Systemen (Ballantyne 2005).

### 2. Schutthänge

Zieht sich ein Gletscher zurück so bleiben schuttbedeckte Hänge zurück. Das Material stammt häufig aus den Ablagerungen der Seitenmoräne des Gletschers und ist anfällig gegenüber Prozessen wie Muren, Lawinen, Sturzprozessen und linien- und flächenhafter Erosion. Die Zeitspanne, in der die schuttbedeckten Hänge umgearbeitet werden können, ist meistens vergleichsweise kurz und kann zwischen einigen Dekaden und Jahrhunderten schwanken. Typische Formen des paraglazialen Schutthangsystems sind Gullies in oberen Hangbereichen und verschmelzende Schuttkegel am Hangfuß. Oftmals ist es schwierig zwischen glazialen und paraglazialen Sedimenten zu unterscheiden, da sich kaum Differenzen im Zurundungsgrad, in der Textur oder der Form finden lassen. Auch das durch paraglaziale Prozesse umgearbeitete Material kann bei einem erneuten Gletschervorstoß wiederum durch glaziale Prozessen beeinflusst werden (Ballantyne 2005).

## 2 Theoretischer Hintergrund

### 3. Gletschervorfelder

Der Talboden wird bei einem Gletscherrückzug freigelegt und ist, da er nicht durch Vegetation stabilisiert wird, anfällig gegenüber paraglazialen Veränderungen. Oberflächennahe Sedimente werden durch Frostprozesse, wie der Sortierung von Material durch Auffrieren oder durch Solifluktion, modifiziert. Flächenhafte Erosion und der Splash-Effekt durch aufprallende Regentropfen führen zu einer Umverteilung glazialer Sedimente, feinere Partikel können äolisch transportiert werden. Gelangt erodiertes oder umgelagertes Material in den Vorfluter im Gletschervorfeld so besteht eine Kopplung zum proglazialen, fluvialen System. Die vorgestellten Prozesse laufen häufig innerhalb von Dekaden ab (Ballantyne 2005).

### 4. Alluviale Subsysteme

In diesem Subsystem sind drei Hauptformen enthalten. Dabei handelt es sich um Schuttkegel, Schwemmfächer und Talbodenfüllungen. Ballantyne (2005) beschreibt sie als paraglaziale Sedimentspeicher, die aufgrund geringerer Sedimentzufuhr gegen Ende der paraglazialen Periode wieder fluvial zerschnitten werden können. Ihre Bildungsdauer beträgt Jahrhundert bis Jahrtausende.

### 5. Paraglaziale Sedimentation in Seen

In vorhandenen Seen können während der paraglazialen Periode Sedimente abgelagert werden. Dieser Sedimentspeicher kann wiederum Material für fluviale Erosion liefern, da vor allem kleine, leicht erodierbare Korngrößen vorherrschen (Ballantyne 2005).

### 6. Küstensubsysteme

Glaziale Sedimente erreichen die Küste entweder durch fluvialen Transport oder durch die direkte Zufuhr durch den Gletscher. Durch Wellen und Gezeiten wird das Material weiter transportiert und umgearbeitet. Es kann Küstenformen stark beeinflussen. Die Höhe des Meeresspiegels spielt eine wichtige Rolle für die Verfügbarkeit von Sedimenten. Bei einem niedrigen Meeresspiegel kann es sein, dass die Sedimentquelle nicht mehr erreicht wird und sich stabilisieren kann, andererseits kann ein Meeresspiegelanstieg zur Erschließung weiterer Speicher führen (Ballantyne 2005).

Die vorgestellten Subsysteme liegen nicht isoliert voneinander vor, da häufig der Output eines Subsystems der Input in ein anderes ist.

## 2 Theoretischer Hintergrund

Insgesamt soll das paraglaziale Konzept verdeutlichen, dass die heute vorhandenen Formen eines ehemals vergletscherten Gebiets keinesfalls unverändert vorliegen, sondern beim Gletscherrückzug deutliche Modifikationen durch paraglaziale Prozesse erhalten haben. Ballantyne (2005) geht davon aus, dass es kaum glaziale Formen gibt, die immun gegenüber paraglazialen Einflüssen sind. Meist liegen nur Unterschiede in der Stärke der Umarbeitung vor. Das paraglaziale Konzept soll deswegen ebenfalls implizieren, dass die Untersuchung ehemals vergletschelter Gebiete nur erfolgreich sein kann, wenn neben dem glazialen und fluvialen System auch paraglaziale Einflüsse miteinbezogen werden.

### 2.2.2.4 Das periglaziale System

Im Gegensatz zum paraglazialen System ist das Vorhandensein von Gletschern oder einer ehemaligen Vergletscherung in periglazialen Systemen nicht notwendig. French kennzeichnet periglaziale Gebiete „as those in which frost-action and permafrost-related processes dominate“ (French 1996, S. 3). Die ursprüngliche Definition von von Lozinski (1912), der geomorphologische und klimatische Eigenschaften von Gebieten an den Rändern pleistozäner Eisdecken und Gletscher unter dem Begriff periglazial untersuchte, ähnelt dem bereits vorgestellten paraglazialen Konzept. Bereiche, die als periglazial angesehen werden, müssen nicht unbedingt Permafrost aufweisen, obwohl eine hohe Deckung existiert. Als Permafrost wird Lithosphärenmaterial (Boden oder Gestein) definiert, dass mindestens zwei aufeinander folgende Jahre dauerhaft durch Temperaturen von oder unter 0°C charakterisiert wird (French 1996). Je nach Flächenanteil des Permafrosts an der Gesamtfläche wird zwischen kontinuierlichem (>80%), diskontinuierlichem (30-80%) und sporadischen Permafrost (<30%) unterschieden.

Typische Prozesse in periglazialen, alpinen Systemen sind die Bildung von Permafrost, Verwitterung durch Frostwechsel, Solifluktion, Auffrieren und Sortieren von Material und Frosthubb.

Blockgletscher sind Formen periglazialer Systeme, die häufig in den in dieser Diplomarbeit untersuchten Gebieten vorkommen (Nyenhuys 2005; Otto 2006; Roer 2005; Van Tantenhove & Dikau 1990). Das Vorhandensein von Permafrost ist die Voraussetzung für die Bildung von Blockgletschern. Umgekehrt bedeutet dies, dass die Existenz aktiver Blockgletscher Permafrost anzeigt, und zwar in der Regel die Grenze des diskontinuierlichen Permafrosts (Barsch 1996). Weitere Bedingungen für

## 2 Theoretischer Hintergrund

die Bildung von Blockgletschern sind die Verfügbarkeit von eisübersättigtem Material und das Vorhandensein ausreichender Reliefunterschiede, damit ein hangabwärtiges Kriechen des Materials möglich ist. Diese Voraussetzungen finden sich auch in der Blockgletscherdefinition von Barsch (1996, S. 4) wieder: „Aktive Blockgletscher sind loben- oder zungenförmige Körper aus ganzjährig gefrorenem unkonsolidiertem Material, welches mit Poreneis oder Eislinsen übersättigt ist. Als Folge der Deformation des in ihnen enthaltenen Eises bewegen sie sich kriechend hang- oder talabwärts. Sie stellen daher ein Merkmal kohäsiven Fließens dar.“

Je nach Materialherkunft können zwei Entstehungsarten von Blockgletschern unterschieden werden (vgl. Abbildung 2-4). Talus-Blockgletscher entwickeln sich unterhalb von Schutthalden. Sie werden durch Material, welches durch Frostverwitterung in den Wänden gelockert wird und durch Steinschlag oder Lawinen nach unten transportiert wird, genährt. Eislinsen und Segregationseis, die für die Bewegung unabdingbar sind, entstehen durch den Eintrag von Schnee und Schmelzwässern.

Eine direkte Kopplung zum glazialen System weist der zweite Typ, der Debris-Blockgletscher auf. Sein Material stammt aus Moränen und Gletscherschmelzwasser, welches wieder gefriert.

Blockgletscher können nicht nur hinsichtlich ihrer Materialherkunft sondern auch in ihrer Aktivität unterschieden werden. Aktive Blockgletscher besitzen eine Stirn mit einer sehr hohen Neigung, die häufig den natürlichen Böschungswinkel übersteigt und im Allgemeinen durch feineres Material geprägt wird. Durch die Bewegung des Blockgletschers, die zwischen 0,1 bis 1m pro Jahr betragen kann (Barsch 1996), stürzen größere Blöcke von der Stirn und lagern sich vor dieser ab.

Inaktive Blockgletscher bewegen sich weniger als 0,01m pro Jahr (Barsch 1996). Als dynamisch inaktiv werden Blockgletscher bezeichnet, die aufgrund zu geringer Hangneigung oder Schuttnachlieferung aufhören vorzustoßen, als klimatisch inaktiv die, die durch Abschmelzen von Eis ihre Fähigkeit zum plastischen Fließen verlieren. Die Inaktivität wird durch die Abnahme der Sturzprozesse und durch Vegetation an der Stirn, die noch eine relativ hohe Neigung besitzt, gekennzeichnet.

Reliktische Blockgletscher sind Zeugen ehemaliger Klimaverhältnisse (Van Tantenhove & Dikau 1990). Sie enthalten kein Eis mehr und weisen daher Kollapsstrukturen und eine abgeflachte Stirn auf. Da sie sich nicht mehr bewegen, können sich ungestört Pflanzen auf ihnen ausbreiten.

## 2 Theoretischer Hintergrund

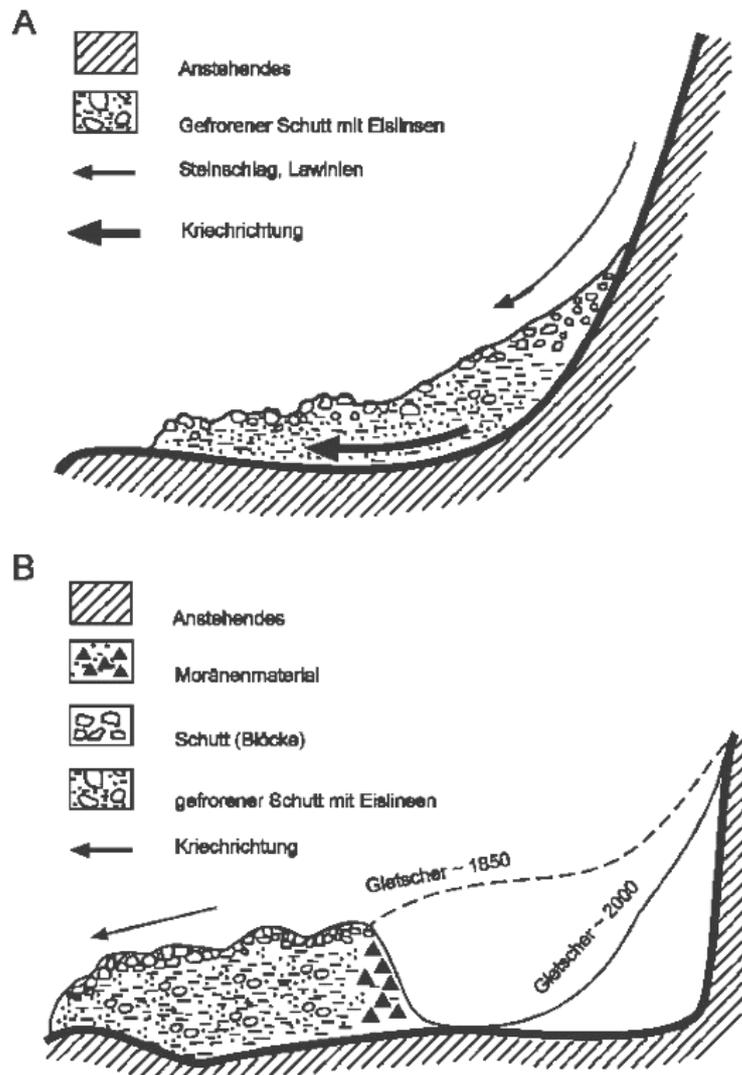


Abbildung 2-4: Genetische Blockgletschertypen. A: Talus-Blockgletscher, der unterhalb von Blockhalden entsteht, B: Debris-Blockgletscher aus Moränenmaterial unterhalb von Gletschern (aus Barsch 1988; 1996).

Auch Solifluktionsloben sind typische Formen in periglazialen Gebieten. Sie entwickeln sich durch tägliche bis jährliche Gefrier- und Auftauzyklen und treten deswegen unabhängig von Permafrost auf. In ihrer Erscheinung ähneln sie häufig Blockgletschern. Matsuoka et al. (2005) gehen davon aus, dass Solifluktionsloben eine maximale Stirnhöhe von 3m besitzen können. Sie erklären dies mit dem vorherrschenden Prozess: Solifluktionsloben entstehen durch Kriechprozesse im Active Layer, also der Schicht, die durch Auftau- und Gefrierzyklen beeinflusst ist. Typische Solifluktionsloben besitzen eine Stirnhöhe von 1m und einen Körper von 2 bis 50m Länge und

## 2 Theoretischer Hintergrund

Breite und sind damit kleiner als Blockgletscher, die häufige Stirnhöhen von einigen 10er Metern besitzen und mehrere 100m lang oder breit sein können (Matsuoka, et al. 2005).

Eine Sonderform der Solifluktion, die durch sommerliche Schmelzwässer verstärkt wird, ist die Kryoplanation. Solifluktion und Schmelzwässer bewirken einen flächenhaften Austrag von Feinmaterial sowie die Einreglung von grobem Material und bewirken dadurch eine Einebnung des Geländes (Rasemann 2004).

Frostmusterböden treten ebenfalls in periglazialen Gebieten auf. Sie entstehen durch die Materialsortierung von Lockermaterialen durch Auftau- und Gefrierprozesse. Je nach vorhandener Hangneigung können Steinringe, die außen gröberes Material besitzen als innen, oder Steinstreifen bei denen sich gröberes mit feinerem Material abwechselt, entstehen (French 1996).

### 2.3 Kartographie

In diesem Kapitel wird auf Kartographie und Karten im Allgemeinen eingegangen. Dazu werden zunächst die Entwicklungen in der Kartographie kurz aufgezeigt und Definitionen zur Kartographie und Karten vorgestellt. Anschließend wird die generelle Datengrundlage dargestellt und auf die kartographische Zeichentheorie eingegangen. In den letzten beiden Abschnitten wird die These diskutiert, dass Karten sowohl technische als auch soziale Konstrukte sind, und auf die neusten Entwicklungen in der Kartographie eingegangen.

Da die Kartographie eine eigene wissenschaftliche Disziplin ist, sollen die folgenden Erläuterungen nur als eine kurze Einführung verstanden werden, die verständlicherweise nicht das ganze Spektrum des Fachs wieder geben können.

#### 2.3.1 Definition Kartographie und Karte

Nach Kraak und Ormeling (2003) wurde bis in die 60er Jahre unter Kartographie nur die Herstellung von Karten verstanden. Die Produktion von Karten blickt auf eine Tradition zurück, die zwar bis zu den ersten Funden 600 v. Chr. reicht, aber erst um 1300 durch Fortschritte in der Kartographie der Seefahrt an Bedeutung gewann (Crone 1962). Mit dem Aufkommen von Computern in den 60ern, den ersten Satellitenbildern und GIS (Geoinformationssystemen) änderten sich die kartographischen Aufgabenbereiche und damit auch ihre Definition. Heute kann unter Kartographie „making accessible spatial Data, emphasizing its visualization and enabling interaction with it, aimed at dealing with geospatial issues“ (Kraak & Ormeling 2003, S. 35) verstanden werden. Das Ziel der Kartographie ist somit nicht mehr vorrangig die Herstellung einer Papierkarte, sondern die Aufbereitung kartographischer Daten, die den Nutzern in unterschiedlicher Form zugänglich gemacht werden. Dies kann durch „fühlbare“ Karten oder durch digitale Informationssysteme geschehen, in denen gewünschten Daten je nach Fragestellung visualisiert werden können.

Der Begriff „Karte“ wurde bereits mehrfach erwähnt aber noch nicht genauer beleuchtet. Die International Cartographic Association, ICA, liefert folgende Definition: “A map is a symbolised image of geographical reality, representing selected features or characteristics, resulting from the creative effort of its author's execution of choices, and is designed for use when spatial relationships are of primary relevance” (ICA <http://www.icaci.org/>). Die ICA verdeutlicht in dieser Begriffserklärung nicht

## 2 Theoretischer Hintergrund

nur, dass eine Karte die Realität selektiv zeigt und dass räumliche Beziehungen im Vordergrund stehen, sondern geht auch auf die Rolle des Kartographen bei der Herstellung ein. Board (1992, S. 56) versteht unter einer Karte „a representation or abstraction of geographic reality. A tool for presenting geographic information in a way that is visual, digital or tactile“. Der Autor verdeutlicht, dass Karten, wie bereits erwähnt, nicht immer als Papierkarten vorhanden sind. Er stellt sie als ein Werkzeug zur Präsentation dar. Karten dienen jedoch nicht nur zur Kommunikation von Daten, sondern auch als eine Untersuchungsmethode zur Analyse geographischer Sachverhalte (Kraak & Ormeling 2003). Werden Karten zu wissenschaftlichen Untersuchungen verwendet, so sind sie in der Regel nicht für die breite Öffentlichkeit bestimmt, sondern werden im näheren Umfeld des Forschers verwendet. Sie zeichnen sich häufig durch eine hohe Interaktivität aus, d.h. die Daten können neu geordnet oder anders dargestellt werden, was nur mit Hilfe von Computersystemen möglich ist. Ein Ziel ist es, unbekannte Zusammenhänge und Daten zu entdecken (vgl. Abbildung 2-5, „explore“).

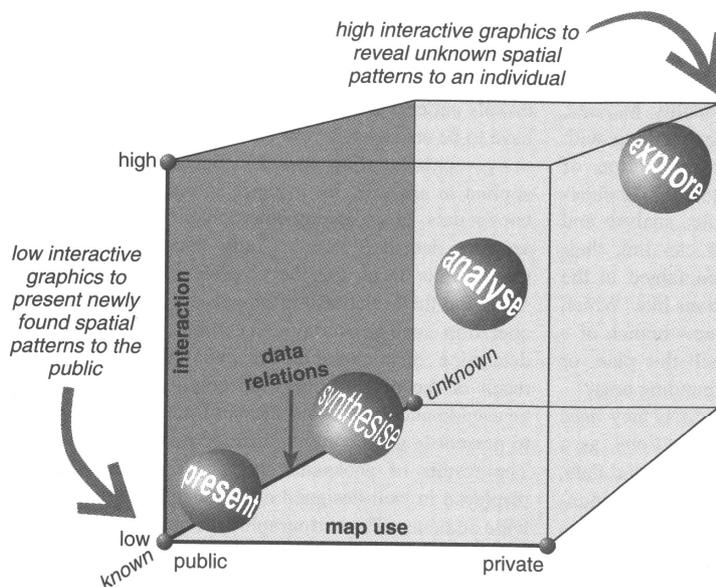


Abbildung 2-5: "The map use cube" Der Würfel zeigt die vier Schwerpunkte der Datenvisualisierung im GIS. Die Interaktionsfähigkeit, der Bekanntheitsgrad der Daten und die Nutzung bestimmen die Funktion einer Karte (aus Kraak & Ormeling 2003; nach MacEachren 1994).

## 2 Theoretischer Hintergrund

Karten, die zur Kommunikation verwendet werden, sind für eine breite Öffentlichkeit bestimmt, sind normalerweise nicht interaktiv (oftmals Papierkarten) und dienen zur Präsentation bekannter Daten (vgl. Abbildung 2-5, „present“). Es ist zu berücksichtigen, dass diese beiden Funktionen kontinuierlich ineinander über gehen, je nachdem wie bekannt die Daten sind, wer der Nutzer ist und wie interaktiv die Nutzung erfolgt (Orford 2005).

Karten können nicht nur nach ihrem Zweck und ihrer Zielgruppe unterschieden werden, sondern auch nach ihrem Inhalt. Die Unterteilung in topographische und thematische Karten ist gebräuchlich. Topographische Karte zeigen allgemeine Informationen wie Gewässer, Siedlungen, Straßen, Bodenbedeckung und Relief, die für die Orientierung und Tätigkeit des Menschen im Gelände notwendig sind. Thematische Karten beschäftigen sich mit einem bestimmten, nicht topographischen Thema aus der Umwelt oder der menschlichen Gesellschaft. Sie enthalten häufig eine topographische Karte als Grundlage (Lexikon der Kartographie und Geomatik, 2002). Je nach Fragestellung und Anspruch existieren Karten in unterschiedlichen Maßstäben. Es können kleinmaßstäbige, mittelmaßstäbige und großmaßstäbige Karten unterschieden werden (Kraak & Ormeling 2003). Wilhelmy (1990) teilt den Maßstab je nach Aussagewert in fünf Klassen ein: Plankarten: Maßstab  $< 1:10.000$ , Spezialkarten: Maßstab  $1:20.000$  bis  $1:75.000$ , Übersichtskarten: Maßstab  $1:100.000$  bis  $1:500.000$ , Handkarten: Maßstab  $1:500.000$  bis  $1:800.000$  und zuletzt die Länder-, Erdteil- und Weltkarten mit dem Maßstab  $1:1$  Mio. und kleiner.

### 2.3.2 Datengrundlagen und Besonderheiten von Karten

Um eine Karte zu einer bestimmten Fragestellung herstellen zu können, werden Geodaten benötigt, die durch diverse Verfahren gewonnen werden können. Die traditionellste Sammlung von Daten ist die Feldarbeit. Phänomene können direkt gemessen und aufgenommen werden. Heute ist es möglich, die gewonnen Erkenntnisse sofort digital festzuhalten, so dass ein späteres Überführen in den Computer stark vereinfacht wird. Luftbilder, GPS-Daten und Satellitendaten dienen ebenso als Materialquellen, wie vorhandene statistische Daten, (geo-)physikalische Messreihen und bereits existierende Karten, die digitalisiert werden können. Die Qualität der Daten ist von großer Wichtigkeit. Häufig werden unterschiedliche Maßstäbe, Projektionen und Zeiten bei der Aufnahme verwendet, die dann bei weiterer Verarbeitung aneinander angepasst werden müssen. Hier ist eine gute Dokumentation mit entsprechen-

## 2 Theoretischer Hintergrund

den Metadaten unabdingbar (Kraak & Ormeling 2003).

Sollen die gesammelten Daten in einer analogen Karte dargestellt werden, so muss beachtet werden, dass ein dreidimensionales Objekt, wird die Zeit mit eingerechnet auch ein vierdimensionales Objekt, in zwei Dimensionen umgewandelt werden muss. Dies kann nicht ohne Fehler und Verzerrungen geschehen. Je nachdem welche Kartenprojektion angewendet wird, werden einige Fehler minimiert, dafür aber andere wiederum betont. Die Fragestellung entscheidet, welche Kartenprojektion gewählt werden sollte (Vitek et al. 1996).

Es ist nicht möglich, die gesamte Realität in einer Karte abzubilden. Karten sind selektiv und können bestimmte Gebiete oder Themen hervorheben. Je nach gewähltem Maßstab und Thema und nach der Auswahl einer Kartenprojektion muss der Kartograph generalisieren. Es muss ausgewählt werden was gezeigt wird und wie genau es dargestellt werden soll. So wird z.B. in einer kleinmaßstäbigen Karte nicht jede Bucht einer zerklüfteten Küstenlinie eingezeichnet. Die genaue Information über die Lage der Buchten ist somit nicht mehr aus der Karte herauszulesen, auch nicht wenn diese vergrößert wird (Vitek, et al. 1996).

### 2.3.3 Kartographische Semiologie

Um der Aufgabe der Kommunikation gerecht zu werden, müssen Karten bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Die erste Frage, die der Kartograph sich stellen muss, sollte lauten: „was will ich sagen und zu wem will ich es sagen“. Je nach Zielgruppe und Thema können Karten ganz unterschiedlich gestaltet werden. Das Design der Karte sollte auf psychologischen und kognitiven Erkenntnissen zur Wahrnehmung von Karten beruhen (Orford 2005). Mit diesem Themenfeld beschäftigt sich die kartographische Semiologie, „deren Erkenntnisgegenstand u. a. elementare und strukturelle Analogien zwischen Daten, Zeichen und menschlichem Denken sind“ (Lexikon der Kartographie und Geomatik, 2002). An dieser Stelle soll nur auf einige, wenige Aspekte hingewiesen werden, mit denen sich die kartographische Zeichentheorie beschäftigt. Ihr bekanntester Vertreter ist Jaques Bertin.

Allgemein bestehen Darstellungen in der Kartographie aus Punkten, Linien, Polygonen oder im digitalen Bereich auch aus Volumina. Sie sollen durch graphische Unterschiede bestimmte Assoziationen beim Kartenleser auslösen.

Nach Bertin (1974) existieren diverse visuelle Variablen zur Darstellung von Daten auf einer Karte:

## 2 Theoretischer Hintergrund

- Lage im Raum
- Größe der Variablen
- Helligkeitswert (z.B. bei Grauabstufungen)
- Muster
- Farbe
- Orientierung/Richtung (z.B. wagerechte und senkrechte Schraffuren)
- Form (z.B. Punktsignaturen in Dreiecksform, gestrichelte Linien etc.)

Der Mensch ist nur fähig eine bestimmte Anzahl von Klassen der einzelnen visuellen Variablen auf einen Blick wahrzunehmen. So kann z.B. ein Kartenleser nur drei verschiedenen Graustufen bei Punktsignaturen im ersten Moment unterscheiden, vier Graustufen bei Liniensignaturen und fünf Grautöne bei flächenhaften Signaturen. Zusätzlich ist wichtig, dass die Signaturen den Schwerpunkt der Karte graphisch unterstützen. Sollen beispielsweise die Arbeitslosenzahlen in verschiedenen Ländern dargestellt werden, ist es wenig sinnvoll den umgebenden Ozeanen ein auffälliges Muster zu geben (Kraak & Ormeling 2003). Diese vorgestellten Regeln können auch für die wissenschaftliche Darstellung und Erforschung, das andere Extrem in der Funktion von Karten, verwendet werden (vgl. Abbildung 2-5). Häufig wird darauf jedoch kein Wert gelegt, da dort kaum Regeln und Konventionen existieren. Ein GIS bietet viele Visualisierungsmöglichkeiten, lehrt aber nicht die Regeln, die effektive Karten erzeugen. Dies ist für den privaten Gebrauch von Karten auch nicht notwendig, da der Autor seine eigenen Darstellungen normalerweise versteht. Probleme treten erst auf, wenn diese Graphiken anderen Personen gezeigt werden. Eine angemessene und gut durchdachte Darstellung ist dann notwendig (Kraak & Ormeling 2003).

### 2.3.4 Kartographie und Objektivität

Die wissenschaftliche Kartographie wird üblicherweise als objektiv angesehen. Karten werde durch allgemein anerkannte Methoden erstellt und sollen die Realität repräsentieren (Harley 1989a). Nach Harley (1989b) wird in dieser Disziplin in positivistischer Sichtweise häufig angenommen, dass die kartierten Objekte in der Realität vorhanden sind und unabhängig vom Kartographen existieren. Wird aber versucht Karten zu verstehen und zu erklären, wie sie die Welt zeigen, so stößt man an die

## 2 Theoretischer Hintergrund

Grenzen dieser Sichtweise. Der Kartograph ist immer beeinflusst von Politik, Religion, Gesellschaft und seinem sozialen Status und befindet sich daher in einem Wechselspiel zwischen sozialen und technischen Regeln (Harley 1989b). Dies soll keinesfalls die Wissenschaftlichkeit der Kartographie anzweifeln, sondern die Epistemologie, die zugrunde gelegt wird. Harley (1989b) bevorzugt eine Sicht auf diese Disziplin aus den Gesellschaftswissenschaften. Er ist der Meinung, dass Karten als Texte betrachtet werden sollen. So soll ein „Lesen zwischen den Zeilen“ und eine kritischere Grundhaltung gegenüber Karten ermöglicht werden.

### 2.3.5 Neue Techniken in der Kartographie

Die zunehmende Verwendung von Computern hat auch die Kartographie geprägt. Heute ist die Verwendung von GIS aus Wissenschaften, die mit räumlichen Daten arbeiten, nicht mehr weg zu denken. Ein GIS besteht aus Hardware, Software, Daten und dem Anwender. Mithilfe des Informationssystems ist es möglich Daten zu sammeln, zu speichern, zu verändern und zu visualisieren, um damit den unterschiedlichen Ansprüchen an Karten, sei es die Kommunikation oder die Erforschung, gerecht zu werden. Die Besonderheit eines GIS ist die Kombinationsmöglichkeit räumlicher mit nicht-räumlichen Daten. Dadurch ist es möglich Punkte in einer digitalen Karte zu identifizieren, Trends zu berechnen, Beziehungen aufzuzeigen und Modelle zu erstellen. Um Karten im GIS vorteilhaft zu erzeugen und zu interpretieren ist kartographisches Wissen wichtig, besonders wenn Karten zum Zweck der Kommunikation erstellt werden (Kraak & Ormeling 2003).

Durch die Verbreitung von GIS sind heute nicht nur Kartographen an der Kartenproduktion beteiligt. Das Internet bietet eine weitere Möglichkeit den Nutzerkreis zu erhöhen, so dass auch Laien eigene Karten produzieren können. Karten können dabei als Index für weitere Geoinformationen, als Oberfläche für die Datensuche in einer Suchmaschine oder als eine Vorschau für räumliche Daten dienen. Es ist häufig eine hohe Interaktivität möglich, die eine breite Öffentlichkeit erreicht. Zusätzlich werden Daten leichter zugänglich, die helfen, neue Graphiken zu erstellen. Der Nachteil der öffentlichen Zugänglichkeit des Internets liegt darin, dass die Qualität der Karten und Daten stark variieren kann und nicht gesichert ist.

### 2.4 Geomorphologische Kartierung

Da in der vorliegenden Arbeit die geomorphologische Kartierung als eine Hauptmethode zur Analyse und Darstellung zweier Gebiete im Hochgebirge verwendet wird, soll in diesem Kapitel die geomorphologische Kartierung insgesamt näher betrachtet werden. In Kapitel 3 wird anschließend die eigene Vorgehensweise und die Anwendung der Kartierlegende beschrieben.

In diesem allgemeinen Teil wird zunächst die internationale sowie die nationale, deutsche Entwicklung geomorphologischer Karten vorgestellt. Es werden dabei sowohl die Anfänge der geomorphologischen Kartierung als auch die neusten Entwicklungen betrachtet. Im anschließenden Kapitel wird auf den Inhalt und den Nutzen der Karten eingegangen, bevor am Ende die Kartierlegenden der GMK 25 und der GMK Hochgebirge vorgestellt werden.

#### 2.4.1 Entwicklung der geomorphologische Kartierung

In den folgenden Abschnitten soll ein kurzer Überblick über geschichtliche und aktuelle Entwicklungen der geomorphologischen Kartierung gegeben werden. Dies erfolgt zunächst auf internationaler Ebene bevor auf das deutsche Kartiersystem eingegangen wird.

##### 2.4.1.1 Entwicklung auf internationaler Ebene

Die geomorphologische Karte entstand zu Beginn des 20. Jahrhunderts und damit im Vergleich zu anderen Karten erst relativ spät (Klimaszewski 1990).

Die ersten geomorphologischen Karten beschrieben zumeist bestimmte ausgewählte Formen und Prozesse und besaßen damit einen thematischen Schwerpunkt. Die ersten detaillierten geomorphologischen Kartierungen wurden von Gehne (1912) und Passarge (1914) durchgeführt. In den 20er und 30er Jahren wurden zwar einige Kartierversuche begonnen, doch erst nach dem zweiten Weltkrieg die Erstellung einer einheitlichen Legende für geomorphologische Karten fokussiert. Auf dem 18. Kongress der International Geographical Union (IGU) in Rio 1956 wurden zwei Konzepte für eine geomorphologische Kartierung vorgestellt. Daraus resultierte die Gründung einer Unterkommission für geomorphologische Kartierung, die begann einen einheitlichen Kartierschlüssel herzustellen (Gustavsson 2006). Diese Arbeit wurde 1968 beendet (Demek 1971), jedoch existiert bis heute kein international allgemein akzeptierter Legendenschlüssel, sondern verschiedenste nationale und regio-

## 2 Theoretischer Hintergrund

nale Legenden. Klimaszwski (1990) listet in seinem Aufsatz sieben nationale Legenden und 17 regionale Legenden auf, die zwischen 1956 und 1985 entstanden. Gustavsson (2006) nennt geomorphologischen Kartiersysteme der Niederlande, Ungarns, Frankreichs, Russlands, Polens, der IGU, Schwedens, des International Institutes of Aerial Survey and Earth Sciences, Deutschlands, der Alpine Geomorphology Research Group (AGRG) der Universität Amsterdam, der Schweiz, Großbritanniens und auf eine Kartierung aus Österreich, die von 1960 bis 1993 entwickelt wurden. Dies zeigt die Existenz einer großen Vielfalt geomorphologischer Karten und auch die Vielfalt der Geomorphologie. Das Fehlen einer einheitlichen Legende kann darauf zurückzuführen sein, dass die vorhandenen Legenden entweder nationale Besonderheiten zu sehr betonen oder so umfassend und daher so kompliziert sind, dass die Lesbarkeit einer erstellten Karte sehr erschwert ist (Gustavsson et al. 2006).

In den letzten 20 Jahren wurde sich kaum mit der geomorphologischen Kartierung als eigene wissenschaftliche Disziplin beschäftigt (Gustavsson, et al. 2006). Gustavsson et al. (2006) sehen den Grund dafür in dem hohen zeitlichen und kostenintensiven Aufwand für detaillierte Karten und in dem vorhandenen Fokus auf thematische oder anwendungsorientierte Karten. Sie kritisieren, dass die Erstellung holistischer, wissenschaftlicher, geomorphologischer Karten in den Hintergrund gerückt ist. Die Feldarbeit ist immer noch die Basis für die geomorphologische Kartographie, doch können die neusten digitalen Entwicklungen zu einer vereinfachten Datensammlung und Aufbereitung führen. Neue, leistungsfähige Computer ermöglichen die Handhabung großer Datenmengen, die beispielsweise aus der Fernerkundung stammen. In Geoinformationssystemen (GIS) können Datensätze mit unterschiedlichen Formaten verwendet und kombiniert werden. Auch die Analyse der Karten und der einzelnen Informationsschichten erhält neue Möglichkeiten. Zusätzlich ist bei neuen Erkenntnissen eine schnellere Aktualisierung möglich (Gustavsson 2006). Die Anwendung digitaler Höhenmodelle (DHM) erleichtert geomorphometrische Ableitungen und ermöglicht dreidimensionale Darstellungen (Buckley et al. 2004).

Um die geomorphologische Kartierung den neuen digitalen Möglichkeiten anzupassen, entwickelten Gustavsson et al. (2006) ein neues Kartiersystem. Die Legende baut auf bereits vorhandenen, traditionellen Legenden auf, ist aber für die Anwendung in GIS geeignet. Auf internationaler Ebene hat sich 2005 eine „Working Group on Applied Geomorphological Mapping (AppGeMa)“ in der International Association

## 2 Theoretischer Hintergrund

of Geomorphologists, IAG, gebildet. Auf ihrer Internetseite [www.geomorph.org/wg/wgagm.html](http://www.geomorph.org/wg/wgagm.html) werden vier Hauptziele genannt:

1. Entwicklung und Vertiefung der theoretischen Basis der geomorphologischen Kartierung
2. Entwicklung von Standards, Vorgehensweisen und Legendensystemen für unterschiedliche Anwendungen und Skalen
3. Verbreitung der Wichtigkeit und Effektivität geomorphologischer Kartierung als ein elementares Werkzeug für diejenigen, die sich mit der physischen Umwelt beschäftigen
4. Schaffung einer Brücke zu andern Disziplinen und Anwendern (AppGeMa 2006)

Die Gründung dieser Arbeitsgruppe zeigt, dass geomorphologische Karten immer noch eine große Wichtigkeit besitzen und dass eine weitere wissenschaftliche Beschäftigung notwendig ist. Auch die Erstellung eines einheitlichen, internationalen und GIS-fähigen Kartiersystems mit unterschiedlichen Legenden je nach Anwendungsgebiet und Skala soll wieder in den Vordergrund rücken. Die Entwicklung soll im September/Oktober 2008 abgeschlossen sein.

### 2.4.1.2 Entwicklung in Deutschland

Auch in Deutschland beginnt die Geschichte der geomorphologischen Kartographie mit Gehne (1912) und Passarge (1914). In den 1960er Jahren rückten morphographische Karten verstärkt in den Vordergrund. Die Grundlagen dafür wurden von Richter (1962), Grimm et al. (1964) und Kugler (1964; 1965), der die Entwicklung der geomorphologischen Kartographie in der DDR maßgeblich beeinflusst hat, gelegt (Spönemann & Lehmeier 1989).

Bis Anfang der 1970er existierte in der BRD keine einheitliche geomorphologische Kartierlegende. Das Ergebnis war eine schlechte Vergleichbarkeit der Karten untereinander und mit den Karten der Nachbarwissenschaften (Leser & Stäblein 1975). Dagegen wurde in den Nachbarländern bereits längere Zeit über die einheitliche Repräsentation geomorphologischer Forschungsergebnisse diskutiert (Barsch 1976). Als Reaktion darauf wurde 1972 der „Arbeitskreis geomorphologischer Detailkartierung der Bundesrepublik Deutschland“ gegründet und 1973 der erste neu entwickelte Legendenentwurf vorgestellt (Leser 1982). 1975 wurde die so genannte „grüne Legende“ beschlossen und unter dem Titel „Geomorphologische Kartierung“ he-

## 2 Theoretischer Hintergrund

rausgegeben (Leser & Stäblein 1975). Die Richtlinien des zweiten Legendentwurfs für Karten im Maßstab 1:25.000 orientierten sich an Vorschlägen anderer Länder und sollten in einem Schwerpunktprogramm in der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) weiterentwickelt werden.

1976 beschloss die DFG die Förderung des Schwerpunktprogramms „Geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland“. Ziel war die Erstellung von Methoden, Richtlinien und Legenden für die Geomorphologische Karte 1:25.000 (GMK 25) und die Geomorphologische Karte 1:100.000 (GMK 100). Zusätzlich sollte gegenüber dem internationalen Standard ein deutlicher Schritt nach vorn hinsichtlich einer einheitlichen Legende gemacht werden. 1980 wurde innerhalb des Schwerpunktprogramms die dritte Fassung der Legende der GMK 25 veröffentlicht (Leser & Stäblein 1980). Im Schwerpunktprogramm wurde kein flächendeckendes geomorphologisches Kartenwerk angestrebt, sondern nur Gebiete mit unterschiedlichen Relieftypen ausgewählt, um dort die Legende und Methodik zu überprüfen. Das Programm endete nach einer Auslaufphase 1987. Verschiedene Kartierer und Autoren erstellten und publizierten 27 Karten im Maßstab 1:25.000 und 8 im Maßstab 1:100.000 (Barsch 1987).

Auf das erste Schwerpunktprogramm folgte ein zweites mit dem Namen „Digitale Geowissenschaftliche Kartenwerke“ (vgl. Vinken 1985). Barsch und Dikau (1989) übernahmen die Aufgabe eine „Digitale Geomorphologische Basiskarte“ (DGmBaK) zu erstellen. Die GMK 25 sollte als Grundgerüst für die DGmBaK dienen (Barsch 1987).

Die letzten größeren Arbeiten zur geomorphologischen Kartierung fanden in den 90ern statt. Zur Vereinheitlichung und Vereinfachung der geomorphologischen Kartierung im Hochgebirge begann die Arbeitsgruppe für Geomorphologie und Hazards, die 1994 auf dem Treffen zur Hochgebirgsökologie gegründet wurde, mit der Entwicklung eines Kartierschlüssels für die speziellen Anforderungen im Hochgebirge. Die entstandene Legende orientiert sich an der GMK 25 und der GMK 100, sowie an den Änderungsvorschlägen von Fischer (1984), der das GMK 25 Blatt Königsee kartierte (Kneisel, et al. 1998).

Seit der Diskussion über die GMK Hochgebirge hat sich hinsichtlich einer Weiterentwicklung der geomorphologischen Kartographie in Deutschland wenig bewegt. Um die geomorphologische Karte wieder in den Fokus der deutschen Geomorphologie zu bringen, werden seit Kurzem alle geomorphologischen Karten, die im

## 2 Theoretischer Hintergrund

Schwerpunktprogramm „Geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland“ entstanden sind, samt ihrer Erläuterungen im Internet bereit gestellt (<http://gidimap.giub.uni-bonn.de/gmk.digital/home.htm>). Vielleicht erfolgt in Zukunft eine Belebung der Diskussion über geomorphologische Karten in Deutschland, auch durch die Einflüsse der Working Group on Applied Geomorphological Mapping.

### 2.4.2 Inhalt und Nutzen geomorphologischer Karten

Wie in Kapitel 2.4.1.1 erwähnt, existiert trotz einiger Versuche keine einheitliche geomorphologische Kartierlegende. Über den generellen Inhalt einer geomorphologischen Karte herrscht jedoch, durch die Anstrengungen der IGU, Einigkeit (Gustavsson 2006). Geomorphologische Kartierprojekte sollen die Interaktionen der Erdoberfläche mit der Hydrosphäre, Atmosphäre, Pedosphäre und Biosphäre beschreiben (Demek & Embleton 1978). Obwohl der Fokus der Karten auf einer Darstellung der Landoberflächen beruht, wäre eine Abbildung von Bereichen in Seen und Ozeanen ebenfalls möglich (Gustavsson 2006). Cooke und Doornkamp (1990, S. 28) sehen das Ziel einer geomorphologischen Kartierung in der Aufnahme von „information on surface form, materials (soil and rock), surface processes, and (in some cases) the age of landform“. Diese Elemente besitzt auch die GMK 25 Kartierlegende mit ihren Informationsschichten Geomorphographie und Geomorphometrie, Substrat/Oberflächennaher Untergrund, Geomorphodynamik und Geomorphogenese. Hinzu kommt in der deutschen Legende noch eine räumliche und topographische Reliefcharakterisierung mit Informationen über die Hydrographie, der Situation und Position und weiteren ergänzenden Angaben (Leser 1982), die normalerweise auch in anderen geomorphologischen Kartiersystemen vorhanden sind. Über die Detailliertheit der Karte entscheidet der ausgewählte Darstellungsmaßstab.

Jedes Kartiersystem sollte ermöglichen, dass subjektive Eindrücke reduziert werden und dass dem Kartenleser die Daten zugänglich sind, auf denen die Schlussfolgerungen basieren. Besonders die genetische Aussagen über ein System hängen von der menschlichen Interpretation ab (Gustavsson, et al. 2006). Eine vollständig objektive Karte ist, wie bereits in Kapitel 2.3.4 dargestellt, nicht möglich. Demek (1971) weist darauf hin, dass zu jeder Karte auch ein erklärender Text notwendig ist, um ein Gebiet vollständig zu beschreiben.

## 2 Theoretischer Hintergrund

Leser (1977) sieht in der geomorphologischen Karte sowohl ein Aufnahme- als auch ein Darstellungsinstrument. Laut seiner Meinung ist das Ziel einer geomorphologischen Karte die Darstellung eines Problems. Es darf dabei aber nicht nur das Untersuchungsthema gezeigt werden, sondern es muss eine vollständige Aufnahme der geomorphologischen Situation erfolgen.

Gustavsson (2006) erkennt in der geomorphologischen Kartierung auch eine Untersuchungsmethode, um die Entwicklung und das Prozessgeschehen einzelner Geformen oder ganzer Formsysteme zu erforschen. Eine Bewertung und Rekonstruktion der Geschichte eines Gebietes und eventuell auch die Vorhersage werden möglich. Zusätzlich können geomorphologische Karten als Datenbasis für viele Anwendungen und weitere Produkte, wie z.B. Gefahrenkarten, dienen (Gustavsson, et al. 2006).

Geomorphologische Karten werden einerseits für wissenschaftliche Fragestellungen angewendet, sollten jedoch andererseits auch den Ansprüchen für praktische und ökonomischen Planungen genügen (Klimaszewski 1990). Den Aspekt, dass die Karten als Planungsgrundlage verwendet werden können, betonen besonders Cooke und Doornkamp (1990). Sie sehen Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Planung und der ökonomischen Entwicklung, beispielsweise bei Planungen zur Landnutzung, Schutzmaßnahmen für Natur- und Kulturlandschaft, der Vorbereitung von Siedlungen und Infrastruktur.

Ohne eine gründliche Einarbeitung in die Legende, sind die in der Regel komplizierten geomorphologischen Karten schwer verständlich. Ein wichtiges Produkt sind daher Auszugs- und Auswertungskarten, die nur bestimmte Teilaspekte, gemäß der jeweiligen Fragestellung, berücksichtigen. Sie sind für Benutzer ohne geomorphologischen Hintergrund leichter auszuwerten (Barsch & Mäusbacher 1980).

Insgesamt hat sich die geomorphologische Karte noch nicht als ein stark genutztes Instrument außerhalb der Geomorphologie für die Arbeit in der physischen Umwelt entwickelt, sonst wäre nicht eines der Hauptziele der AppGeMa die Verbreitung der Wichtigkeit und Effizienz der Karte unter potentiellen Anwendern (vgl. Kapitel 2.4.1.1).

In dieser Arbeit wird die geomorphologische Kartierung zu wissenschaftlichen Zwecken angewendet. Die Karte dient sowohl als Darstellungs- als auch als Analyseelement. Die Kartierung selber wird als eine Methode angewendet, um ein heutiges

## 2 Theoretischer Hintergrund

Talgletschersystem zu verstehen und seine Entwicklung zu erklären. Die Feldarbeit während der Kartierung ermöglicht eine intensive Beschäftigung mit den Formen, die nicht durch die Auswertung von Fernerkundungsdaten erreicht werden kann.

### 2.4.3 Das GMK System Deutschland

Nachdem bereits in Kapitel 2.4.1 auf die Entwicklung der geomorphologischen Kartographie und in Kapitel 2.4.2 auf den allgemeinen Nutzen und Inhalt geomorphologischer Karten eingegangen wurde, sollen in den nächsten Abschnitten die Legenden der GMK 25 und der GMK Hochgebirge näher beleuchtet werden. Die in dieser Arbeit durchgeführten Kartierungen basieren auf diesen Legenden. Die GMK 100 wird nicht weiter berücksichtigt, sie besitzt jedoch viele Merkmale, die die GMK 25 ebenfalls auszeichnen.

#### 2.4.3.1 GMK 25

Mit der Kartierlegende GMK 25 können geomorphologischer Karten im Maßstab 1:25.000 erstellt werden. Die Aufnahme im Gelände soll dabei jedoch im Maßstab 1:10.000 mit einer anschließenden Generalisierung auf 1:25.000 durchgeführt werden. Die Kartierlegende ist so aufgebaut, dass die geomorphologischen Gegebenheiten in acht verschiedenen Informationsschichten aufgenommen werden. Diese Vorgehensweise wird als analytische Kartierung bezeichnet, da stets nur ein Thema, z.B. nur die Morphogenese oder der oberflächennahe Untergrund, kartiert wird (Barsch 1976). Die unterschiedlichen Informationsschichten werden abschließend zu einer Karte zusammengefügt, so dass ein synthetischer Gesamteindruck entsteht (Barsch 1987).

Die Informationsschichten sind mit ihren entsprechenden Vorschriften der Farbwahl in Abbildung 2-6 dargestellt. Zusätzlich ist in der Graphik zu erkennen, dass in den einzelnen Schichten meistens eine der möglichen Signaturenarten, Punkt-, Linien-, oder Flächensignaturen, dominiert.

## 2 Theoretischer Hintergrund

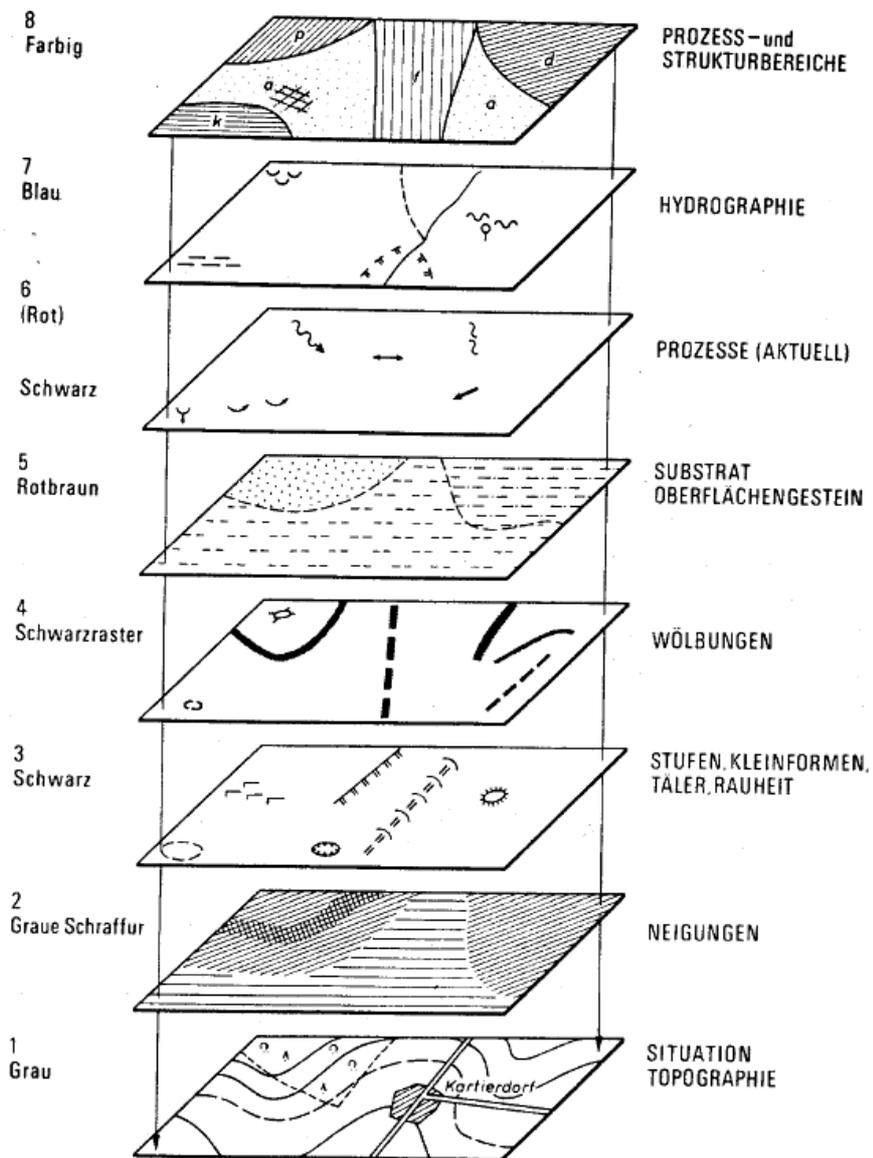


Abbildung 2-6: Die Informationsschichten der GMK 25 und ihre farbliche Darstellung (aus Barsch 1987).

Die Zusammenschau der einzelnen Schichten ergibt oftmals erst das komplette Bild und damit auch die genaue Bezeichnung einer Form oder eines Prozesses. So wird beispielsweise ein Moränenwall nicht durch eine eigene Signatur bezeichnet, sondern durch eine Wölbung mit einer bestimmten Korngröße im glazialen Prozessbereich (vgl. Abbildung 2-7) (Barsch et al. 1987). Mani und Kienholz (1988) verwenden anstelle der Wölbungslinie die Signatur für einen Wall zur Darstellung einer Moräne.

## 2 Theoretischer Hintergrund

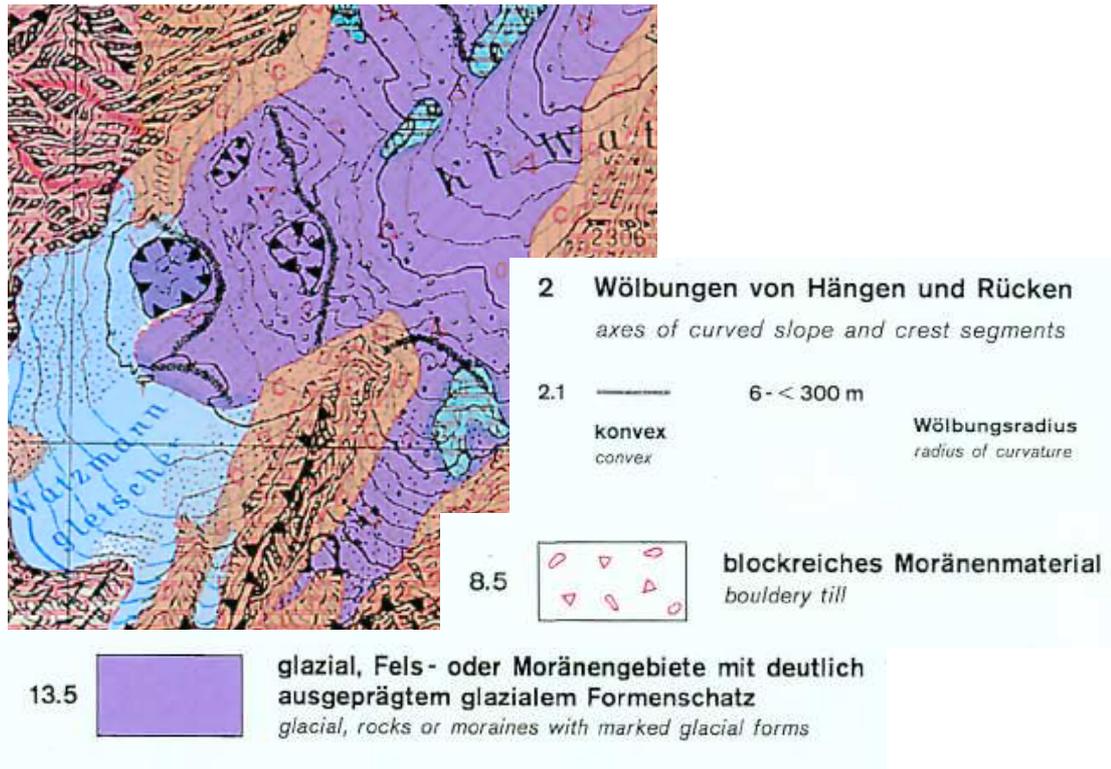


Abbildung 2-7: Ausschnitt aus der GMK 25 Blatt Königsee zur Verdeutlichung des Prinzips der Informationsschichten. Moränen werden mit der Wölbungssignatur im glazialen Prozessbereich mit entsprechender Materialkennzeichnung dargestellt.

Die Aufnahme des Reliefs in einzelne kartographische Informationsschichten und die Zusammensetzung einer Form aus verschiedenen Einzelzeichen, wird als Baukastensystem bezeichnet. Dieses System wurde bei der Legendenentwicklung als Neuerung gegenüber dem internationalen Raum gesehen (Leser 1982).

Große Formen werden durch quantifizierbare Signaturen für ihre Reliefelemente und –eigenschaften gekennzeichnet und nicht durch komplexe und nicht quantifizierbare Symbole. Durch das Baukastensystem entsteht eine flexible Legende, in der sich auch noch nicht bekannte Gebiete, beispielsweise mit anderen Formen, Sedimenten und Gesteinen, kartieren lassen, ohne das neue Signaturen erstellt werden müssen. Neue Gegebenheiten können durch eine Kombination der vorhandenen Symbole beschrieben werden (Leser & Stäblein 1975). Die GMK 25 Legende ist deswegen nicht nur in Mitteleuropa, sondern auch in anderen Klimazonen einsetzbar (Barsch 1987). Die Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über den Inhalt der einzelnen zu kartierenden Hauptinhaltsgruppen und soll damit den Aufbau der GMK 25 Legende verdeutli-

## 2 Theoretischer Hintergrund

chen. Pro Hauptinhaltsgruppe wird eine unterschiedliche Anzahl von Informationsschichten (vgl. Abbildung 2-6) erstellt.

Hauptinhaltsgruppen	Inhalt
<b>Geomorphographie und Geomorphometrie</b> (Habituelle Reliefcharakterisierung)	1. Neigung der flächenhaften Reliefelemente 2. Wölbungen der Reliefelemente 3. Wölbungen von Kuppen und Kesseln 4. Stufen, Kanten und Böschungen 5. Täler und Tiefenlinien 6. Einzelformen, Kleinformen und Rauigkeit 7. Formen und Prozessspuren
<b>Substrat/Oberflächennaher Untergrund</b> (Geomorphostruktur/Substantielle Reliefcharakterisierung)	8. Körnung, Zusammensetzung und Charakterisierung der Lockersubstrate 9. Lagerung der Lockersubstrate 10. Schichtigkeit und Mächtigkeit der Lockersubstrate 11. Oberflächengesteine
<b>Geomorphodynamik und Geomorphogenese</b> (Genetisch-dynamische Reliefcharakterisierung)	12. Geomorphologische Prozesse 13. Geomorphologische Prozess- und Strukturbereiche
<b>Ergänzungen und Situation</b> (Räumliche und topographische Reliefcharakterisierung)	14. Hydrographie 15. Ergänzende Angaben 16. Situation und Position

Tabelle 2-1: Aufbau der Legende GMK 25.

Geomorphodynamik und Geomorphogenese stehen thematisch im Mittelpunkt der Karte. Dies drückt auch die Verwendung der Farbe als stärkstes kartographisches Ausdrucksmittel für die geomorphologischen Prozess- und Strukturbereiche aus (Leser 1982). Durch unterschiedliche Farbtöne oder Farbwerte können weitere Eigenschaften des Kartiergebietes betont werden. Beispielsweise können Unterschiede in der Transportbilanz dadurch gekennzeichnet werden, dass Flächen auf denen Ab-

## 2 Theoretischer Hintergrund

tragung vorherrscht, dunkler dargestellt werden, als Akkumulationsflächen, die dann heller gedruckt werden. Auch unterschiedliche Entstehungstypen (z.B. End- oder Grundmoräne) oder strukturelle Verschiedenheiten können hervorgehoben werden (Leser & Stäblein 1980).

Die einzelnen Signaturen der Kartierlegende werden in diesem Rahmen nicht näher betrachtet, sie werden beispielsweise bei Leser und Stäblein (1980) vorgestellt.

Obwohl die GMK 25 für eine Karte im Maßstab 1:25.000 konzipiert ist, sind auch großmaßstäbigere Kartierungen im Maßstab 1:5.000 möglich (Barsch 1987; Leser & Zollinger 1987).

Um neben den geomorphologischen Informationen auch einen geologischen Überblick zu geben, wird auf dem Kartenblatt separat eine geologische Übersichtskarte im Maßstab 1:500.000 abgedruckt.

Ein Vorteil des Kartiersystems ist die Möglichkeit der Darstellung in einem GIS, obwohl diese Anwendungsmöglichkeit bei der Erstellung der Legende wahrscheinlich nicht berücksichtigt wurde. Die Aufteilung in Informationsschichten ist dem eines GIS ähnlich. Eine weitere Stärke der Legende der GMK 25 ist sicherlich ihre bereits dargestellte Flexibilität. Da alle Informationsschichten jedoch auf nur einem Kartenblatt dargestellt werden, wird das Kartenbild sehr kompliziert und für Wissenschaftler, die nicht mit diesem System vertraut sind, nur schwer lesbar (Leser 1982). Es wurden daher bereits Vorschläge gemacht, die GMK in ein Mehrblattsystem umzuwandeln (Leser & Schaub 1987; Spönemann & Lehmeier 1989).

Klimaszewski (1990) kritisiert an der GMK, dass dieses vorhandenes geomorphologisches Wissen nicht nutzt. Seiner Meinung nach wird eine zu geringe Anzahl synthetische Symbole, wie z.B. der bereits angesprochene Moränenwall, verwendet.

Leser und Schaub (1987) sind der Ansicht, dass die Anwendung der Kartierlegende im Hochgebirge trotz der vielen Formenwechsel auf engstem Raum möglich ist. Auch die vier im GMK Projekt existierenden Kartenbeispiele mit Hochgebirgsrelief sprechen dafür. Dazu gehören die GMK 25 Blätter Oberstaufen 8426 (Blatt 14), Bayersoien 8331 (Blatt 25), Königsee 8443 (Blatt 16) und das Blatt Rosenheim C8338 (Blatt 3) der GMK 100 (Barsch, et al. 1987). In den Erläuterungen des Blatts Königsee schlägt der Kartierer vor, aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Neigung zu verzichten, Wölbungslinien sparsam anzuwenden und Stufen und Kanten nur mit Signaturen hervorzuheben, wenn sie nicht durch Fels und Felsstufen hervorgerufen

## 2 Theoretischer Hintergrund

werden (Fischer 1984). Mani und Kienholz (1988) wenden die GMK 25 Legende mit den Vorschlägen von Fischer erfolgreich an, um ein Gebiet im Gasterntal/Schweiz zu kartieren.

### 2.4.3.2 GMK Hochgebirge

Wie im vorherigen Kapitel dargelegt ist eine Kartierung im Hochgebirge mit der GMK 25 Legende möglich. Trotzdem wurde 1998 eine Legende für geomorphologische Kartierungen im Hochgebirge (GMK Hochgebirge) veröffentlicht (Kneisel, et al. 1998). Die GMK 25 und GMK 100 Legende, sowie die Änderungsvorschläge von Fischer (1984) dienen als Grundlage für die neue GMK Hochgebirge. Auch diese Legende soll als Baukastensystem verstanden werden, für verschiedene Maßstäbe von 1:5.000 bis 1:100.000 anwendbar sein und in unterschiedliche Informationsschichten aufgeteilt werden können. Die Tabelle 2-2 zeigt, ähnlich der Tabelle 2-1 für die GMK 25, die verschiedene Hauptinhaltsgruppen.

Hauptinhaltsgruppen	Inhalt
<b>Geomorphographie und Geomorphometrie</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Wölbungen/Wölbungslinien</li><li>2. Stufen, Kanten und Böschungen</li><li>3. Talformen</li><li>4. Geomorphologische Einzelformen</li><li>5. Flächenhafte Kleinformen und Oberflächenrauheit</li></ol>
<b>Substrat/Oberflächennaher Untergrund</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>6. Fest-/Lockergestein</li></ol>
<b>Geomorphodynamik</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>7. Geomorphologische Prozesse</li></ol>
<b>Ergänzungen und Situation</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>8. Glaziologie/Hydrographie</li><li>9. Ergänzende Angaben</li><li>10. Situation und Position</li></ol>

Tabelle 2-2: Aufbau der Legende GMK Hochgebirge.

Im Unterschied zur GMK 25 soll auf Raster, Schattierungen und Farbgebungen verzichtet werden. So sollen die Lesbarkeit erhöht, Kosten eingespart und besonders

## 2 Theoretischer Hintergrund

wissenschaftliche Publikationen erleichtert werden. Es existieren keine Signaturen für die Hangneigung, da davon ausgegangen wird, dass sie aus den Isohypsen abgelesen werden kann. Um das Kartenbild nicht zu überladen, sollen Wölbungssignaturen in Kartierungen mit der GMK Hochgebirge nur sparsam verwendet werden. Auch bei der Darstellung des oberflächennahen Untergrundes existieren Unterschiede zur GMK 25. Zwar erfolgt eine Unterscheidung zwischen Locker- und Festgestein, doch im Gegensatz zur GMK 25 Legende wird hier der Informationsgehalt deutlich eingeschränkt. Das Festgestein wird zwar flächenhaft dargestellt, aber nicht petrographisch unterschieden, für das Lockersubstrat ist keine flächendeckende Darstellung vorgesehen. Falls trotzdem eine nähere Kennzeichnung des Lockersubstrats erwünscht wird, beispielsweise um genetische Aussagen zu unterstützen, sind Signaturen dafür vorhanden. Zusätzlich wird auf die flächenhafte und farbige Darstellung der Geomorphogenese verzichtet. Die Autoren sind der Meinung, dass sich die Genese häufig schon aus den Prozessen und Formen ablesen lässt. Dafür wurde der Katalog der Einzelsignaturen deutlich erweitert. Durch ausgefüllte oder hohle Signaturen können bewachsene oder unbewachsene Formen und damit auch das Alter bzw. die Aktivität oder Passivität verdeutlicht werden. Als Beispiel soll hier die in Abbildung 2-8 dargestellte Moränensignatur dienen, die in der GMK 25 nicht als einzelne Signatur vorhanden ist.

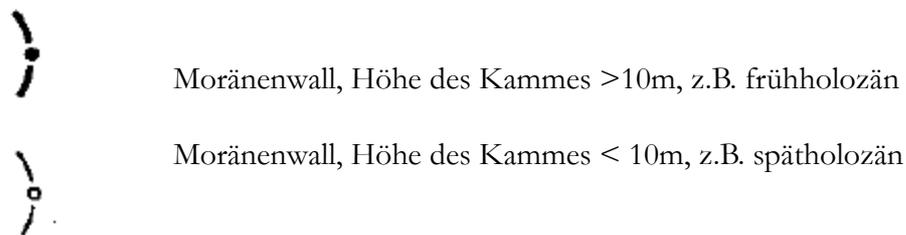


Abbildung 2-8: Signatur für Moränenwälle aus der GMK Hochgebirge. Je nach Dicke der Signatur und der Füllung des Kreises kann zwischen unterschiedlichen Höhen und Altern der Moränen differenziert werden (aus Kneisel, et al. 1998).

Die Legende ist zusätzlich durch glaziologische Signaturen ergänzt worden, die etwa die Oberfläche eines Gletschers näher beschreiben und Toteis oder Permafrost kennzeichnen (Kneisel, et al. 1998).

Bei Kartierungen mit der GMK Hochgebirge wurden einige Probleme festgestellt. So konnte die flächenhafte graue Darstellung des Festgesteins schlecht von der eben-

## 2 Theoretischer Hintergrund

falls grauen Permafrostsignatur unterschieden werden. Zusätzlich wurde der Prozess Solifluktion bisher in der GMK Hochgebirge nur durch die Ansprache der Form von Solifluktionsloben und -girlanden dargestellt. Um dies zu umgehen und die Solifluktion als wichtigen rezenten Prozess zu würdigen, wurde die Solifluktionssignatur später aus der GMK 25 übernommen (Kneisel & Tressel 2000).

### 3 Material und Methoden

In diesem Kapitel sollen die in der Diplomarbeit eingesetzten Materialien und Methoden vorgestellt werden. Im ersten Teil wird das verwendete Material präsentiert. Im zweiten Teil wird zunächst die generelle Vorgehensweise einer geomorphologischen Kartierung beschrieben, bevor auf die eigene Kartierung eingegangen wird. Neben den Vorbereitungsarbeiten und der analogen Kartierung im Gelände wird auch die digitale Kartierung am Computer vorgestellt.

#### 3.1 HRSC-A Datensatz

Als digitale Kartiergrundlage zur Übertragung der im Feld aufgenommenen Symbole wurde ein HRSC-A (High Resolution Stereo Camera- Airborne) Datensatz verwendet. Die HRSC-A Technologie wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für Erkundigungen auf dem Mars entwickelt (Otto et al. accepted). Der Vorteil dieser Technologie liegt darin, dass in einem Arbeitsschritt sowohl digitale Luftbild- als auch Höhendaten aufgenommen werden können. Dabei werden gleichzeitig neun Bildstreifen erstellt. Fünf werden für die photogrammetrische Stereobildanalyse verwendet, vier dienen zur Gewinnung multispektraler Bilddaten (rot, grün, blau, nahes Infrarot). Die Auflösung ist abhängig von der Flughöhe und beginnt bei 10cm (Dikau et al. 2007).

Die Befliegung des Turtmantals mit den entsprechenden Aufnahmen fand am 28.09.2001 statt. Die Flughöhe betrug 6350m (3000 bis 4000m über der Oberfläche). Die Aufnahme besitzen eine horizontale Auflösung von circa 25 cm und eine vertikale von circa 20cm (Roer 2005).

Das DLR verarbeitete die Daten und generierte Orthobilder mit einer Auflösung von 50cm, sowie ein DHM mit einer horizontalen Auflösung von einem Meter (Otto, et al. accepted). Roer (2005) kritisiert, dass der Wissenschaftler in den automatischen Prozess der Bildverarbeitung der HRSC-A Daten nicht eingreifen kann und keine entsprechende Qualitätskontrolle möglich ist. Das DHM weist in unregelmäßig verteilten Bereichen des Turtmantals systematische Fehler auf. So sind an manchen Stellen regelmäßige Muster vorhanden, die das eigentliche Relief überlagern. Die Höhenausdehnung des Musters ist zwar gering, doch sollte dieser Fehler bei der Berechnung von geomorphometrischen Parametern wie der Wölbung beachtet werden (Rasemann 2004). Die Herkunft des systematischen Fehlers ist bisher nicht geklärt,

### 3 Material und Methoden

Nyenhuis (2005) vermutet aber einen Interpolationsfehler im Rahmen des Prozessierungsverfahrens. Zusätzliche Probleme bereiten auf dem Luftbild die vorhandene Schneebedeckung und der Schattenwurf des umliegenden Reliefs. Während der Schattenwurf kein Problem für das DHM darstellt, kommt es durch die Schneebedeckung zu einer Glättung des Reliefs und so zu einer Verdeckung vorhandener Formen. Besonders das Kartiergebiet im Mattertal weist diese Schwächen auf, welches aufgrund der Nähe zum Turtmantal sowohl als HRSC-A Höhenmodell als auch als Luftbild in diesem Datensatz vorhanden ist.

#### 3.2 Kartenmaterial

In den folgenden Abschnitten werden die in der Arbeit verwendeten Karten kurz vorgestellt. Bibliographische Angaben finden sich dazu im Kartenverzeichnis am Schluss der Arbeit.

##### Landeskarte der Schweiz

Zur Orientierung im Gelände wurde die Landeskarte der Schweiz, eine topographische Karte, verwendet. Dabei deckten die Blätter 1307 Vissoie und 1308 St. Niklaus die Kartiergebiete ab. Der Kartierstand des ersten Blatts liegt bei 1992, der des zweiten bei 1999.

##### Digitale Landeskarte der Schweiz

Die digitale Landeskarte 1:25.000 der Schweiz liegt im Rasterformat vor und wurde teilweise als topographische Kartiergrundlage verwendet. Im Gegensatz zum Vector25 Landschaftsmodell können die einzelnen Informationsebenen nicht thematisch in GIS getrennt werden.

##### Vector25

Vector25 ist ein digitales Landschaftsmodell der Schweiz und basiert auf der Landeskarte 1:25.000. Die Daten sind im Vektorformat vorhanden und eignen sich deshalb für die Anwendungen in GIS. Der Datensatz besteht aus neun thematischen Ebenen, namentlich dem Straßen- und Eisenbahnnetz, dem übrigen Verkehr, dem Gewässernetz, den Primärflächen (Primäre Bodenbedeckung wie Wald, Geröll, Festgestein), Gebäuden, Hecken und Bäumen, künstlichen Anlagen und verschiedenen Einzelobjekten. Das Landschaftsmodell liegt blattschnittfrei vor und besitzt eine Lagegenauigkeit von 3-8m. Alle sechs Jahre werden die vorhandenen Informationen nachgeführt. Für den vorhandenen Ausschnitt des Turtmantals, der auch die Randbereiche des

### 3 Material und Methoden

Mattertals erfasst, liegt die letzte Aktualisierung zwischen 1998 und 1999. Diese Information ist für die Nutzung der Daten in der vorliegenden Arbeit wichtig, da sich einige Flächen, wie z.B. die Ausdehnung der Gletscher seit 98/99 deutlich verändert haben.

#### Siegfriedkarte/Topographischer Atlas der Schweiz

Der topographische Atlas der Schweiz, auch Siegfriedkarte genannt, wurde von 1870 bis 1926 teilweise im Maßstab 1:25.000 und teilweise 1:50.000 (Alpen) veröffentlicht. In dieser Arbeit wurde das analoge Blatt Visperthal von 1927 im Maßstab 1:50.000 verwendet und dazu eingescannt und georeferenziert.

#### Topographische Karte der Schweiz 1:100.000/Dufourkarte

Die Topographische Karte der Schweiz wurde zwischen 1832 und 1864 unter der Leitung von General Dufour aufgenommen und ihm zu Ehren später als Dufourkarte bezeichnet. Im Jahre 2003 wurde dieses Kartenwerk digital veröffentlicht und ist damit ein leicht zugängliches Kartenwerk um z.B. historische Gletscherausdehnungen zu erhalten. Die Kartierarbeiten der Dufourkarte fallen in den letzten Gletscherhochstand der Neuzeit und können so wichtige Informationen über die Stände liefern.

#### Geologischer Atlas der Schweiz

Der geologische Atlas der Schweiz 1:25.000 liegt nicht flächendeckend vor, ist aber für die Untersuchungsgebiete vorhanden. Er gibt Auskunft über die obersten Schichten des Untergrunds. Das Blatt 71 St. Niklaus (LK 1308) wurde mit dem Erläuterungsheft von Bearth (1980) verwendet.

#### Karte der Stände des Turtmannngletschers 1850 bis 1964

Der Turtmannngletscher wird seit Ende des 19. Jh. hinsichtlich seiner Ausdehnung beobachtet. Die lokale Forstbehörde war viele Jahre für diese Aufgabe verantwortlich, heute wird der Gletscherstand von den Wirten der Turtmannnhütte übernommen. A. Tscherrig, der ehemalige Oberförster von Oberems, hat 1965 die aufgenommenen Gletscherstände in eine Karte überführt. Diese Karte, die die Ausdehnung von 1850 bis 1964 zeigt, liegt als Scan vor und wurde von Wolff (2006) georeferenziert und kann somit in GIS verwendet werden.

### 3.3 Generelle Vorgehensweise bei der geomorphologischen Kartierung

Trotz neuer digitaler Möglichkeiten bleibt die Feldarbeit die Basis der geomorphologischen Kartierung (Gustavsson, et al. 2006; Leser 1977). Sie ist jedoch in der Regel sehr zeitaufwendig und kostenintensiv und sollte deswegen einer guten Planung folgen. Die Abbildung 3-1 gibt eine Übersicht über die generelle Vorgehensweise bei einer Kartierung, eine ausführlichere Darstellung der im folgenden Text vorgestellten Kartiermethode findet sich bei Leser (1977).

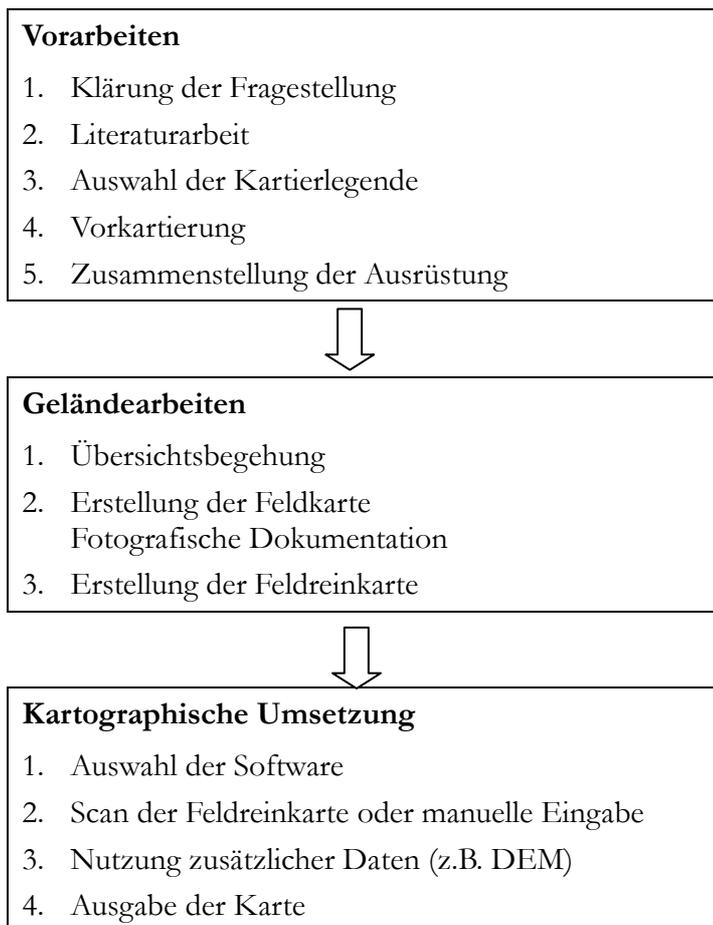


Abbildung 3-1: Vorgehensweise bei einer geomorphologischen Kartierung (verändert nach Otto (2001) in Anlehnung an Leser (1977)).

Vor Beginn einer geomorphologischen Kartierung sollte die Fragestellung geklärt werden. Sie entscheidet über den Kartiermaßstab und die im Feld angewendeten Untersuchungsmethoden. Der Aufnahmemaßstab im Feld soll größer sein, als der Maßstab der angestrebten Karte. Anschließend erfolgt die Auswertung bereits vorhandener Literatur und existierender Karten.

Meiner Meinung nach erfolgt die Auswahl der Kartierlegende ebenfalls bereits in der

### 3 Material und Methoden

Vorbereitungsphase, da der entsprechende Kartierschlüssel vorhanden sein muss. Um sich einen Überblick verschaffen zu können, ist eine Vorkartierung anhand von Luftbildern und bereits existierenden Karten ratsam. Zusätzlich muss die Ausrüstung für die Feldarbeit zusammengestellt werden, dazu gehören Material für die Kartiergrundlage, das Feldbuch und verschiedene Werkzeuge sowie Schreibmaterial (Leser 1977).

Vor der eigentlichen Geländearbeit erfolgt eine Übersichtsbegehung im Gelände. Dabei soll sich ein Überblick über das Gesamtrelief und seine Gliederung verschafft werden, sowie der Kartierablauf festgelegt werden. Die Feldkarte, die nach der Übersichtsbegehung erstellt wird, ist als Dokument anzusehen und es dürfen nur Eintragungen im Gelände vorgenommen werden. Zusätzliche Informationen, die nicht in die Karte geschrieben werden, können im Feldbuch festgehalten werden. Die Feldreinkarte, die als Abschluss der Geländearbeit erstellt wird, soll noch im Geländequartier abschließend bearbeitet werden und die Eintragungen erneut vor Ort geprüft werden (Leser 1977).

Die kartographische Umsetzung der Karte hat sich stark seit der Veröffentlichung des Buches von Leser 1977 verändert. Wie bereits in Kapitel 2.3.5 erwähnt, haben technische Innovationen sowohl bei der Hardware als auch bei der Software, die Erstellung von Karten und ihre Aktualisierung erleichtert. Standen lange manuelle Techniken bei der Kartenherstellung im Vordergrund, so sind Vitek et al. (1996, S. 239) der Meinung, dass „technological advances in hardware and software have completely replaced *any* need, and we mean any need, for hand-produced maps“.

Für die Kartenerstellung am Computer muss zunächst ein passendes Programm ausgewählt werden. Anschließend sollte entschieden werden, ob die Feldreinkarte gescannt und dann digitalisiert wird oder ob sie manuell in den Computer übertragen werden soll. Mit einem digitalen Höhenmodell in entsprechender Auflösung können beispielsweise in einem GIS geomorphometrische Ableitungen durchgeführt, und damit die Karte ergänzt werden. Insgesamt sollten bei der kartographischen Umsetzung die Erkenntnisse der kartographischen Semiologie (vgl. Kapitel 2.3.3) beachtet werden, um gut lesbare Karten zu erzeugen. Die Ausgabe der fertigen Karte erfolgt anschließend durch einen Drucker oder Plotter.

### 3.4 Eigene Vorgehensweise bei der geomorphologischen Kartierung

Ziel der Arbeiten im Turtmantal/Mattertal ist die Erstellung vier großmaßstäbiger, geomorphologischer Karten. Das Vorgehen dieser Kartierung, von den Vorarbeiten bis zur Erstellung der digitalen Karten, wird in den nächsten Abschnitten dargestellt.

#### 3.4.1 Vorarbeiten

Der Geländearbeit wurde eine kurze Phase der Literaturarbeit vorangestellt. Dabei habe ich mich vor allem mit der Vorgehensweise der Kartierung beschäftigt, und nur wenig mit den Untersuchungsgebieten, da diese bereits aus einem Geländeaufenthalt im Sommer 2005 bekannt waren.

Die Auswahl der beiden Kartiergebiete, das Gletschervorfeld des Turtmanngletschers und das Gletschervorfeld im Rinderalpji-Gebiet/Mattertal erfolgte aus verschiedenen Gründen. Ersteres wurde ausgesucht, da es gut zu erreichen ist, auf einer vergleichsweise geringen Höhe mit 2200m liegt und bereits, wenn auch in einem kleineren Maßstab, geomorphologisch kartiert wurde. Es eignete sich damit als ein Einstiegsgebiet für mich als eine unerfahrene Kartiererin. Das zweite Gebiet dagegen wurde ausgewählt, da bisher keine geomorphologischen Kartierarbeiten in diesem Bereich durchgeführt wurden und es durch seine Lage zwischen 2700 und 3100m, seine geringmächtigere Vergletscherung und seine hohe Reliefenergie einen Kontrast zum Turtmanngletschervorfeld darstellt.

Um diese Kartierung den bereits vorhandenen Arbeiten im Turtmantal anzupassen wurden die GMK Hochgebirge (Kneisel, et al. 1998) und die GMK 25 (Leser & Stäblein 1980) als Legenden ausgewählt. Im Unterschied zur geomorphologischen Karte des gesamten Tals, die mit einer zusammengesetzten Legende aus der GMK Hochgebirge und der GMK 25 kartiert wurde (Otto 2001), wurden in dieser Arbeit beide Legenden getrennt verwendet.

Ein Vorteil der GMK-Legendensysteme liegt darin, dass sie in einem GIS eingesetzt werden können und die Symbole, Linien- und Flächensignaturen größtenteils digital vorliegen.

Eine Vorkartierung mithilfe von Fernerkundungsdaten konnte aus zeitlichen Gründen vor dem Geländeaufenthalt nicht durchgeführt werden. Es bestand der Plan dieses im Geländequartier nachzuholen. Probleme mit dem digitalen Datensatz ermöglichten die Auswertung jedoch erst nach dem Abschluss der Geländearbeit.

## 3 Material und Methoden

### 3.4.2 Geländearbeiten

Meine Geländearbeiten fanden vom 22.08. bis zum 23.09.2006 statt. Nach einer Übersichtsbegehung wurde zunächst das Gletschervorfeld des Turtmanngletschers im Maßstab 1:5.000 kartiert. Aufgrund technischer Probleme lag als Kartiergrundlage nur die vergrößerte topographische Karte (Landeskarte der Schweiz 1:25.000) vor. Dieses Gebiet wurde als erstes kartiert, da die Höhe zur Akklimatisation geeignet war und bereits Kartierungen, wenn auch kleinmaßstäbiger, existieren (vgl. Eybergen 1986; Otto 2001; Wolff 2006). Dadurch dass der Turtmanngletscher auch touristisch genutzt wird, erleichterten Wanderpfade die Begehung des Geländes und damit auch die Kartierarbeiten.

Das zweite Gebiet „Rinderalpi“ im Mattertal ist erst nach einem längeren Fußmarsch vom Turtmanntal aus zu erreichen. Die Distanz von Wohnorten im Mattertal bis in dieses Gebiet ist deutlich größer, weswegen der Weg durch das Turtmanntal gewählt wurde. Die Geländearbeit war nur bei sehr guten Witterungsverhältnissen möglich. Loses Geröll und steile Abschnitte erschwerten die Arbeit erheblich. Die geomorphologische Kartierung erfolgte im Maßstab 1:2.500 und wurde ebenfalls auf einer vergrößerten Landeskarte der Schweiz durchgeführt.

Beide Gebiete wurden mit einer Digitalkamera fotografisch dokumentiert, um auch später noch offene Fragen klären zu können. Im Geländequartier erfolgte eine Zeichnung der Feldkarte, die als Grundlage für die kartographische Umsetzung diente.

### 3.4.3 Kartographische Umsetzung

Die Kartenerstellung am Computer wurde mit ArcView 9.1, einem GIS aus der Produktgruppe ArcGis der Firma Esri, durchgeführt. Die im Feld aufgenommenen Daten wurden zunächst auf eine digitale Kartiergrundlage, einem Ausschnitt eines HRSC-A Höhenmodells, übertragen.

Da die HRSC-A Datensätze über ein GB groß sind, wurden die entsprechenden kartierten Bereiche in ArcMap ausgeschnitten, so dass mit einer geringeren Dateigröße gearbeitet werden konnte. Obwohl der Datensatz im Jahr 2001 aufgenommen wurde, ist er hinsichtlich der Ausdehnung der Gletscher, die seitdem deutlich zurückgegangen ist, bereits veraltet.

Durch die Erstellung eines Hillshades, einer Beleuchtungskarte in ArcMap auf Grundlage des Höhenmodells, konnte ein realistischer Eindruck über die Reliefvaria-

### 3 Material und Methoden

tionen gewonnen werden. Die Erdoberfläche erscheint bei einem Hillshade so, als ob sie von einer fernen Lichtquelle erhellt würde (Buckley, et al. 2004). Der Übertrag der analogen Kartierung in die digitale Form wurde mit dem Hillshade als Kartierunterlage erheblich erleichtert, als spätere Kartengrundlage in der Darstellung diente jedoch die topographische Landeskarte der Schweiz. Die Feldreinkarte des Turtmanngletschervorfels im Maßstab 1:5.000 wurde auf einen Maßstab von 1:10.000 übertragen und generalisiert, die der Rinderalpji von 1:2.500 auf 1:5.000, wie in den Kartierlegenden vorgesehen.

Die benötigten Symbole für die Legenden GMK Hochgebirge und GMK 25 wurden größtenteils von Otto (2001) im Rahmen einer Diplomarbeit erstellt und können im Internet bezogen werden ([www.giub.uni-bonn.de/otto/](http://www.giub.uni-bonn.de/otto/)). Fehlende Symbole konnten teilweise in ArcView und sonst mit dem Programm Font Creator der Firma High-Logic erstellt werden.

Für die bessere Vergleichbarkeit der späteren Karten wurde die Einteilung der Stufensignaturen (0-2m, 2-10m, 10-20m und > 20m) aus der GMK Hochgebirge übernommen und auch in der GMK 25 Karte angewendet.

Die für die GMK 25 notwendige Hangneigungskarte wurde aus dem HRSC-A-Höhenmodell in ArcMap berechnet. Da die Hangneigung sehr detailliert durch das 1m Höhenmodell wiedergegeben wird und die Variationen zu kleinräumig für die Kartendarstellung sind, wurde das Höhenmodell mit einem bilinearen Algorithmus auf ein 10m Raster für das Rinderalpji-Gebiet und auf ein 15m Raster für das Gletschervorfeld des Turtmanngletschers interpoliert. Nach Eingabe der entsprechenden Hangneigungsklassen wurde das Höhenmodell in ein Shapefile umgewandelt, um dort die Signaturen gemäß der Kartierlegende angeben zu können. Da die Hangneigungskarte die Ausdehnung des Turtmanngletschers im Jahre 2001 zeigt und er seitdem deutlich zurückgeschmolzen ist, traten dort Fehler in der Hangneigung auf, die manuell korrigiert wurden. Ich habe angenommen, dass die Neigung, wie im näheren Umfeld, in der Klasse 2-15° liegt.

Als Grundlage der Substratdarstellung wurde das digitale Landschaftsmodell Vector25 verwendet. Die vorhandenen Festgesteinsbereiche wurden übernommen und als eigener Layer dargestellt. Ich habe angenommen, dass diese Bereiche sich wenig verändert haben und dass die Ausdehnung, wenn überhaupt, durch das Abschmelzen der Gletscher zugenommen hat. Teilweise waren einige Festgesteinsbereiche zu klein, um in die Vektorkarte aufgenommen zu werden, so dass der Layer an einigen Stellen

### 3 Material und Methoden

durch die eigene Kartierung im Gelände ergänzt wurde. Für die Darstellung des Lockerssubstrats wurden die groben Polygone der Vector25 Karte weiter unterteilt und die entsprechenden Signaturen eingefügt.

Generell wurde zuerst eine Karte des jeweiligen Untersuchungsgebietes erstellt und die entsprechenden Layer in einer Geodatabase abgespeichert. Für die zweite Karte wurde anschließend die Geodatabase kopiert und unter einem anderen Namen abgespeichert. So bestand die Möglichkeit die kartierten Elemente an den exakt gleichen Stellen anzuzeigen und somit eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen, auch wenn diese eventuell andere Signaturen zugewiesen bekamen.

Um Informationen über die geschichtliche Entwicklung der Untersuchungsgebiete zu erhalten, wurden die erstellten Karten mit historischen Karten, teilweise auch mit Fotos, verglichen.

## 4 Untersuchungsgebiete

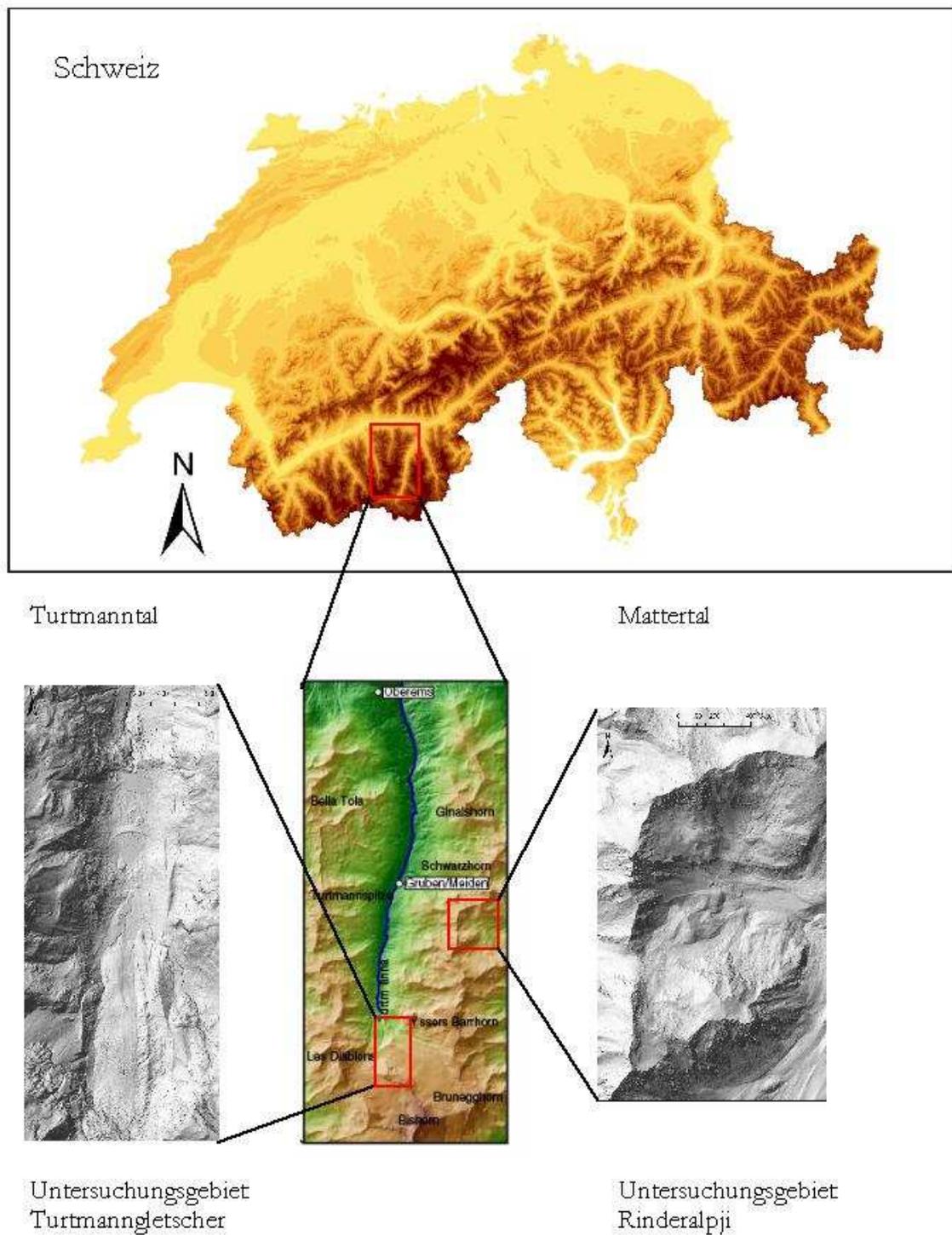


Abbildung 4-1: Untersuchungsgebiete im Turtmann/Mattertal, Schweizer Alpen (eigener Entwurf, mittlere Abbildung aus Dikau et al. 2004).

## 4 Untersuchungsgebiete

In diesem Kapitel erfolgt ein allgemeiner Überblick über das Turtmanntal und das Mattertal, beide gehören zum Kanton Wallis in der Schweiz. Zusätzlich werden die Untersuchungsgebiete, das Gletschervorfeld des Turtmanngletschers und das Gletschervorfeld Rinderalpji die in den Tälern liegen, betrachtet. Das erste Kartiergebiet befindet sich am südlichen Teil des Turtmanntals, das zweite im westlichen Mattertal an der Grenze zum Turtmanntal.

Da beide Kartiergebiete sehr kleinräumig sind, soll ihre Lage zunächst auf einer größeren Skala betrachtet werden. Es werden allgemeine Eigenschaften der beiden Täler, ihre Geologie und Geomorphologie und das vorhandene Klima dargestellt. Gleichzeitig soll ein Überblick über die bereits vorhandenen geomorphologischen Forschungsarbeiten geleistet werden.

Die eigentlichen Untersuchungsgebiete werden im letzten Unterkapitel vorgestellt.

### 4.1 Turtmanntal und Mattertal

#### 4.1.1 Allgemeine Eigenschaften

##### Turtmanntal

Das Turtmanntal befindet sich im südlichen Teil der Schweiz und liegt zwischen dem Val d'Anniviers im Westen, dem Mattertal im Osten und mündet mit seinem nördlichen Teil als ein Seitental in das Rhône-tal. Die Gebietsgröße beträgt etwa 110km<sup>2</sup> bei einer Länge von circa 15km. Den tiefsten und nördlichsten Punkt des Tales markiert der Ort Turtmann auf einer Höhe von 620m. Im Westen begrenzen die Gipfel Bella Tola (3025m ü. NN), Turtmannspitze (3080m ü. NN) und Les Diablons (3609 m ü. NN) das Tal, im Osten sind es die des Ginalshorns (3027 ü. NN), Schwarzhorns (3201 ü. NN) und des Üssers-Barrhorns (3610m ü. NN). Das Südende des Turtmanntals wird durch den Turtmann- und Bruneggletscher eingenommen, die durch das Brunegghorn (3833m ü. NN), das Bishorn (4153m ü. NN) und den Tête de Milon (3676m ü. NN) begrenzt werden. Die Gletscher entwässern in den Hauptvorfluter Turtmäna.

Die Talmorphologie wandelt sich von einem glazialen Trogtal mit einem bis zu 300m breiten Talboden im Süden, zu einem steilen Kerbtal im Norden, welches vollständig von der Turtmäna eingenommen wird. In das Haupttal münden 14 Hängetäler, die als Tällis bezeichnet werden. Die sieben Hängetäler auf der westlichen Seite besitzen eine west-ost, die sechs im östlichen Teil eine ost-west Orientierung.

Im Bereich des Trogtals befindet sich der Doppelort Gruben/Meiden, der aufgrund

## 4 Untersuchungsgebiete

fehlender Infrastruktur zum Lawinenschutz nur im Sommer bewohnt wird. Oberems ist auf circa 1330m Höhe der höchste dauerhaft bewohnte Ort im Turtmanntal und ist unter anderem mit einer Seilbahn mit den Orten Unterems und Turtmann verbunden. Touristische Einrichtungen sind kaum vorhanden und beschränken sich nur auf die Sommermonate. Die anthropogene Belastung erscheint im Turtmanntal dementsprechend gering (Nyenhuys 2005).

### Mattertal

Das Mattertal grenzt im Westen an das Turtmanntal und im Osten an das Saastal. Mattertal und Saastal kommen im Vispental zusammen, welches in das Rhône-tal mündet. Die Matter Vispa entwässert das 500km<sup>2</sup> große Mattertal. Das Gebiet wird im Osten von den Gipfeln des Seetalhorns (3037m ü. NN), des Großen Bigerhorns (3626m ü. NN), des Doms (4545m ü. NN), des Täschhorns (4490 m ü. NN), im Süden durch die Dufourspitze (4634m ü. NN), das Matterhorn (4478m ü. NN) und im Westen von den des Dent Blanche (4357m ü. NN) und des Weissorns (4506m ü. NN) eingegrenzt. Im Westen befinden sich ebenfalls die bereits bei der Beschreibung des Turtmanntals erwähnten Gipfel des Ginalhorns, Schwarzhorns und des Üssers-Barrhorns.

Im Gegensatz zum Turtmanntal ist das Mattertal dauerhaft bewohnt und stark touristisch genutzt. Zermatt ist die südlichste größere Siedlung, Täsch, Randa, St. Nikolaus, Grächen, Embd und Törbel folgen in nördliche Richtung. Zermatt ist über eine Schmalspureisenbahn mit Visp im Rhône-tal verbunden.

### 4.1.2 Geologie

Je nach Herkunftsgebiet können drei Haupteinheiten alpiner Deckschichten unterschieden werden. Es handelt sich dabei um die Helvetischen Decken (Sedimentgesteine), die Penninischen Decken (metamorphe Sediment- und Kristallingesteine) und um die Ostalpinen Decken (Sediment- und Kristallingesteine). Letztere umfassen u. a. die Walliser Alpen südlich der Rhône und damit auch die Untersuchungsgebiete. Der gesamte Bereich des südlichen Wallis zwischen Großem St. Bernhard, Rhône-tal und Simplon wird geologisch durch den Deckenkomplex Bernharddecke/Monte Rosa Decke eingenommen. Dieser Komplex ist einer der kompliziertesten der Alpen (Labhardt 2001).

## 4 Untersuchungsgebiete

### Turtmantal

Im Turtmantal überwiegen Zweiglimmergneise und Muskowitschiefer, die zur Siviez-Mischabel-Decke gehören (vgl. Abbildung 4-2) (Bearth 1980). Sie werden an einigen Stellen des Tales von Sedimenten der Barrhorn-Serie überlagert, die aus hellen und dunklen Kalken, Marmor und Sandsteinen besteht. Im Nordwesten stehen Quarzit, Marmor und Kalk an.

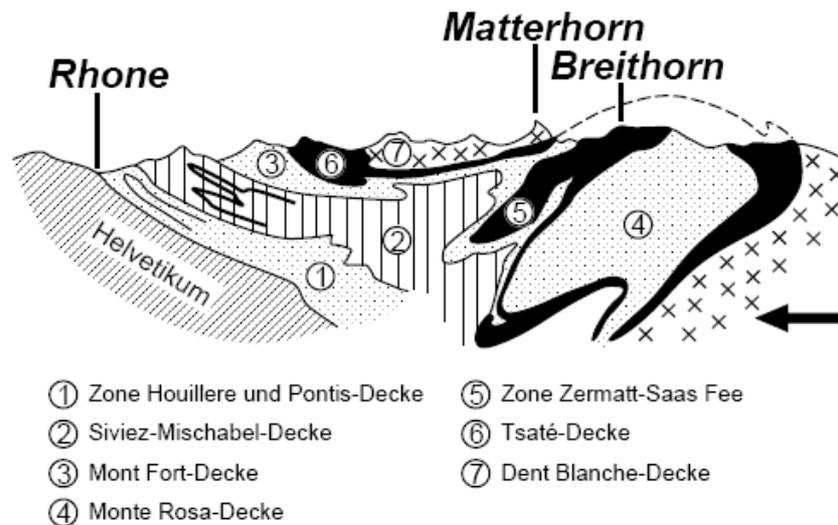


Abbildung 4-2: Geologisches Profil der südlichen Walliser Alpen (aus Labhardt 2001).

### Mattertal

Die penninische Mischabel-Decke prägt auch den geologischen Untergrund im nördlichen Mattertal. In der Gegend von Randa steigt ein Augengneiskörper auf, der südlich von St. Niklas mit circa 1000m seine größte Mächtigkeit besitzt (Bearth 1980). Im Süden des Mattertals legt sich die Dent-Blanche Decke über den Bernhard-Monte Rosa Komplex. Sie besteht vor allem aus Gneisen und Gabbros und baut einige bekannte 4000er, wie das Matterhorn, den Dent Blanche, das Obergabelhorn, das Zinalrothorn und das Weisshorn, auf. Der Bereich um Zermatt und den Gornergrat wird als Zone von Zermatt-Saas bezeichnet und ist durch Kalkschiefer und Grünsteine wie Serpentin, Gabbro und Basalt charakterisiert. Der südöstliche Teil des Mattertals wird durch die kristalline Monte Rosa Decke geprägt (Labhardt 2001). Die Abbildung 4-2 soll die Lage der vorgestellten Decken graphisch verdeutlichen.

## 4 Untersuchungsgebiete

### 4.1.3 Geomorphologie

#### Turtmanntal

Das gesamte Turtmanntal wurde bereits im Maßstab 1:25.000 geomorphologisch kartiert (Otto 2001; Otto & Dikau 2004). Das vorhandene Trogtal und die Hängetäler zeigen, dass es sich um ein glazial überprägtes Tal handelt. Höchstens 14% des Tales sind heute noch von Gletschern bedeckt (Otto & Dikau 2004). Der Talboden des Haupttals enthält hauptsächlich glaziofluviale Sedimente in die sich die Turtmänna einschneidet, charakteristisch für das Tal sind zusätzlich Schwemm- und Murkegel, Lawinenbahnen und glazio-fluviale Terrassen.

Die Hängetäler werden von glazialen und periglazialen Prozessen dominiert. Sie liegen mit ihrer Höhe zwischen 2300 und 3000m in dem Bereich, in dem periglaziale Prozesse vorherrschen (Roer 2005), dass durch das Vorhandensein von Blockgletschern, Solifluktionsloben und Wanderblöcken bestätigt wird. Die ersten Untersuchungen zu Blockgletschern und Permafrost im Turtmanntal wurden von Van Tantenhoove und Dikau (1990) durchgeführt. Insgesamt existieren 83 Blockgletscher im Turtmanntal, wovon 80 bereits geomorphologisch kartiert und ihrem Aktivitätsstatus entsprechend klassifiziert wurden (Nyenhuis et al. 2005). Ebenfalls von Nyenhuis (2005) wurde die Permafrostverbreitung aufgenommen, die kleinräumig stark differenziert auftritt. Weitere Untersuchungen stammen von Pfeffer (2000). Roer (2005) untersuchte mithilfe einer Kombination aus geomorphologischer Kartierung und digitaler photogrammetrischer Methoden die Bewegung von Blockgletschern im Turtmanntal und stellte eine Beschleunigung seit 1990 fest. Ebenfalls mit Blockgletschern im Turtmanntal beschäftigte sich von Elverfeldt (2001). Wolff (2006) kartierte die Moränenverteilung und modellierte die Höhe der Schneegrenze. Die Verteilung der Korngrößen wurde von König (2006) anhand des HRSC-A Luftbildes des Turtmanntals untersucht.

Weitere geomorphologische Arbeiten wurden von Rasemann (2004) durchgeführt, der die geomorphometrische Struktur der Oberfläche mithilfe von DHMs und GIS betrachtete. Er führte eine geomorphometrische Analyse auf verschiedenen räumlichen Skalen durch. Otto (2006) beschäftigte sich mit der räumlichen Verbreitungsstruktur von Sedimentspeichern und der Quantifizierung ihrer Sedimentmenge. Er kam zu dem Schluss, dass über 70% des Sediments in den Hängetälern gespeichert ist. Die insgesamt vorhandene gespeicherte Sedimentmenge im Turtmanntal beträgt

#### 4 Untersuchungsgebiete

zwischen 780 und  $1030 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Dabei sind Moränen die Hauptspeicher. Mit besonderer Berücksichtigung von Wänden und steilen Hangbereichen, die nicht mit klassischen Luftbildern zu erfassen sind, befasste sich Löwner (2005) bei der semantischen Modellierung geomorphologischer Objekte in einem GIS. Hörsch (2003) untersuchte den Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief im Turtmantal und Lötschental.

##### Mattertal

Das Mattertal ist ebenfalls ein glazial überprägtes Tal. Auch heute sind noch größere vergletscherte Gebiete vorhanden, wie beispielsweise südlich von Zermatt, wo Findelgletscher, Gornergletscher, Oberer und Unterer Theodulgletscher, Furggletscher und Zmuttgletscher ins Tal fließen. 1995 waren 40% des Tales von Gletschern bedeckt (Dennerle & Maisch 1995). Die Seitentäler, die ebenfalls einige Gletscher aufweisen, kennzeichnet ein deutlicher Kerbtalcharakter, das Haupttal wird treffender als ein Kerbsohlental beschrieben. Auffällig ist die vorhandene Talasymmetrie mit einer deutlich steileren westlichen und einer flacheren, durch Sackungen gekennzeichneten, östlichen Seite. Der Grund dafür sind die nach Westen fallenden Gesteinsformationen (Dikau et al. 1996).

Im Mattertal liegt ein Schwerpunkt geomorphologischer Untersuchungen auf der Betrachtung von Permafrost. Die ersten Erkenntnisse über die Existenz von Permafrost im Mattertal wurden bei touristischen Erschließungsarbeiten gewonnen. Die Arbeitsgruppe von Prof. King am Institut für Geographie der Universität Gießen begann in den 1980er Jahren mit den systematischen wissenschaftlichen Untersuchungen (Herz 2006). King (1990; 1996) entwickelte ein Permafrostverbreitungsmodell für das Gebiet Gornergrat-Stockhorn. Im Rahmen des EU Projekts PACE (Permafrost and Climate in Europe) wurden auf dem Stockhornplateau innerhalb des Permafrosts zwei Bohrungen durchgeführt (Gruber et al. 2004). Gruber & Hoelzle (2001) modellierten die Permafrostverteilung des Tals statistisch anhand von Höhen- und Einstrahlungswerten der Sonne und kalibrierten es mithilfe der Bodentemperatur unter Schnee. Als Nachfolgeprojekt von PACE wurde das durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanzierte Projekt „Periglazial Mattertal“ von 2001 bis 2005 durchgeführt. Herz (2006) untersuchte das Mikroklima grobblockiger Schutthalden im Mattertal.

Durch die starke touristische Nutzung und die dauerhafte Besiedlung sind Naturge-

## 4 Untersuchungsgebiete

fahren neben dem Permafrost ein wichtiges Thema, mit denen sich einige Untersuchungen im Mattertal beschäftigt haben. Es existieren Forschungen zu murganggefährdeter Seitenbäche, wie z.B. des Ritigrabens (Dikau, et al. 1996; Rebetez 1997). Neben Murgängen stellen Bergstürze ein Gefahrenrisiko dar. Der Bergsturz von Randa, der sich 1991 ereignete, hat ebenfalls wissenschaftliches Interesse geweckt (vgl. Ebhardt et al. 2004; Sartori et al. 2003).

### 4.1.4 Klima

#### Turtmanntal

Aufgrund der inneralpinen Lage ist das Turtmanntal durch ein kontinentales Klima gekennzeichnet. Die vorhandene Topographie isoliert das Tal und schirmt es vor Niederschlägen, die hauptsächlich aus dem Westen und Südwesten kommen, ab, weswegen es in den trockensten Regionen der Alpen liegt. Da im Turtmanntal bisher keine eigene Klimastation vorhanden war, sind keine langjährigen Klimadaten vorhanden. Aus diesem Grund müssen umliegende Stationen in Betracht gezogen werden. Tabelle 4-1 zeigt mittlere Niederschläge und Jahrestemperaturen für fünf Klimastationen in der Nähe des Tals. Van Tatenhoven und Dikau (1990) schätzen die jährliche Niederschlagssumme im Turtmanntal auf 2000m ü. NN auf 600 bis 900mm.

Klimastation	Höhe [m ü. NN]	Niederschlag [mm]	Jahresmitteltemperatur [°C]
Visp	640	710	8,2
Grächen	1617	611	4,6
Zermatt	1638	694	3,5
Sion	482	575	8,5
Evoléne	1825	k.A.	3,6

Tabelle 4-1: Klimadaten ausgewählter Stationen im Wallis (30-jähriges Mittel von 1901-1960 außer bei der Station in Evoléne, die erst 1987 errichtet wurde) (aus Nyenhuis 2005).

Seit dem Jahr 2002 befindet sich im Hungerlitalli eine Klimastation. Die vorhandenen Werte von 2002 bis 2005 werden mit der Abbildung 4-3 illustriert, die Messwerte für das Jahr 2006 lagen bei der Erstellung dieser Arbeit noch nicht in verwertbarer Form vor.

#### 4 Untersuchungsgebiete

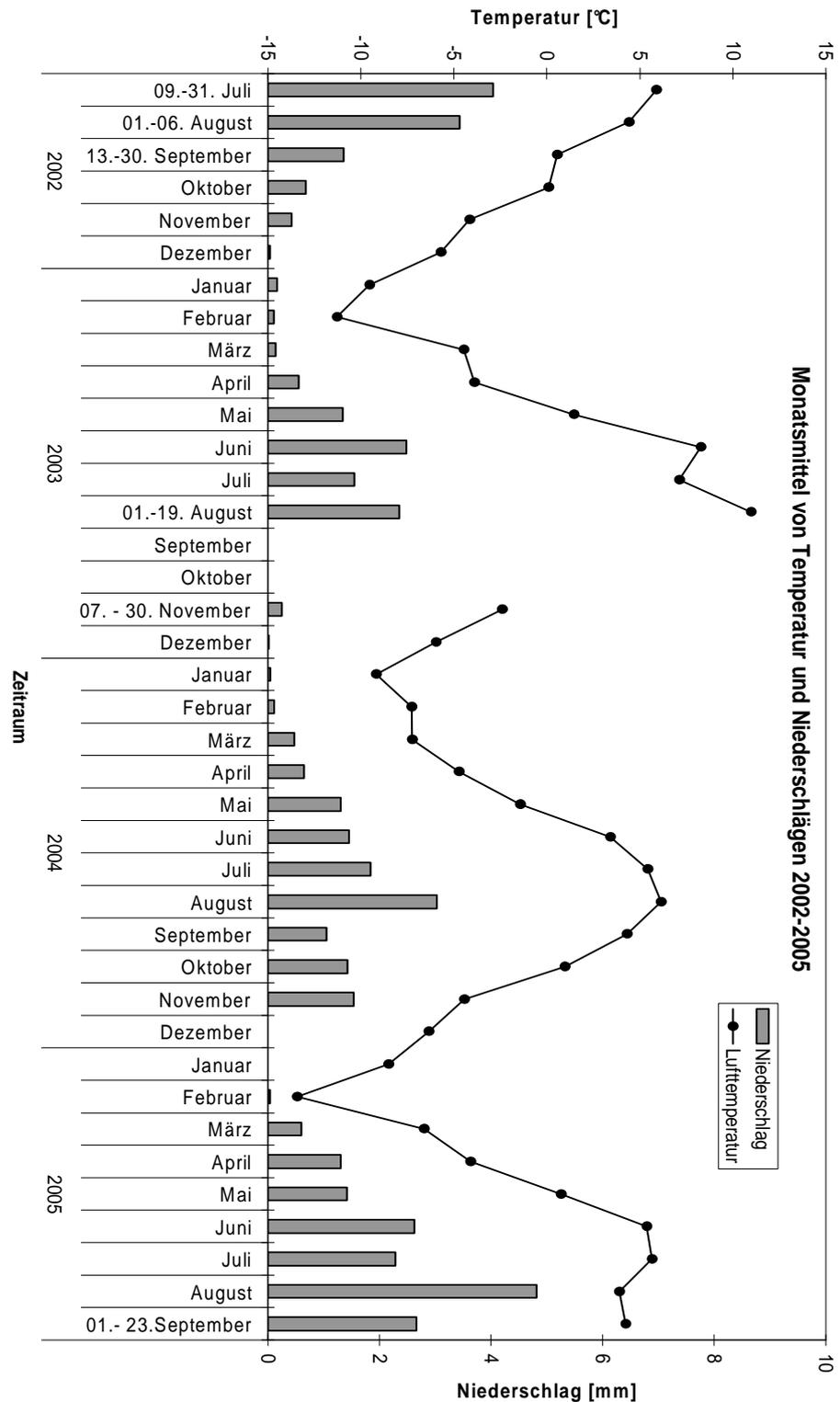


Abbildung 4-3: Monatsmittel der Temperaturen (gemessen 2m über dem Untergrund) und den Niederschlägen (ohne Schnee) von Juli 2002 bis September 2005, aufgezeichnet im Hungerlitälli, Turtmanntal (2770m) (verändert nach Otto 2006).

#### 4 Untersuchungsgebiete

Die durchschnittliche gemessene Jahrestemperatur beträgt auf Höhe der Klimastation (2770m ü. NN)  $-1,2^{\circ}\text{C}$ , die niedrigsten Temperaturen werden im Februar, die höchsten im August erreicht. Besonders der südliche Teil des Turtmantals wird im Sommer durch Gewitter beeinflusst, die eine signifikante Menge an Niederschlag bringen. Schnee wird bei den Niederschlagsmessungen nicht berücksichtigt. Insgesamt decken die Klimadaten der neuen Station erst einen zu geringen Zeitraum ab, um verlässliche Aussagen zu treffen. Die Daten können jedoch als erste Richtwerte betrachtet werden.

##### Mattertal

Das Mattertal besitzt mit Grächen und Zermatt zwei Orte, in denen Wetterstationen vorhanden sind (vgl. Tabelle 4-1). Es gehört ebenfalls zu den trockensten Gebieten im gesamten Alpenraum mit einem durchschnittlichen, jährlichen Niederschlag zwischen 611mm in Grächen und 694mm in Zermatt. Der südliche Bereich des Mattertals profitiert von den nach Norden vordringenden Niederschlägen des Südalpenkammes, was sich auch in der größeren Ausdehnung der Gletscher widerspiegelt (Denzler & Maisch 1995).

### 4.2 Turtmanngletschervorfeld und Rinderalpji

#### 4.2.1 Turtmanngletschervorfeld



Abbildung 4-4: Blick auf den Turtmanngletscher (2006).

Wie bereits erwähnt befindet sich der Turtmanngletscher (Abbildung 4-4) am südlichen Ende des Turtmannnals und besitzt Exposition nach Norden. Das Untersuchungsgebiet wird in dieser Arbeit durch die um 1850 entstandenen Moränen des Gletschers eingegrenzt, die darüber liegenden Hänge wurden nur grob kartiert. Die Endmoräne zu dieser Zeit befindet sich circa auf einer Höhe von 2000m, die Seitenmoränen reichen bis auf 2520m. Sie sind auf der östlichen Seite besser erhalten, als auf der westlichen. Einen Überblick über das Untersuchungsgebiet soll das Hills-hade (Abbildung 4-5) geben, das mithilfe des 1m HRSC-A Höhenmodells des Turtmannnals erstellt wurde.

Das Vorfeld wird nicht nur durch Schmelzwässer des Turtmanngletschers geprägt, sondern auch durch die des Brunneggletschers, der erst 1934 im Gletschermessnetz der Schweiz getrennt vom Turtmanngletscher aufgeführt wurde. Zusätzlich gelangen Abflüsse des Diablons Gletschers in das Gebiet. Von 1850 bis 2005 hat der Turtmanngletscher 1284m an Länge verloren (VAW 1881-2005) und somit Fläche für paraglaziale Prozesse freigelegt. Der Brunneggletscher schmolz seit 1934 1129m zu-

#### 4 Untersuchungsgebiete

rück (VAW 1881-2005), der Diablons Gletscher ist nicht im Gletschermessnetz aufgeführt.

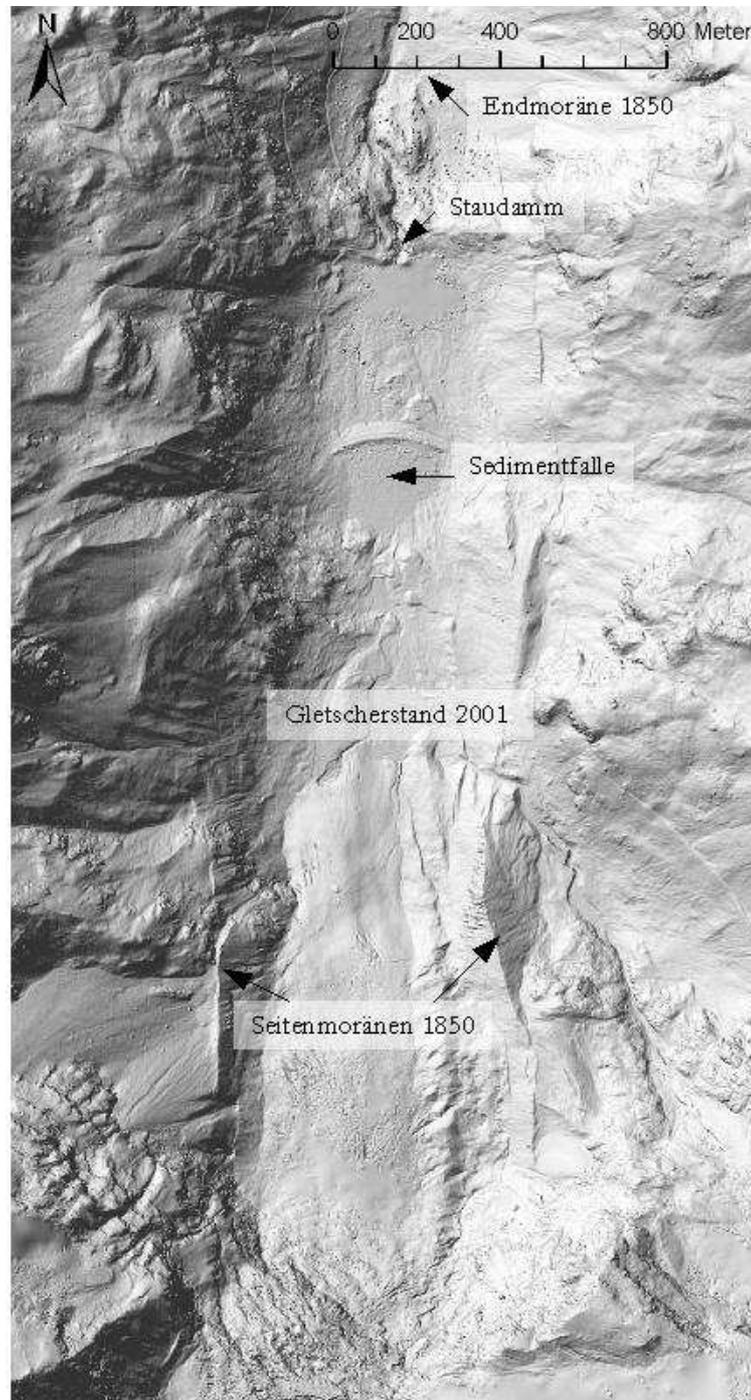


Abbildung 4-5: Hillshade des Turtmanngletschervorfeldes, berechnet aus dem HRSC-A-Höhenmodell des Turtmanns. Die Daten stammen aus dem Jahre 2001, der Gletscher hat sich seitdem weiter zurückgezogen.

#### 4 Untersuchungsgebiete

Durch einen Staudamm, der circa 400m südlich der Endmoräne von 1850 errichtet wurde und einer dem Damm vorgelagerten Sedimentfalle, gelangen nur wenige glaziofluviale Sedimente in den Vorfluter Turtmäna. Ein Teil des Schmelzwasser des Gletschers wird in das Nachbartal Val d'Anniviers umgeleitet. Die Sedimentfalle muss in regelmäßigen Abständen, so auch im Jahre 2006, ausgebagert werden. Das Sediment wird im Bereich des Gletschervorfelds abgelagert (Abbildung 4-6). Dabei soll laut der Aussage des zuständigen Ingenieurbüros darauf geachtet werden, dass sich die Aufschüttungen in das Landschaftsbild einfügen und so der vorhandene Tourismus nicht gefährdet wird. Insgesamt ist das Gletschervorfeld deutlich anthropogen beeinflusst. Neben dem Staudamm sind verschiedene Wanderwege vorhanden, die unter anderem zur dem Schweizer Alpen-Club gehörenden Turtmannhütte führen.

Geologisch herrschen im Turtmanngletschervorfeld Paragneise, Amphibolite und Albit-Schiefer vor. Die klimatischen Gegebenheiten wurden bereits im vorhergehenden Kapitel erläutert. Die nächstgelegene Klimastation befindet sich im Hungerlitali.

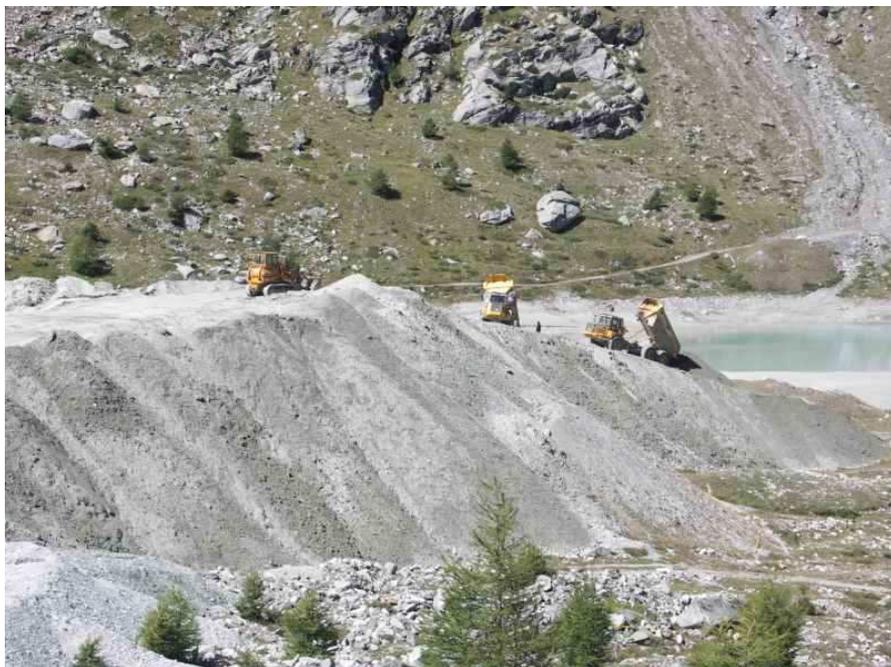


Abbildung 4-6: Anthropogene Aufschüttung von glaziofluvialen Sedimenten aus der Sedimentfalle im Vorfeld des Turtmanngletschers (2006).

## 4 Untersuchungsgebiete

### 4.2.2 Rinderalpji

Das zweite Untersuchungsgebiet, welches in der topographischen Karte als Rinderalpji bezeichnet wird, liegt im Nordwesten des Ortes St. Niklaus im Mattertal. Es befindet sich am westlichen Ende des Jungtals, einem Seitental des Mattertals. Die Rinderalpji ist über den Jungpass mit dem Turtmantal verbunden und von dort aus in kürzerer Zeit zu erreichen als vom Mattertal.

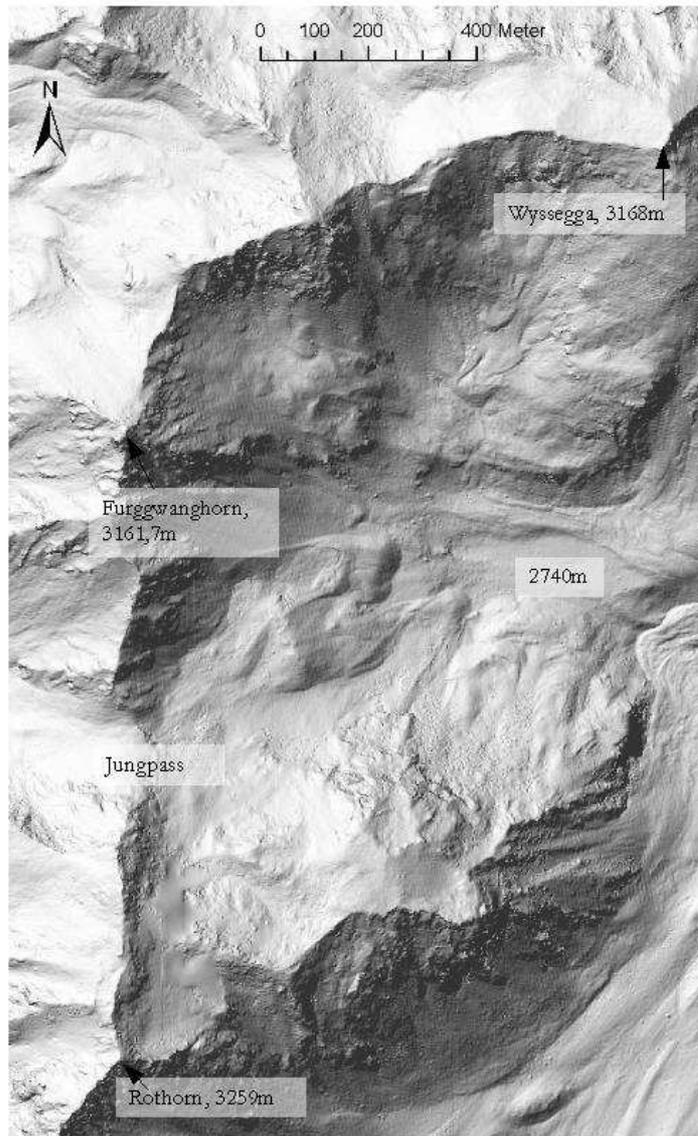


Abbildung 4-7: Hillshade des Rinderalpji-Gebiets im Mattertal, berechnet aus dem HRSC-A Höhenmodell.

Außer den Arbeiten von Krautblatter (z.B. Krautblatter & Hauck submitted), der die Veränderungen der Permafrostverteilung in Felswänden im Rahmen seiner Disserta-

#### 4 Untersuchungsgebiete

tion untersucht, sind keine weiteren Forschungsarbeiten aus dem Gebiet bekannt, was nicht zuletzt an der aufwendigen Erreichbarkeit liegt.

Das Untersuchungsgebiet ist nach Osten exponiert und wird von den Gipfeln des Rothorns im Süden, dem Furggwanghorn im Westen und der Wysegga im Norden eingegrenzt. Dabei ist das Rothorn mit 3259m der höchste Punkt, der niedrigste liegt bei circa 2720m. Als östliche Grenze wurde der Beginn des Einflussbereichs des Junggletschers gewählt. Mit dem Hillshade in Abbildung 4-7 sollen die vorgestellten Gegebenheiten verdeutlicht werden. Die Abbildung 4-8 und die Abbildung 4-9 zeigen das Gebiet aus östlicher und südlicher Richtung.

Im südlichen Teil der Rinderalpji sind Reste des als Rothorn-Nordost bezeichneten Gletschers vorhanden. Laut Gruber und Hoelzle (2001) ist die Existenz von Permafrost in diesem Gebiet wahrscheinlich bis möglich.

Geologisch herrschen Paragneisen vor. Die nächsten Klimastationen mit langjährigen Messungen befinden sich in den Orten Zermatt und Grächen, die neue Station im Hungerlitälli/Turtmantal liegt zwar in kürzerer Entfernung, liefert jedoch noch keine statistisch sicheren Daten.

#### 4 Untersuchungsgebiete



Abbildung 4-8: Blick von unten auf die Rinderalpji aus östlicher Richtung (2006).

Abbildung 4-9: Blick auf die Rinderalpji von oben aus südlicher Richtung. Der untere See besitzt eine Länge von ca. 60m (2006).

## **5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie**

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden insgesamt vier geomorphologische Karten entwickelt. Jedes der beiden Untersuchungsgebiete wurde sowohl mit der Legende der GMK Hochgebirge als auch mit der Legende der GMK 25 kartographisch dargestellt. Je nach Legende mussten Signaturen verändert oder ergänzt werden.

Die geomorphologische Kartierung soll in dieser Arbeit nicht nur zum Vergleich und Testen der Kartierlegenden dienen, sondern auch als Grundlage für die geomorphologische Untersuchung des Turtmangletschervorfelds und der Rinderalpji. Die Eignung der Kartierlegenden für großmaßstäbige geomorphologische Kartierungen im Hochgebirge wird in Kapitel 0 diskutiert. In diesem Kapitel werden die Karten (siehe Anhang) beschrieben, erläutert und Stellung zur Entwicklung der Gebiete genommen. Dabei wird zunächst das Gletschervorfeld des Turtmangletschers behandelt, bevor das Gebiet Rinderalpji näher betrachtet wird. Geomorphologische Probleme, die nicht die Kartierlegenden betreffen, werden in diesem Kapitel direkt erörtert, da meiner Meinung nach die Diskussion in einem eigenen Kapitel nicht sinnvoll wäre.

### **5.1 Gletschervorfeld Turtmangletscher**

Die geomorphologischen Karten des Turtmangletschervorfelds wurden im Maßstab 1:10.000 erstellt. Um die Entwicklung des Gletschers und damit auch seines Vorfelds zu verdeutlichen, wurden neben der rein geomorphologischen Darstellung zusätzlich 12 Gletscherstände seit dem Stand von 1850 eingezeichnet. Diese Gletscherstände stammen von 1950 bis 1964 aus der Karte des Oberförsters von Oberems, von 1993 aus einem Luftbild, von 1995 aus der Vektorkarte, von 2001 aus dem HRSC-A Luftbild und der aktuelle Gletscherstand 2006 aus der eigenen Kartierung. Der Übersichtlichkeit wegen wurden nicht alle Gletscherstände zwischen 1850 und 1964 ausgewählt, sondern nur die im zehnjährigen Abstand. Ausnahmen davon bilden das Jahr 1885, das das nicht eingezeichnete Jahr 1890 ersetzt und das Jahr 1964, welches noch als letztes kartiertes Jahr aus der Karte des Oberförsters übernommen wurde. In den folgenden Abschnitten wird die Geomorphologie des Untersuchungsgebiets den Informationsschichten der GMK 25 folgend vorgestellt. Der geomorphologische Inhalt der GMK Hochgebirge ist mit dem der GMK Hochgebirge identisch und wird aus diesem Grunde nicht in einem eigenen Kapitel GMK Hochgebirge vorge-

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

stellt. Die Unterschiede und Gemeinsamkeiten in der kartographischen Darstellung werden jedoch im zweiten Unterkapitel vorgestellt.

### 5.1.1 GMK 25

Die mit dem Kartiersystem GMK 25 erstellte geomorphologische Karte des Turtmanngletschervorfelds kann gemäß der Kartierlegende in acht verschiedene Informationsschichten aufgeteilt werden.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die Schichten der GMK 25 nicht vollständig mit den erstellten Layern in dem GIS, also in der digitalen Karte, übereinstimmen. In einem GIS muss zwischen Punkt-, Linien- und Flächensignaturen unterschieden werden, die Informationsschichten der GMK 25 weisen jedoch gemischte Signarentypen auf.

Zur Präsentation der Ergebnisse ist es meiner Meinung nach trotzdem sinnvoll, nach dem GMK 25 Prinzip vorzugehen. Die Informationsschicht „Wölbungen“ enthält keine Daten und wird aus diesem Grunde nicht vorgestellt, Prozesse werden im Abschnitt der Prozess- und Strukturbereiche mitbehandelt.

#### 5.1.1.1 Situation und Topographie

Die Grundlage der GMK 25 Kartierung bildet die Landeskarte der Schweiz, die die generelle Situation wiedergibt und der Orientierung dient. Näheres zur Einordnung des Untersuchungsgebietes, zur Geologie und zum Klima wurde bereits in Kapitel 4 präsentiert und soll daher an dieser Stelle nicht erneut dargestellt werden.

#### 5.1.1.2 Hangneigung

Die Hangneigung wird durch graue Schraffuren mit der Klasseneinteilung für Hochgebirge aus der GMK ausgewiesen.

Im Kartiergebiet befinden sich steilere Bereiche ( $45\text{-}60^\circ$ ) hauptsächlich an Felskanten, die Hänge weisen Neigungen von  $15\text{-}45^\circ$  auf, während den Talboden das Gletschervorfelds bis zum Staudamm geringere Neigung von  $2\text{-}15^\circ$  auszeichnen.

Abbildung 5-1 illustriert den Anteil der Fläche des Untersuchungsgebietes an den jeweiligen Hangneigungsklassen. Dabei wird deutlich, dass sich der größte Teil des Gebietes in den mittleren Klassen befindet. Mit  $31,2\%$  der Fläche sind Neigungen zwischen  $25$  und  $35^\circ$  am deutlichsten vertreten. Flachere Bereiche ( $0\text{-}2^\circ$ ) sind mit  $1,2\%$  ebenso wie sehr steile ( $>60\%$ ) mit  $0,8\%$  kaum vorhanden.

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

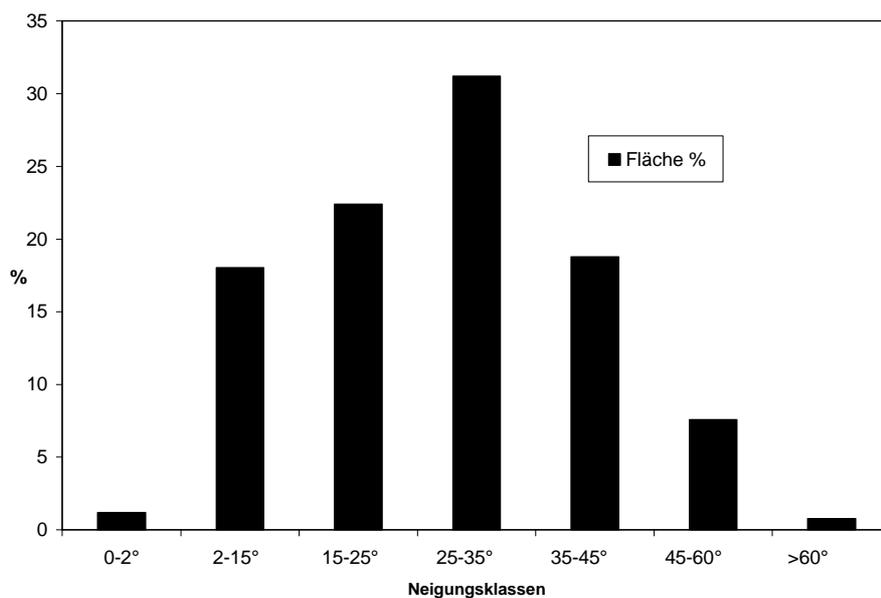


Abbildung 5-1: Gebietsfläche in % pro Hangneigungsklasse im Kartiergebiet Turtmanngletscher..

### 5.1.1.3 Stufen, Kleinformen, Täler und Rauheit

Die Informationsschicht „Stufen, Kleinformen, Täler und Rauheit“ enthält eine Vielzahl unterschiedlicher Signaturen. Dazu gehören verschiedene Stufensignaturen, die in dieser Kartierung oftmals Felsstufen kennzeichnen. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit erfolgte die Einteilung der Stufen in den gleichen Abständen wie auf der Karte, die mit der GMK Hochgebirge dargestellt wurde (0-2m, 2-10m, 10-20m & >20m). Weitere Stufen sind zur Kennzeichnung des Damms, der anthropogenen Aufschüttungsbereiche und der Erosionskanten in den Murgangbereichen verwendet worden. Die Moränen werden in dieser Karte mit der Signatur „Wall“ wiedergegeben, was meines Erachtens die Form hier am besten repräsentiert. Ebenfalls mit der Wallsignatur werden die Levées der Murgänge gekennzeichnet.

Kerbförmige Tiefenlinien wurden mit der entsprechenden Signatur dargestellt, bei der, um die Übersichtlichkeit zu verbessern, die Tiefenlinien nur mit der v-Signatur ohne die Zwischenstriche ausgewiesen wurden.

Schuttkegel werden genauso in diese Informationsschicht aufgenommen, wie der durch Abschmelzen von Toteis entstandene Kessel an der südöstlichen Seitenmorä-

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

ne. In einigen Bereichen konnten die Schuttkegel aufgrund ihrer Größe nicht durch die entsprechende Signatur gekennzeichnet werden. Sie wurden stattdessen durch einfache Liniensignaturen kartiert.

### 5.1.1.4 Substrat- und Oberflächengestein

Für die Kennzeichnung des Festgesteins wurde die Signatur „Metamorphit“ ausgewählt. Aus Zeitgründen erfolgte nur eine grobe, visuelle Aufnahme des Substrats ohne weitere Bohrungen und Aufschlüsse. Der glazial geprägte Bereich bis zur 1850er Endmoräne wurde durch den genetischen Substrattyp „Geschiebe/Moräne“ ausgewiesen. Das unmittelbare Gletschervorfeld und der Bereich des Bruneggbaches weisen glaziofluviale Sedimente auf. Geröll und kantige Blöcke kennzeichnen die umliegenden Hänge, die auch zu weiten Teilen durch Vegetation gefestigt sind.

Die GMK 25 Legende sieht eine genaue Abgrenzung der verschiedenen Substratargrenzen durch eine gestrichelte Linie vor, aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde jedoch auf diese verzichtet. Zusätzlich sind die Symbole auch ohne scharfe Grenzen zu unterscheiden.

### 5.1.1.5 Hydrographie

Als Grundlage für die Darstellung der Hydrographie diente der Vector25 Datensatz aus dem sowohl Bäche als auch die Seen entnommen werden konnten.

Die Bäche der Vector25 Karte wurden 1998 aufgenommen. Ihre Lage wurde im Gelände kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert. An einigen Stellen nahe dem Gletscher mussten die Bäche verlängert werden, da sie durch das Abschmelzen des Turtmanngletschers weiter in das Gletschervorfeld hinunter reichten. Zusätzlich wurden einige Bäche als periodisch fließend eingestuft.

Die Lage der Gletscherstirn und die der Rinnen in ihrem direkten Vorfeld wurden im Gelände kartiert. In Kapitel 5.1.1.6 wird noch weiter auf den fluvialen Prozessbereich im Gletschervorfeld eingegangen, während in Kapitel 5.1.3 die Entwicklung des Turtmanngletschers vorgestellt wird. Die Höhenlinien auf dem Gletscher wurden aus der digitalen Landeskarte der Schweiz entsprechend dem heutigen Stand zugeschnitten. Die Mächtigkeit des Turtmanngletschers hat zwar abgenommen und die Höhenlinien stimmen wahrscheinlich nicht mehr vollständig mit der heutigen Situation überein, jedoch wäre auch eine alternative Berechnung aus dem HRSC-A Höhenmodell nicht mehr aktuell.

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

Die Form der beiden anthropogen angelegten Seen stammt ebenfalls aus dem Vector25 Datensatz (Stand 1992). Obwohl der Wasserstand 2006 dem von 1992 nicht genau entsprach wurde dieser übernommen. Meiner Meinung nach ist dies legitim, da sich der Wasserstand und die Form leicht durch die vorhandenen anthropogenen Einflüsse verändern lassen und die eingesetzte Seesignatur der maximal möglichen Ausdehnung entspricht.

### 5.1.1.6 Prozess- und Strukturbereiche

Auf den Prozess- und Strukturbereichen liegt der Fokus der geomorphologischen Kartierung, dem nicht zuletzt durch die flächenhafte farbige Kennzeichnung in der Karte Rechnung getragen wird. Folgende Prozessbereiche sind in der Karte vorhanden und werden in den anschließenden Abschnitten näher beleuchtet: glazial, fluvioglazial, periglazial, gravitativ, denudativ und anthropogen.

Als glaziale Prozessbereiche (violett) habe ich die Gebiete eingezeichnet, die 1850 von Gletschern bedeckt waren. Zusätzlich sollte aber beachtet werden, dass das gesamte Tal im Pleistozän glazial überprägt war und deshalb die Polygenetik vorhandener Formen beachtet werden muss.

Die glaziale Prägung des Turtmanngletschervorfelds ist deutlich zu erkennen. Wie in Kapitel 2.2.2.1 dargestellt, ist das glaziale System durch die Erosion, Akkumulation und den Transport von Material durch Eis gekennzeichnet. Als Akkumulationsformen sind Moränen im gesamten Kartiergebiet, besonders aber an der Ostseite, vorhanden. Die mit der Signatur Wall dargestellten Moränen zeigen verschiedene ehemalige Gletscherstände an. Im Südwesten des Turtmanngletschers sind Moränen des Les Diablons-Gletschers eingezeichnet, die aus dem HRSC-A Höhenmodell aufgenommen wurden, im Osten ist zusätzlich eine Moräne des Bruneggletschers zu erkennen.

Nördlich des Staudamms und an den seitlichen Hängen des Turtmanngletschervorfeldes sind Felsen mit Gletscherschliff als erodierte Formen ausgeprägt. Die Signatur für Gletscherschliff ist in der dritten Legendenfassung der GMK 25 (Leser & Stäblein 1980) nicht vorhanden, wird aber z.B. von Fischer (1984) im Blatt Königsee verwendet und daraus für die Kartierung in dieser Arbeit übernommen.

Durch das Abschmelzen des Turtmanngletschers, das in Abschnitt 5.1.3 erläutert wird, werden weitere Felsriegel und Flächen freigelegt, die ebenfalls glaziale Erosionsspuren aufweisen.

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

Besonders an der Ostseite, teilweise auch im Westen, ist in den Moränen südlich des Bruneggbaches Toteis vorhanden und an der Oberfläche zu erkennen. Ohne schützenden Schutt werden die Eisreste abschmelzen und die Oberflächenformen dadurch verändern.

Der fluvioglaziale Prozessbereich kennzeichnet die proglaziale Zone des Gebietes. Der vom Gletscher abgelagerte Schutt wird durch das Schmelzwasser des Turtmanngletschers, aber auch durch die Zuflüsse aus dem Brunegggletscher transportiert. Von der orographisch linken Seite beeinflussen ebenfalls Bäche das Gebiet. Dabei werden die südlichsten durch den Les Diablons Gletscher gespeist. Feineres Material wird vermutlich auch äolisch weiter transportiert. Die Erosionsleistung der Bäche ist, wie für Gletscherbäche üblich, abhängig von der Ablation und damit von der Tageszeit.

Durch das kontinuierliche Abschmelzen des Turtmanngletschers wird zunehmend Fläche für fluviale Prozesse freigelegt. Wie sich das direkte Vorfeld des Gletschers seit 1999 verändert hat, wird in Kapitel 5.1.4 vorgestellt.

Der Bereich um die Gletscherstirn wird bzw. wurde sowohl durch glaziale als auch durch fluviale Prozesse geprägt. Um die Polygenese der Formen in diesem Prozessbereich zu verdeutlichen wurde die gemischte Flächenkennzeichnung aus der Farbe für glazial (violett) und von fluvial (grün) gewählt. Meines Erachtens ist diese Farbwahl begründeter als das in der GMK 25 Legende vorgeschlagene dunkelgrün, welches eher für große Sanderflächen verwendet wird.

Formen, die in der Karte dem periglazialen (kryogenen) Prozessbereich (rosa) zugeordnet wurden finden sich vor allem an den orographisch rechten Seitenmoränen des Turtmanngletschers. Dabei handelt es sich um Solifluktionsloben (Abbildung 5-2), aber auch um flächige Solifluktion. An der Moräne nahe der Sedimentfalle sind einige gebundene, also bewachsene, Solifluktionsloben zu finden. Da die Moränen auf denen die Solifluktion stattfindet genetisch zum glazialen Prozessbereich gehören, sind die entsprechenden Flächen durch den gemischten Prozessbereich glazial/kryogen ausgewiesen. An der westlichen Talseite konnte ebenfalls Solifluktion festgestellt werden, da sie dort aber nicht dominiert wurde auf eine Kennzeichnung durch den kryogenen Prozessbereich verzichtet.

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

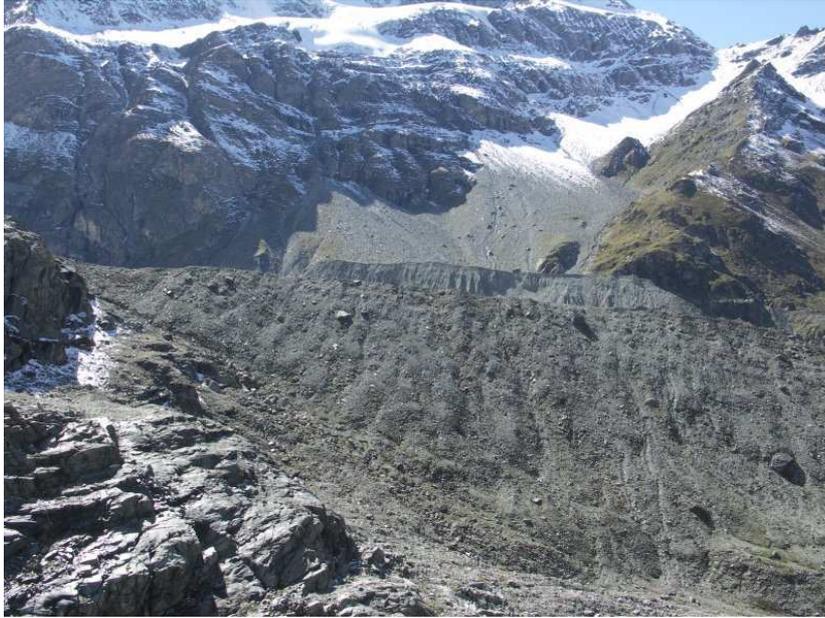


Abbildung 5-2: Blick auf Solifluktuionsloben auf der östlichen Seite der orographisch rechten Seitenmoräne. Im Hintergrund ist die orographisch linke Seitenmoräne mit deutlicher linearer Erosion zu erkennen.

Gravitative Prozesse wie Steinschlag liefern Material in das Gletschersystem, das, wenn es auf den Gletscher fällt, von diesem weiter transportiert wird, am Hang zwischengespeichert wird oder in das fluviale System gelangt. Vier Muren, die im Grenzbereich zwischen gravitativen und fluvialen Prozessen liegen, sind auf der westlichen Seite des Gletschers aufgetreten und haben dort deutliche Spuren in Form von Le-vées hinterlassen. Meiner Ansicht nach folgten sie bereits vorhandenen fluvialen Gerinnebetten, da zum Kartierungszeitpunkt Wasser durch die Murgangrinne abfloss, oder dienen nun als Abflussrinne. Als weiterer gravitativer Prozess ist die Rutschung an der westlichen Seitenmoräne nahe dem Turtmangletscher zu sehen.

Die oberen Hangbereichen des Gebietes, die durch Festgestein geprägt sind und während der Kartierung nicht begangen wurden, wurden ebenfalls dem gravitativen, oft in Kombination mit dem denudativen, Prozessbereich zugeordnet, da ich davon ausgehe, dass dieser im Festgesteinsbereich überwiegt. Neben diesen Prozessen spielen auch Lawinen im Gletschervorfeld, so wie im gesamten Turtmantal, eine wichtige Rolle.

Große Bereiche des Hangs des Gletschervorfelds wurden als denudativer Prozessbereich (ocker) kartiert. In der deutschen Terminologie wird die Denudation häufig als

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

flächenhafter Abtrag der linearen Erosion gegenübergestellt (vgl. Ahnert 1996). Im Gegensatz dazu kann unter Denudation „die Gesamtwirkung der Abtragung an Hängen, unabhängig von der Art des geomorphologischen Prozesses, der dies bewirkt“ verstanden werden (Leser 2001, S. 136). Die zweite Definition ist umfassender als die erste und meiner Meinung nach die Form von Denudation, die in der GMK 25 Kartierlegende vorgesehen ist. Wenn die Denudation nur als flächenhafte Abtragung angesehen würde, müsste es noch einen weiteren Prozessbereich mit linearer Erosion geben. Dies ist jedoch nicht der Fall.

Neben den als denudativ ausgewiesenen Hängen, ist besonders an den beiden gletschernahen mächtigen Seitenmoränen lineare Erosion (Abbildung 5-2) vorhanden. Zusätzlich sind an der Seitenmoräne östlich des Stausees und an weiteren Stellen der Hänge des Gletschervorfelds Erosionsspuren zu erkennen. Gemäß der angenommenen Definition von Denudation wird dieser lineare Abtrag auch dem denudativen Prozessbereich zugewiesen. An den Moränen liegt der gemischte Prozessbereich glazial/denudativ vor.

Wie bereits in der Beschreibung des Untersuchungsgebiets dargestellt, ist das Gebiet stark anthropogen beeinflusst. Auffällig sind der Stausee und die Sedimentfalle, die entsprechende Infrastruktur zur Instandhaltung und die anthropogenen Aufschüttungen, die in dem grau gekennzeichneten anthropogenen Prozessbereich durch Stufensignaturen ausgewiesen wurden. Zusätzlich wurde die Turtmannhütte zu dem anthropogenen Prozessbereich zugerechnet. Die Wanderwege dagegen erhielten aus Maßstabsgründen keine graue Umrandung.

### 5.1.2 Vergleich GMK 25 und GMK Hochgebirge

Werden die GMK Hochgebirge-Karte und die GMK 25-Karte des Turtmann-gletschervorfelds verglichen, so fallen deutliche Unterschiede, jedoch auch Gemeinsamkeiten auf, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

Gemäß der Kartierlegende der GMK Hochgebirge wurden keine Farben sondern nur schwarz bzw. verschiedene Grautöne für die Darstellung der geomorphologischen Gegebenheiten verwendet.

Das Lockersubstrat wurde nur an wenigen Stellen, also nicht flächenhaft, gekennzeichnet. Dies ist beispielsweise an der nördlichen Stirn des Turtmann-gletschers der Fall, was vor allem aus ästhetischen Gründen geschehen ist. Da zur Aufnahmezeit

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

der topographischen Unterlage der Turtmangletscher eine weitere Ausdehnung nach Norden hatte, wurden dort keine Punkte für Geröll, wie in den restlichen Teilen der Karte, eingezeichnet. Ohne die Signatur für Steine (Korngröße 63-630mm) würde der Untergrund nur weiß sein und somit zu sehr hervorstechen. Das Festgestein ist vollständig abgebildet und mit einem einheitlichen Grauton gekennzeichnet. Die Hangneigung wird in der GMK Hochgebirge nicht als eine eigene Informationsschicht ausgewiesen, sondern soll aus der topographischen Grundlage abgelesen bzw. abgeschätzt werden.

In der GMK Hochgebirge besteht eine eigene Signatur für Toteis, die dieses an den Moränen des Turtmangletschers kennzeichnet. Wölbungslinien wurden auch hier nicht verwendet.

Die ablaufenden Prozesse und die Hydrographie zeigen nur Unterschiede in den Signaturen zur GMK 25 Karte, der Inhalt ist identisch. So wird beispielsweise in der GMK Hochgebirge die lineare Erosion mit einem einfachen Pfeil dargestellt, während die GMK 25 Legende einen Pfeil vorschreibt, der sowohl an der Spitze als auch in der Mitte eine Pfeilspitze besitzt. Der Gletscher und die Seen besitzen ebenfalls eine andere Kennzeichnung, die in der GMK 25 durch Blautöne, in der GMK Hochgebirge durch verschiedene Musterungen beschrieben werden.

Die Informationsschicht Stufen, Täler, Kleinformen und Rauheit ist ebenfalls in der GMK Hochgebirge Karte vorhanden. Einige Unterschiede gegenüber der GMK 25 können auch hier festgestellt werden. Gemäß der Legende wurde auf Stufensignaturen an Stufen, die durch Festgestein hervorgerufen werden, verzichtet. Rundhöcker, die am Staudamm und südlich der Sedimentfalle vorhanden sind, wurden durch ein eigenes Symbol gekennzeichnet, während sie in der anderen Karte nur als Festgestein mit Gletscherschliff ausgewiesen wurden. Zusätzlich besitzen auch die Schuttkegel ein anderes Symbol. Wichtig ist zu erwähnen, dass das Kartiersystem GMK Hochgebirge eigene Signaturen für Moränen besitzt, während diese in der GMK 25 entweder durch Wölbungs- oder Stufensignaturen repräsentiert werden.

Gemeinsamkeiten der beiden Kartierlegenden existieren hinsichtlich der Kartengrundlage, die ebenfalls die vergrößerte Landeskarte der Schweiz ist.

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

### 5.1.3 Entwicklung des Turtmanngletschers

Die eingezeichneten Gletscherstände auf den geomorphologischen Karten implizieren zunächst, dass der Turtmanngletscher seit 1850 kontinuierlich zurück geschmolzen ist. Bis Anfang der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts kann dieser generelle Trend bestätigt werden. In den Zeiträumen zwischen 1918 und 1924 und von Anfang der 1970er bis zu Beginn des neuen Jahrtausends gab es eine Phase in der der Gletscher insgesamt wieder vorgestoßen ist (vgl. Abbildung 5-3). Die kartierten Moränenstände bestätigen dieses Bild. Zwischen dem Stand von 1920 und 1930 sind auf der geomorphologischen Karte zwei Moränenwälle eingezeichnet, ebenso existieren deutliche Moränen um die Stände von 1964 und 1993 auf der Karte (vgl. Abbildung 5-4), deren Bildung Eybergen (1986) näher untersucht hat.

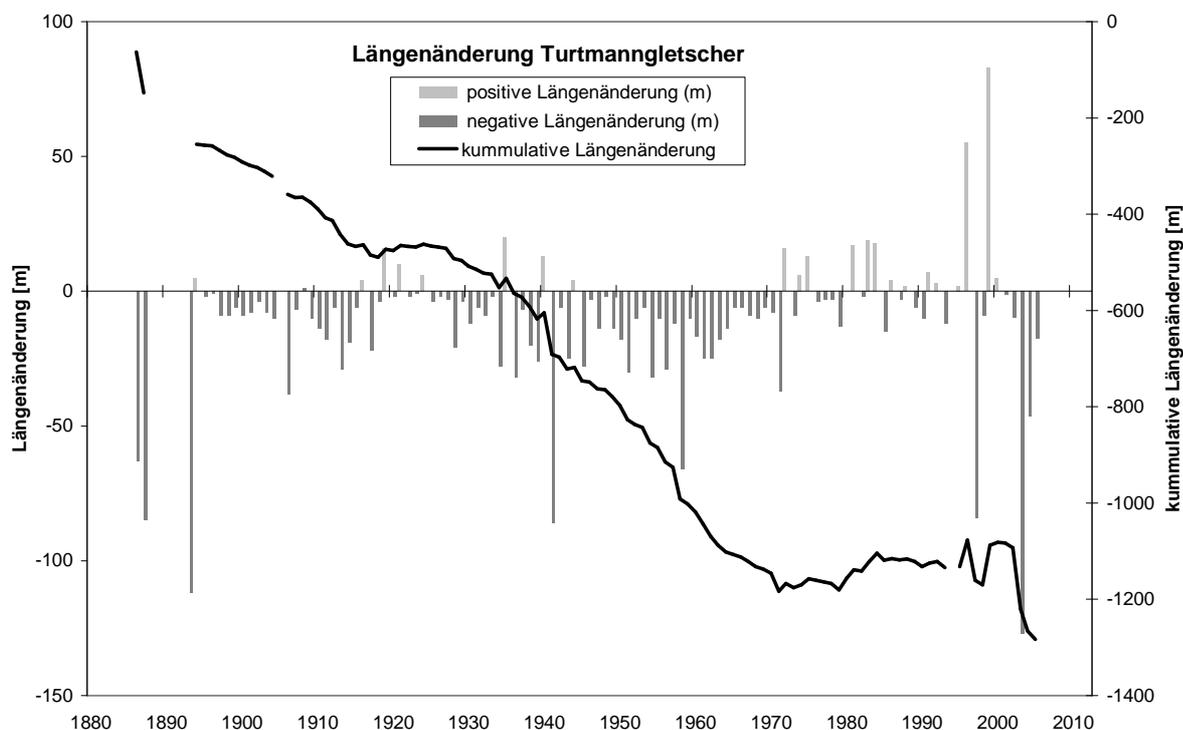


Abbildung 5-3: Längenänderung des Turtmanngletschers von 1885 bis 2005 (aus VAW 1881-2005).

Der extremste Vorstoß ist laut Gletscherinventar 1998 mit 83m. Diesen Wert zweifelt Otto (2001) an und geht davon aus, dass ein Schneefleck an der Gletscherstirn als Ende aufgenommen wurde. Der extremste negative Wert seit den Aufzeichnungen wurde 2003 mit einer Längenabnahme von 126,9m gemessen. Der Sommer 2003 war in der Schweiz circa 3°C wärmer als die Durchschnittstemperaturen von 1961-1990

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

(Schär et al. 2004), was dieses Abschmelzereignis begründen und ermöglichen kann. Generell ist zu erwarten, dass der Trend der Gletscherschmelze sich weiter fortsetzt.

Neben den statistischen Daten aus dem Gletscherinventar kann auf die in geomorphologischen Karten des Turtmanngletschers dargestellten Endstände verschiedener Jahre zurückgegriffen werden. Somit ist eine genauere morphologische Charakterisierung des Gletschers möglich. Auffällig ist, dass die orographisch rechte Seite von 1850 bis 1920 circa 100 bis 200m weiter nördlich liegt als die orographisch linke. 1930 ist kaum noch ein Unterschied zwischen den beiden Seiten zu sehen. Otto (2001) stellt die These auf, dass dies auf den Einfluss des Bruneggletschers zurück zu führen war. Die Abnahme der Asymmetrie um 1930 könnte dies bestätigen, da der Bruneggletscher seit 1934 alleine im Gletscherinventar aufgeführt wird und dadurch sein Einfluss auf den Turtmanngletscher nachgelassen hat. Zusätzlich können interne Instabilitäten wie beispielsweise Eiseinbrüche über den Wasserleitbahnen zu dem Ausgleich der Form geführt haben. In den 1940er und 1950er Jahren besitzt die westliche Seite eine etwas größere Ausdehnung, bis in den 1960ern die östliche Seite erneut dominiert. Anfang der 1990er ist die Stirn wieder ausgeglichen, bis 2001 sich erneut die östliche Seite weniger abgeschmolzen präsentiert. Auf den Bildern in Abbildung 5-5 ist deutlich zu erkennen, dass der Turtmanngletscher an der orographisch rechten Seite eine viel höhere Schuttbedeckung als auf der linken aufweist (vgl. Otto 2001). Auch die auf der gesamten rechten Seite gut ausgeprägten Moränen können ein Zeichen dafür sein, dass die Schuttbedeckung asymmetrisch war und damit auch durch ihre Isolationswirkung Einfluss auf die Gletschermorphologie hatte. Im Jahr 2006 ist ein Teil der östlichen Gletscherstirn eingestürzt. Der westliche Teil wirkte deutlich stabiler. Der Einsturz fand über dem Hauptabfluss des Gletschers statt, was darauf hindeutet, dass das abfließende Wasser Einfluss darauf hatte. Ebenfalls könnte die Form des Untergrundes auf die Stabilität des Gletschers einwirken. Seit 2006 ist der Gletscher an seiner östlichen Seite an einer Stelle so weit abgeschmolzen, dass Festgestein sichtbar wurde. Er scheint also über eine Gesteinsschwelle zu fließen, die besonders die rechte Seite beeinflusst. Die sternförmig angeordneten Gletscherspalten, die in Abbildung 4-4 zu erkennen sind, unterstützen diese Hypothese.

Der Turtmanngletscher hat nicht nur in der Länge abgenommen, sondern auch in der Höhe, was gut an den ehemaligen Seitenmoränen zu erkennen ist. Auf beiden

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

Seiten ist noch durch Schutt isoliertes Toteis vorhanden, besonders im östlichen Teil. Es besteht die Möglichkeit, dass diese Bereiche den Gletscher vor neuen Steinschlägen schützen, indem sie diese abfangen.

Zusammenfassend ist zum Turtmanngletschervorfeld zu sagen, dass viele sich abspielenden Veränderungen durch das Abschmelzen des Turtmanngletschers bedingt sind. Es wurden seit 1850 große Moränenkomplexe freigelegt, die nun für gravitative, periglaziale und fluviale Prozesse verfügbar sind. Da durch die ehemalige Vergletscherung mehr Sediment vorhanden ist als ohne, kann das Gletschervorfeld als ein paraglaziales System betrachtet werden (vgl. Kapitel 2.2.2.3) Durch weitere Erwärmung in der Zukunft (vgl. IPCC 2007) werden Bereiche, die bisher durch Toteis stabilisiert wurden, weiter abschmelzen und dadurch verstärkt abgetragen werden können. Eine erhöhte Sedimentzufuhr stellt vor allem für die wasserwirtschaftliche Nutzung der Gletscherbäche ein Problem dar, da sich die vorhandene Sedimentfalle schneller verfüllen wird.



Abbildung 5-4: Endmoräne des Turtmanngletschers aus der letzten größeren Vorstoßphase zwischen 1970 und Ende der 90er. Im Hintergrund befindet sich die östliche Seitenmoräne von 1850 (2006).

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

### 5.1.4 Entwicklung des Gletschervorfelds

Seit Beginn des neuen Jahrtausends finden im Turtmantal verstärkt Arbeiten durch die Arbeitsgruppe Dikau aus Bonn und das Graduiertenkolleg 437 statt. Seit 1999 wurde der Turtmangletscher regelmäßig von ähnlichen Stellen aus fotografiert, so dass die Möglichkeit besteht, die Veränderungen im direkten Gletschervorfeld bis zur Moräne des letzten Vorstoßes (vgl. Kapitel 5.1.3) anhand verschiedener Fotos (Abbildung 5-5) zu vergleichen. Um die im Text beschriebenen Sachverhalte leichter in den Bildern wieder zu erkennen wurden sowohl im Text, als auch in den Graphiken Buchstaben zur Orientierung eingefügt.

1999 fand der Hauptabfluss an den beiden Seiten des Gletschers statt, wobei der mittlere Teil relativ fluvial unbeeinflusst wirkte. Neben den Hauptabflussrinnen existierten noch weitere Verzweigungen, die möglicherweise bei verstärktem Abfluss aktiviert wurden. Der Gletscherbach des Bruneggletschers floss wahrscheinlich unter dem östlichen schuttbedeckten Teil des Turtmangletschers hindurch (a).

Die Aufnahme aus dem Jahr 2001 zeigt wahrscheinlich einen Zeitraum mit geringem Abfluss. Auffällig ist das mittig liegende Gletschertor (b) und die davor erodierte Rinne, die nach Osten schwenkt und sich dann mit dem von Osten kommenden Abfluss vereinigt (c). Das Gerinne an der westlichen Seite scheint im Jahre 2001 nicht mehr aktiv zu sein.

Auf dem Bild von 2002 ist zu erkennen, dass der Gletscher weiter zurück geschmolzen ist und sich die nach Osten weisende, mittige Rinne verbreitert und vertieft hat (d). Im Westen ist das Gerinne wieder aktiv, aber noch getrennt von der mittigen Rinne, die auf dem Bild einen geringen Abfluss aufweist. Der Bereich an der östlichen Seite wird durch ein weiteres Gletschertor (e) und wahrscheinlich zusätzlich durch das Schmelzwasser des Bruneggletschers gespeist. Insgesamt sind an der östlichen Seite mehrere Stromstriche zu erkennen, die aber in einer Hauptabflussrinne mit dem mittigen Abfluss zusammenkommen. Der östliche, schuttbedeckte Teil des Gletschers (f) weist Degradationserscheinungen, wahrscheinlich durch abschmelzen des Toteis und die fluviale Erosion des Bruneggbachs, auf.

Deutliche Veränderungen sind im Jahr 2003 zu erkennen. Der Gletscher ist aufgrund des warmen Sommers weiter zurück geschmolzen. Das ehemals in der Mitte beginnende Gerinnebett ist jetzt mit dem westlichen verbunden und dient nun als Abflussrinne für Wasser vom Hang (g). An der mittigen Stirn des Gletschers ist ein Teil des

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

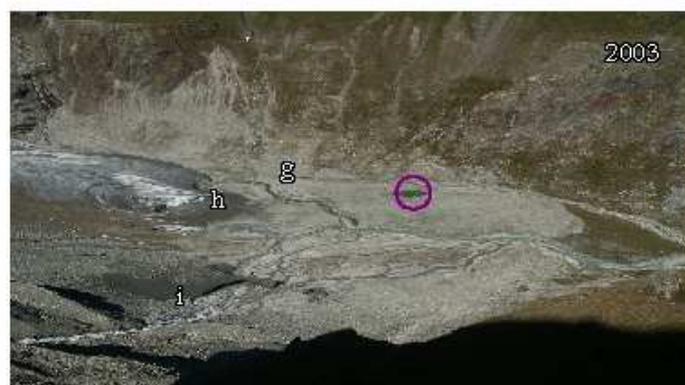
Eises eingestürzt und staut Schmelzwasser (h) in einem gut zu erkennenden See. Das schuttbedeckte Eis (i) ist weiter degradiert und der Bruneggbach fließt deutlich zu erkennen an und unter seinem nördlichen Rand. Der Bach besitzt genau wie in den vorherigen Jahren noch neben einem Hauptstromstrich weitere Nebengerinne.

2004 ist der See nicht mehr vorhanden. Der Bereich vor dem ehemaligen See ist eingeschnitten. Zusätzlich ist ein geringer Schmelzwasserabfluss und im vorderen Bereich eine unruhige Oberfläche (j), die vielleicht durch abtauendes Toteis oder durch den plötzlichen Ausbruch des Sees entstanden ist, zu erkennen. Am Westhang sind kegelförmige, dunkel wirkende Ablagerungen vorhanden (k). Sie stammen von Muren, die ihr Material im August 2004 im Gletschervorfeld abgelagert haben. Nahe dem südlichen Kegel, der bereits wieder fluvial zerschnitten wurde, sind zwei kleinere Gletschertore vorhanden (l), aus denen Wasser austritt. Der Hauptteil des Schmelzwassers des Turtmann-gletschers strömt aus dem Gletschertor an der östlichen Seite (m). Der Bruneggbach fließt nun deutlich neben dem schuttbedeckten Teil des Gletschers und verzweigt sich weiterhin in mehrere Gerinne.

Auf dem Bild aus dem Jahr 2005 ist das durch die Öffnung des Sees entstandene Gerinne kaum durch Schmelzwasser genutzt (n). Der Hauptabfluss des Gletschers fließt weiterhin aus dem östlichsten Gletschertor. An der Stelle, an der dieser Abfluss, der des Bruneggletschers und der geringe Abfluss der mittleren Rinne zusammentreffen, wird abgelagertes Sediment erodiert und somit die Gerinneform verändert (o). An der orographisch rechten Seite des Turtmann-gletschers sind Teile die den Gletscherbach überdeckten, eingestürzt und zusätzlich ringförmige Risse entstanden (p).

2006 ist es zu einem vollständigen Einsturz an diesen ringförmigen Rissen gekommen, der sich im Laufe des Sommers vergrößert hat. Obwohl der größte Teil des Wassers abfließen kann, bildet sich wie im Jahr 2003 ein kleiner See (q), da noch ein Rest Toteis stauend wirkt. Neben dem Abfluss von der östlichen Seite, wurde 2006 die mittlere Rinne, die 2005 kaum Abfluss zeigte, wieder aktiviert (r). Der Bereich der 2005 erodiert wurde, wurde auch 2006 weiter verkleinert.

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie



## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

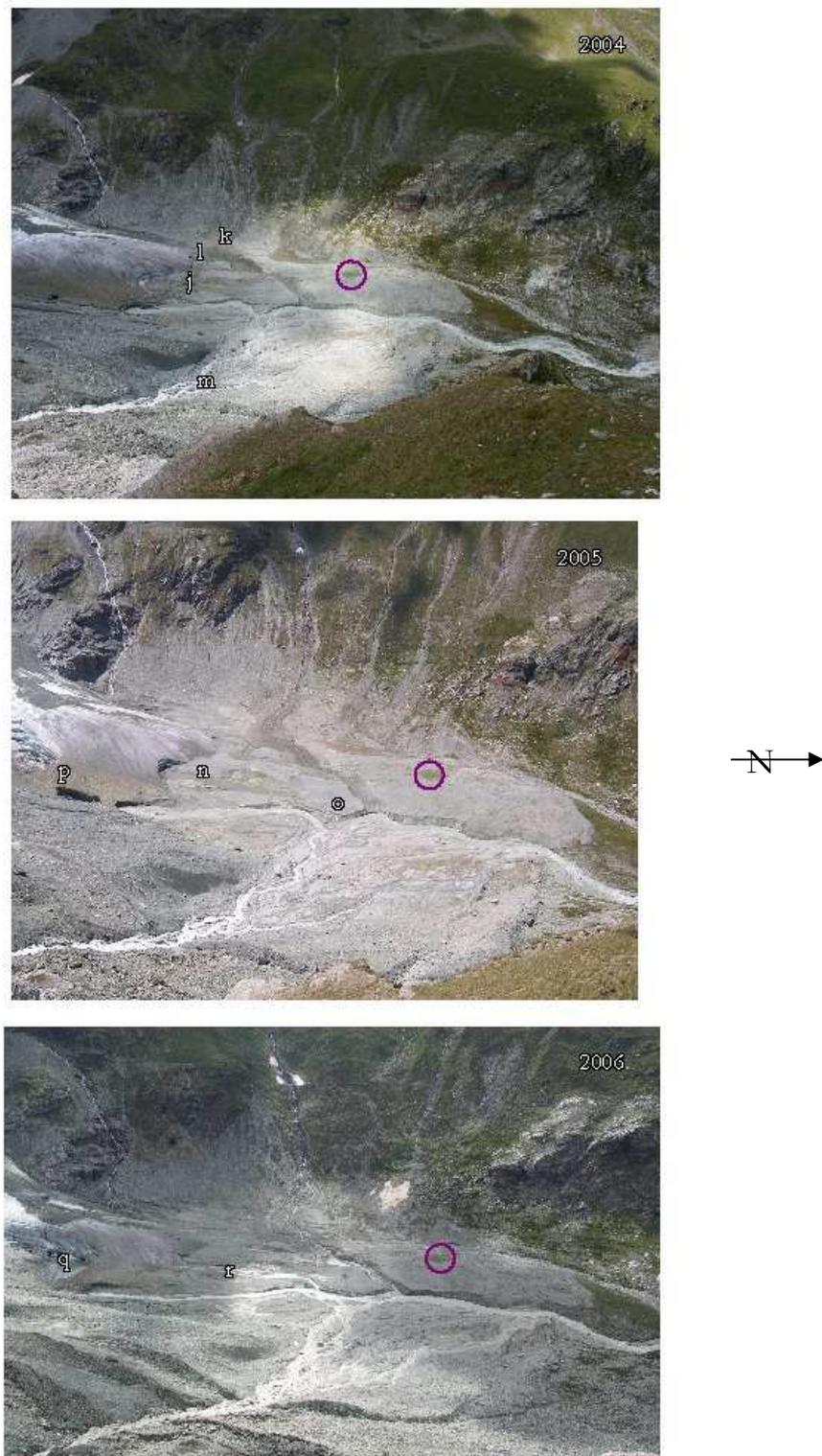


Abbildung 5-5: Endstände des Turtmanngletschers 1999-2006 (2000 fehlt). Zur Orientierung markiert ein violetter Kreis einen kleinen See. Die Buchstaben helfen bei der Orientierung im Text. (1999 & 2002 Dikau, 2001 & 2003-2006 Otto).

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

Insgesamt ist zu sagen, dass zwischen 1999 und 2006 durch das Abschmelzen des Turtmanngletschers Flächen freigelegt wurden, in die sich Abflüsse von den Hängen und vom Gletscher eingeschnitten haben. Neben den Neuentstehungen im mittleren Bereich durch das Kollabieren des Sees sind die Gerinne insgesamt recht konstant geblieben. Der Schwerpunkt des Schmelzwasserabflusses befindet sich heute an der östlichen Seite. Außer den beiden Murkegeln konnte auf den Bildern keine Akkumulation von Material festgestellt werden. Zuletzt soll noch einmal der Einfluss des Bruneggbachs hervorgehoben werden, der deutlich dazu beigetragen hat den östlichen, schuttbedeckten Teil des Gletschers abzuschmelzen und auch weiterhin dazu beiträgt.

### 5.2 Rinderalpji

Die Rinderalpji-Kartierungen besitzen einen Maßstab von 1:5.000 und sind somit großmaßstäbiger als die des Turtmanngletschers. Die Beschreibung dieses Gebietes erfolgt ebenfalls nach den Informationsschichten der GMK 25. Zusätzlich führe ich eine weitere Informationsschicht mit dem Thema „Unsicherheiten“ ein, um Bereiche, in denen weitere Untersuchungen notwendig sind als solche zu kennzeichnen. Im ersten Unterkapitel wird die GMK 25 Karte vorgestellt, während im zweiten die Unterschiede zur GMK Hochgebirge näher beleuchtet werden. Abschließend wird auf die Entwicklung des Gletschers Rothorn-Nordost eingegangen.

#### 5.2.1 GMK 25

Ebenso wie im ersten Kartiergebiet im Turtmantal soll zur Beschreibung des zweiten Gebietes im Mattertal nach den einzelnen Informationsschichten vorgegangen werden. Wie bereits zuvor werden die Prozesse mit den Prozessbereichen zusammen behandelt. Auch Wölbungssignaturen wurden in dieser Kartierung nicht verwendet. Um einen plastischen Eindruck des Gebiets zu erhalten wurde dem kartierten Bereich ein Hillshade unterlegt. Im Gegensatz zum Turtmanngletschervorfeld ist durch dieses in der GMK 25 der Rinderalpji eine visuelle Verbesserung möglich.

##### 5.2.1.1 Situation und Topographie

Für die Darstellung der GMK 25 Karte wurde auf die stark vergrößerte topographische Landeskarte der Schweiz als Kartengrundlage für das Rinderalpji-Gebiet ver-

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

zichtet. Die Höhenlinien und die restlichen Signaturen waren, aufgrund des unterliegenden Hillshades, schlecht zu erkennen und führten deswegen nicht zu einer Verbesserung des Kartenbildes. Da meiner Meinung nach die Höhenlinien wichtig für die Wahrnehmung der Topographie sind, wurden diese in ArcGis aus dem Höhenmodell errechnet und in die Karte eingefügt.

Nähere Ausführungen zur Lage, zum Klima und zur Geologie der Rinderalpji wurden bereits in Kapitel 4 vorgestellt und sollen an dieser Stelle nicht wiederholt werden.

### 5.2.1.2 Hangneigung

Die aus dem HRSC-A Höhenmodell erstellte Hangneigungskarte spiegelt die Heterogenität des Gebietes wieder. Auf der geomorphologischen Karte ist sie durch unterschiedliche Muster dargestellt (graue Signaturen), und hilft in der Zusammenschau mit den anderen Informationsschichten, das Kartiergebiet zu charakterisieren. Eine farbliche Darstellung würde die Betrachtung der Hangneigung erheblich erleichtern, ist aber aufgrund der Nutzung der Flächenfarbe für die Prozessbereiche in der GMK 25 nicht möglich. An dieser Stelle kann aber eine farbige Hangneigungskarte als eine einzelne Schicht präsentiert werden (Abbildung 5-6).

Die steilsten Bereiche ( $>60^\circ$ ) (dunkelblau) werden durch Felsstufen erzeugt, während die flachsten Teile ( $0-2^\circ$ ) (gelb) glaziofluvial entstanden sind. Insgesamt besitzen fast 65% der Fläche Neigungen  $> 25^\circ$ . 31,7% der Fläche zeichnet sich durch eine Neigung von  $25-35^\circ$  aus, einem Wert, der dem des Turtmanngletschervorfelds gleicht. Ein Drittel des Gebiets zeigt Neigungen zwischen  $2$  und  $25^\circ$ , was in der Abbildung den grünlichen Farbbereichen entspricht.

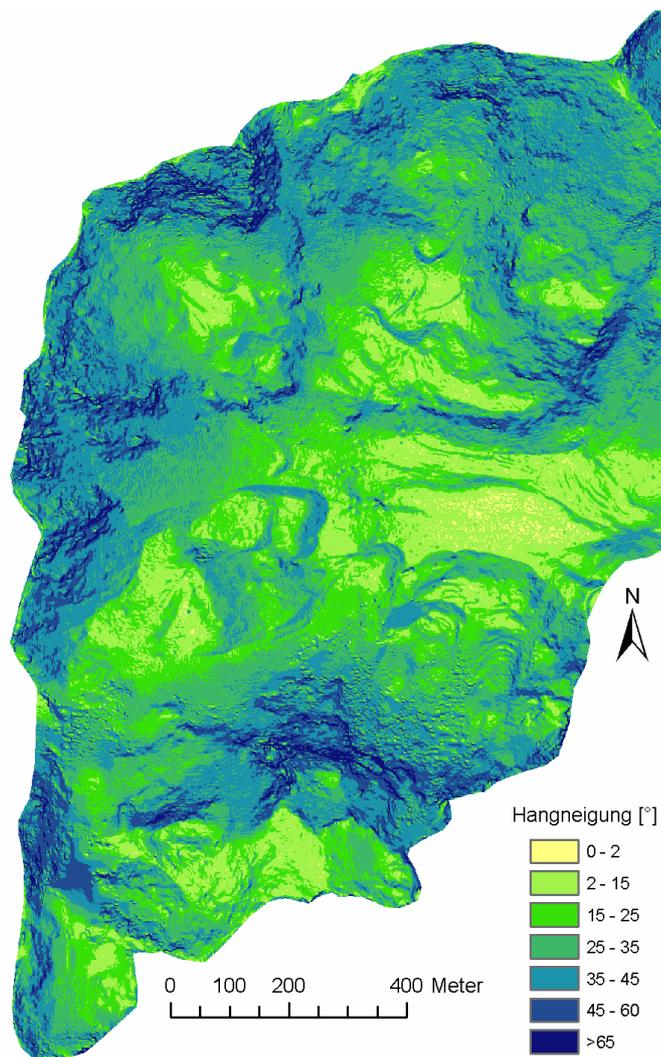


Abbildung 5-6: Hangneigungskarte des Kartiergebietes Rinderalpji, errechnet aus dem HRSC-A Höhenmodell mit einer Auflösung von 1m.

### 5.2.1.3 Stufen, Kleinformen, Täler und Rauheit

Diese Informationsschicht ist in der Rinderalpji durch vielfältige Formen repräsentiert. Im gesamten Gebiet sind deutliche Geländestufen zu erkennen. Dabei wird ein Teil durch anstehendes Festgestein hervorgerufen, ein anderer Teil ist das Ergebnis glazialer oder periglazialer Prozesse. Die Stufeneinteilung folgt auch hier den in der GMK Hochgebirge vorgeschlagenen Klassen.

Als geomorphologische Formen wurde u. a. Schuttkegel und Frostmusterboden aufgenommen. Aufgrund der großmaßstäbigen Kartierung konnten einige Schuttkegel an den Nordhängen und Hangschuttbereiche an den Nord- und Südhängen nicht mit

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

den in der Legende vorhandenen Signaturen bezeichnet werden. Sie sind in der geomorphologischen Karte durch schwarze Liniensignaturen ausgewiesen, die Hangschutt durch parallel verlaufende und Schuttkegel durch sich nach unten öffnenden Linien kennzeichnen.

Im östlichen Kartiergebiet befindet sich ein Bereich mit Frostmusterung, der durch ringförmige Anordnung von größerem Material mit einem Innenbereich aus feineren Korngrößen charakterisiert wird. Als weitere Formen sind eine kesselförmige Vertiefung auf einer Moräne und verschiedene Felsbereiche mit Gletscherschliff vorhanden.

Die in der Rinderalpji vorhandenen Moränen, deren Entstehung in Kapitel 5.2.3 genauer erläutert wird, wurden je nach Erscheinungsbild, mit einer Wallsignatur ausgewiesen oder durch eine Stufensignatur gekennzeichnet. Auch die Stirn und die Seitenbereiche der kartierten Blockgletscher wurden durch Stufen beschrieben, da so ihre Form am besten wiedergegeben werden konnte. Zusätzlich war es möglich aus dem HRSC-A Bild Wülste auf den Blockgletschern zu kartieren, die in der Karte mit dem Symbol für Wall dargestellt werden.

### 5.2.1.4 Substrat und Oberflächengestein

Substrat und Oberflächengestein wurden auch hier nur nach visuellen Kriterien aufgenommen. Fast das gesamte Gebiet ist von kantigen Blöcken (>200mm) bedeckt. Ausnahmen bilden Teile des Südhangs, die eine Schuttauflage (2-200mm) besitzen, und Bereiche mit fluvioglazialen Material um die Bäche im südwestlichen Untersuchungsgebiet. In der GMK 25 existiert eine eigene Signatur für Moränenmaterial, welche hier in den ehemals vergletscherten Bereichen verwendet wurde. Da bereits durch den glazialen Prozessbereich eine genetische Aussage getroffen wird, ist diese Signatur meines Erachtens nicht sinnvoll. Das Moränenmaterial besteht aus kantigen Blöcken und könnte auch durch diese Signatur beschrieben werden. Die Südhänge erscheinen insgesamt nicht so rau wie die Nordhänge, da sie mehr Vegetation aufweisen. Interessant sind die eingeregelteten Blöcke, die eine fast ebene Fläche im östlichen Teil bilden. Hypothesen zur Entstehung dieser Einreglung werden in Kapitel 5.2.1.7 besprochen.

Vorhandenes Festgestein wurde als Metamorphit in der Karte gekennzeichnet und im Wesentlichen aus dem Vector25 Datensatz übernommen. Daneben sind besonders das freiwerdende Festgestein durch den abschmelzenden Gletscher Rothorn-

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

Nordost und das anstehende Gestein, welches aus den Blöcken der westlichen Moräne vor der ein See liegt, herausragt, zu erwähnen. Diese beiden Bereiche und zusätzlich kleinere weitere Stellen stammen nicht aus dem Vector25 Datensatz, sondern wurden im Gelände aufgenommen.

### 5.2.1.5 Hydrographie

Die Hydrographie ist, aufgrund des kleineren Maßstabs, weder in der Landeskarte der Schweiz noch im Vector25 Landschaftsmodell ausreichend für die Rinderalpji dargestellt und musste deshalb nachkartiert werden. Es konnte nur die Lage des unteren, östlichen Sees und der darunter liegenden, perennierenden Bäche, die auf der Karte ab dem flachen Bereich eingezeichnet sind, übernommen werden.

In der Landeskarte der Schweiz Blatt St. Niklaus mit dem Stand 1999, ist noch ein Gletscher vom Jungpass nach Osten bis zu dem großen Moränenwall mit dem neuen See vorhanden. Bei der Kartierung 2006 konnten jedoch nur noch wenige Eisreste am Jungpass und einige perennierenden Schneeflecken östlich davon aufgenommen werden. Auch der südliche Teil des Rothorn-Nordost Gletschers hat in seiner Ausdehnung abgenommen, was vor allem an den neu auftauchenden Felsriegel zu sehen ist. Er hat meines Erachtens besonders an Dicke abgenommen.

Neben dem bereits erwähnten östlichen See wurde im Jahr 2006 ein weiterer, circa 80m langer See in der Nähe des Jungpasses kartiert (vgl. Abbildung 4-9). Für dessen Bildung waren und sind wahrscheinlich sowohl auftauendes Toteis als auch Zuflüsse aus Richtung des Jungpasses und Staueffekte durch verdichtetes Moränenmaterial verantwortlich. Während der Kartierarbeiten konnte das Abschmelzen von Toteis und der Zufluss von Wasser direkt beobachtet werden. Die Abbildung 5-7 zeigt den See mit dem Toteis und einer Person zur Einschätzung seiner Größe. Da der See weder in der topographischen Karte eingezeichnet, noch auf dem HRSC-A Bild zu erkennen ist, muss er nach 2001 entstanden sein. Für eine noch spätere Bildung spricht ein Satellitenbild auf Google Earth (<http://earth.google.de/>), das, aufgrund der Form der Turtmangletscherstirn, wahrscheinlich zwischen 2005 und 2006 aufgenommen wurde und nur einen sehr kleinen See abbildet. Es wäre interessant zu wissen, aus welcher Zeit das Toteis stammt. So könnte es sich z.B. um die Eisreste des letzten Gletschers in dieser Lage oder um Reste eines älteren Gletschers handeln, die durch die zunehmende Erwärmung abschmelzen.

Der östliche, perennierende See besitzt Zuflüsse von den darüber liegenden Hangbe-

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

reichen und Abflüsse in südöstliche Richtung. Sowohl dieses Wasser, als auch periodische Abflüsse aus Richtung des Jungpasses, des Rothorn-Nordost Gletschers und der umliegenden Hänge sammeln sich in einem fast ebenen Bereich. Neben zwei Hauptabflussrinnen sind dort viele vernässte Bereiche ohne deutliche Wasserbewegung vorhanden.



Abbildung 5-7: Westlicher See an einer Moräne auf der Rinderalpji. Der Pfeil deutet auf das abschmelzende Toteis, der Kreis markiert eine Person zum Größenvergleich (2006).

### 5.2.1.6 Prozess- und Strukturbereiche

Die Rinderalpji ist durch fünf Prozessbereiche (glazial, fluvioglazial, periglazial, gravitativ, denudativ) geprägt, die in den anschließenden Abschnitten näher vorgestellt werden. Die genauere historische Entwicklung des Gebietes wird in Kapitel 5.2.3 zusammenhängend erläutert.

Als glazialer Prozessbereich (violette Flächen) wurde der Teil des Gebietes gekennzeichnet, der deutlich erkennbare glaziale Formen aufwies. Im Gegensatz zum Turtmanngletscher, in dem der glaziale Prozessbereich durch den maximalen Gletscherstand in der Kleinen Eiszeit eingegrenzt wurde, sind hier auch ältere Moränen miteinbezogen. An den Hängen konnte die Schliftgrenze vor 1850 nicht genau verfolgt werden und ist aus diesem Grunde auch nicht dem glazialen Prozessbereich

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

zugeordnet.

Die glazialen Akkumulationsformen fallen in diesem Untersuchungsgebiet besonders auf. Eine hohe Schuttfuhr von den umgebenden Hängen und ein geringer glaziofluvialer Austrag sind wahrscheinlich die Gründe für die Akkumulation große Moränen (20-100m) im mittleren Bereich (vgl. Kapitel 2.2.2.1). Dabei können verschiedene Moränenstände unterschieden werden. Eine Moräne beginnt direkt hinter dem See. Weitere, die vermutlich den Höchststand der Kleinen Eiszeit zeigen, sind östlich davon vorhanden. Ganz im Osten sich befinden Moränenwälle, die bewachsen und abgerundet sind und wahrscheinlich im Pleistozän entstanden sind. Somit würden sie ein wesentlich höheres Alter besitzen (vgl. Kapitel 5.2.1.7). Als erosive Formen sind abgeschliffene und abgerundete Felsen vorhanden und eine größere Stufe im Osten, die aber wahrscheinlich auf den Einfluss eines anderen Gletschers, dem Junggletscher, zurückzuführen ist.

In der Karte ist die östliche Ebene als glaziofluvialer Prozessbereich markiert. Die umgebenden Moränen zeigen den glazialen Einfluss, der aber in der Ebene durch glaziofluviale Prozesse überformt wurde. Auffällig ist das bereits in Kapitel 5.2.1.4 erwähnte eingeregelte Substrat. Hypothesen über die Entstehung werden in Kapitel 5.2.1.7 vorgestellt.

Der größte Teil der Rinderalpji kann dem kryogenen Prozessbereich zugeordnet werden. Es wurde jedoch kein Bereich als rein periglazial ausgewiesen, sondern nur in Verbindung mit den glazialen oder gravitativen Prozessbereichen.

Blockgletscher spielen im Kartiergebiet eine große Rolle. Im Furggwangjoch wurden initiale Blockgletscher aufgenommen, die eine Stirnhöhe von 3-10m besitzen. Auch Hänge der Wysegga weisen Blockgletscher auf. Neben vier Loben mit einer Stirn von 3-10m, besitzt ein Blockgletscher eine zwischen 10-20m und der am weitesten vorgestoßene eine Stirnhöhe von >20m. Im südöstlichen Kartiergebiet reicht ein mächtiger, wallförmiger Blockgletscher mit einer Stirn vorn circa 40m bis auf eine Höhe von 2700m im flachen Teil des Gebietes. Ich nehme deswegen an, dass es sich um einen dynamisch inaktiven Blockgletscher handelt. Dafür spricht auch die Neigung seiner Stirn, die zwischen 25 und 35° liegt, während die Neigung der als aktiv angesehenen größeren Blockgletscher zwischen 35 und 45° liegt (vgl. Abbildung 5-6). Oberhalb des wallförmigen Blockgletschers befinden sich zwei weitere, aktive Blockgletscher, wobei der westliche mit einer Stirn von >20m mächtiger ist als der östliche.

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

Die meisten kleineren Blockgletscher wurden aufgrund der schlechten Zugänglichkeit aus dem HRSC-A Bild nachträglich kartiert. Die größeren wurden, jeweils vom Gegenhang aus, jedoch bereits im Gelände, als Blockgletscher identifiziert und aufgenommen. Aufgrund ihrer Lage am Hang gehe ich davon aus, dass die Blockgletscher ihr Material aus Schutthalden beziehen und dadurch auf Verwitterung und Sturzprozesse angewiesen sind.

Bezüglich der Blockgletscher aus Moränenmaterial bestehen einige Unsicherheiten im Rinderalpji-Gebiet (vgl. Kapitel 5.2.1.7). Es ist möglich, dass die beiden fast parallelen nördlichen und südlichen Endmoränenstände des Rothorn-Nordost Gletschers während des letzten neuzeitlichen Gletscherhochstands, als Blockgletscher weiter in das Gebiet vorgestoßen sind.

Nahe dem Jungpass wurden vier Geländestufen aus Lockermaterial im Gelände kartiert. Sie konnten nicht im HRSC-A Bild identifiziert werden, da diese Stelle schneebedeckt ist. Besonders bei den beiden südlichen Stufen mit einer Höhe >20m kann vermutet werden, dass es sich um Blockgletscher handelt. Dafür sprechen die steilen Fronten (35°, im Gelände gemessen) und kleinere Wülste und Sackungen. Problematisch bei der Erklärung ist jedoch, dass dieser Bereich noch in der Landeskarte der Schweiz von 1999 durch einen Gletscher bedeckt ist und es sich deswegen nicht um neu entwickelte Blockgletscher handeln kann (vgl. Kapitel 5.2.1.7). Die beiden anderen Stufen zeigen wesentlich kleinere Formen an (3-10m). Die langgestreckte Lobe fällt genau in den Bereich, der in dem Vector25 Datensatz als Geröll auf dem Gletscher gekennzeichnet ist. Es kann sich dabei folglich auch um einen Rest dieses Gerölls handeln. Die nördlichste Lobe am Jungpass besitzt eine steile, feinkörnige Stirn.

Neben Blockgletschern spielt die Solifluktion im ehemals vergletscherten Bereich eine größere Rolle. Den westlichen Teil und die Mitte des Gebietes zeichnen zahlreiche Solifluktionsloben aus. Auch flächige Solifluktion ohne die Ausbildung von Loben wurde kartiert.

Die Ausbildung des Frostmusterbodens im Osten kennzeichnet ebenfalls den kryogenen Bereich.

Der gravitative Prozessbereich ist an den nördlichen Hängen und im Südosten mit dem kryogenen verbunden. Ein Zeichen dafür sind beispielsweise die Blockgletscher die ihr Material aus Schutthalden beziehen. Ansonsten existieren auch Stellen an de-

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

nen nur gravitative Prozesse prägend sind. Steinschläge spielen dabei die größte Rolle. Während der Kartierarbeiten haben sich besonders am Rothorn-Nordost Gletscher immer wieder kleinere Steine gelöst, aber auch an den Hängen konnten Steinschlagrinnen identifiziert werden. Das Vorhandensein größerer kantiger Blöcke legt die Vermutung nahe, dass es auch zu Felsstürzen kommen kann. Durch auftauenden Felspermafrost werden sich wahrscheinlich die gravitativen Prozesse verstärken (vgl. Gruber et al. 2004; Krautblatter & Hauck submitted; Sass 2005).

Durch das auftauende Toteis rund um den See versteilte sich dort das Ufer und es konnten kleine Rutschungen und das Herabrollen von Steinen beobachtet werden. Je nachdem wie groß der vom Eis geprägte Bereich ist, könnte das Ufer kollabieren und es könnte zu einer vollständigen Verfüllung des Sees kommen.

Den nördlichen, unteren Hangbereichen wurde neben dem gravitativen Prozessbereich noch der denudative zugeordnet, da an einigen Stellen deutliche Erosionsrinnen zu erkennen waren.

### 5.2.1.7 Unsicherheiten

Aufgrund polygenetischer Entstehung und Formenkonvergenz verschiedener Prozesse können einige geomorphologische Formen nicht zweifelsfrei in der Karte definiert werden. Auch meine geringen Kartier-Erfahrungen führten zu einigen Unsicherheiten in der Bestimmung einiger Formen und Prozesse. Da bisher keine Signaturen für nicht geklärte Gegebenheiten vorhanden waren, habe ich ein eigenes Symbol, ein schwarzes Fragezeichen auf gelbem Grund, ausgewählt. Um in den Erläuterungen der Karte die unsicheren Gebiete leichter erklären zu können, wird neben dem Fragezeichen-Symbol eine Zahl angegeben. Die Zahl ist bei einer rein digitalen Karte nicht notwendig, da beim Markieren des entsprechenden Fragezeichens das Problem in einer Tabelle abgelesen werden könnte. Im Folgenden werden die aufgetretenen Unsicherheiten kurz erläutert. Die Abschnitte sind mit der Signatur gekennzeichnet, die auch in der Karte zu finden ist.

? 1: Dieses Fragezeichen steht für ein Problem in der Unterscheidung zwischen einer Endmoräne und einem Blockgletscher und gilt auch für die südliche Moräne. Die gut ausgeprägten Seitenmoränen bestätigen, dass glazigenes Material in diesem Bereich abgelagert wurde. Es sind also auf jeden Fall Endmoränen vorhanden. Die steile Stirn und vorhandene Wülste könnten für einen Blockgletscher aus Moränenmaterial

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

sprechen. Gruber und Hoelzle (2001) haben sie als inaktive Blockgletscher in einer digitalen Kartierung identifiziert. In dem Bereich, in der sich die Fragezeichensignatur befindet, sind zwei Stufen vorhanden. Die westliche ist meiner Meinung nach eher eine normale Moräne mit einer unruhigen Oberfläche durch Schwankungen im Gletscherstand. Die östliche Stufe könnte ein zweiter älterer Gletscherstand sein, aus dessen Spitze ein Blockgletscher fließt. Es könnte sich auch um einen größeren, vom Gletscher überfahrenen Blockgletscher handeln, der aufgrund seiner Ausdehnung bereits vor der Kleinen Eiszeit vorhanden gewesen sein müsste. Eventuell liegt auch einfach nur eine Moräne vor.

? 2 An dieser Stelle in der Karte ist noch nicht genau geklärt, ob die in Kapitel 5.2.1.6 bereits beschriebenen vier Stufen alle Blockgletscher sind. Falls es sich um Blockgletscher handelt muss herausgefunden werden, wann und wie sie entstanden sind. Da der Gletscher erst seit wenigen Jahren, maximal seit 1999, also dem letzten Stand der Landeskarte der Schweiz, den Bereich nicht mehr bedeckt, könnte vermutet werden, dass sich die Blockgletscher in dieser kurzen Zeit entwickeln haben. Dies widerspricht jedoch der gängigen Lehrmeinung. Eine zweite Hypothese ist, dass es sich um Blockgletscher handelt, die sich bereits in den letzten Warmzeiten zu Formen begannen, bei den erneuten Gletschervorstößen nicht zerstört wurden und heute wieder reaktiviert werden. Als dritte Erklärungsmöglichkeit könnte in Betracht gezogen werden, dass es sich nicht um Blockgletscher, sondern um rein glaziale Formen wie z.B. Moränen handelt.

? 3 Das dritte Fragezeichen steht für Unsicherheiten bezüglich des Alters der Moränen und ihrer genauen Entstehung. Es stellt sich die Frage, ob sie alle durch einen von Westen kommenden Gletscher entstanden sind oder ob die östlichen Teile von einem Gletscher aus nördlicher Richtung oder einem Zusammenspiel beider geprägt wurden.

? 4 Die vierte Signatur steht für Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung des flachen, feuchten Bereichs. Besonders auffällig sind die eingeregelteten Steine. Einregelungen sind beispielsweise durch den Prozess der Kryoplanation bekannt. Wäre dies der Fall, müsste dieser Bereich auch als kryogener Prozessbereich ausgewiesen werden. Eine zusätzliche Erklärungsmöglichkeit besteht darin, dass an dieser Stelle ein See vorgelegen hat, der durch den von Süden kommenden Junggletscher aufgestaut

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

wurde. Nach dem Abschmelzen des Junggletschers könnte eventuell abgelagertes Feinmaterial durch glaziofluviale Prozesse abgetragen worden sein.

### 5.2.2 Vergleich GMK 25 und GMK Hochgebirge

Wesentliche Unterschiede zwischen der Legende der GMK Hochgebirge und der GMK 25 wurden bereits in Kapitel 5.1.2 anhand des Turtmanngletschers präsentiert. An dieser Stelle werden darum nur charakteristische Besonderheiten des Rinderalpji-Gebiets erläutert.

Im Gegensatz zur GMK 25 Karte der Rinderalpji ist in der GMK Hochgebirge die topographische Karte als Informationsschicht vorhanden. Ohne diese Karte würde das Kartenbild zu leer wirken, da in dieser neben den Höhenlinien auch Gesteins- und Schuttbedeckung dargestellt werden.

Der größte Unterschied zur GMK 25 Karte besteht darin, dass die Blockgletscher eine eigene Signatur besitzen und nicht erst aus der Synthese der Farbe des Prozessbereiches und der Stufensignatur interpretiert werden müssen. Zusätzlich ist eine Unterscheidung in aktive, inaktive und reliktsche Blockgletscher möglich.

Den Moränen, die ebenfalls eine eigene Signatur besitzen, kann, je nach Alter eine eigene Signatur zugeordnet werden. Die deutlich jüngeren, unbewachsenen Moränen werden durch offene Kreise auf einer Linie repräsentiert, die älteren, bewachsenen und im östlichen Gebiet liegenden, durch geschlossene Kreise. Problematisch wird die strikte Ausweisung von Blockgletschern und Moränen jedoch wenn, wie bereits dargestellt, Unsicherheiten vorhanden sind.

Wie in der GMK 25 Karte der Rinderalpji wurde auch der GMK Hochgebirge ein Hillshade unterlegt. Dieses grenzt das Kartiergebiet von der Umgebung ab und vermittelt einen plastischen Eindruck, bei dem besonders die Moränen und Blockgletscher gut zu erkennen sind. Dies führt meiner Meinung nach zu einer optischen Verbesserung der Karte, die auch durch die Graustufen mit der Konzeption der GMK Hochgebirge auf Farben zu verzichten, kompatibel ist.

### 5.2.3 Entwicklung des Rothorn-Nordost Gletschers

Nachdem im vorherigen Kapitel die geomorphologischen Eigenschaften des Kartiergebiets vorgestellt wurden, soll nun auf die Entwicklung des Rothorn-Nordost Gletschers eingegangen werden. Zu diesem Gletscher liegen weitaus weniger Informationen vor als zu den Veränderungen des Turtmanngletschers. Dies liegt sicherlich

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

an der schlechten Zugänglichkeit des Gebiets, dem mangelnden touristischen Interesse und des nur kleinen Gletschers. Aufgrund der interessanten Moränenanordnung, den verschiedenen Prozessen und den nicht auf den ersten Blick zu erklärenden Formen ist es aber dennoch aufschlussreich, Hypothesen über das Verhalten des Gletschers aufzustellen.

Historische Informationen über die Gletscherstände des Rothorn-Nordost können aus der Dufour-Karte und der Siegfried-Karte interpretiert werden.

Die Dufour-Karte (I) (Abbildung 5-8) zeigt, dass der Gletscher Rothorn-Nordost zur Zeit der letzten Gletscherhochstandsphase keine sehr große Ausdehnung hatte. Dies deckt sich auch mit der Annahme, dass die Schneegrenze in diesem Teil der Walliser Alpen aufgrund der klimatischen Bedingungen sehr hoch lag und liegt (Maisch et al. 2000). Obwohl die Karte nur einen Maßstab von 1:100.000 besitzt, kann erkannt werden, dass der Gletscher eine gespaltene Stirn hatte (siehe Pfeil). Dabei war die nördliche Seite deutlich mächtiger als die südliche. Die Karte bestätigt somit die Annahme, dass die beiden Endmoränen (Abbildung 5-8 ; IV b u. e) den Maximalstand der Neuzeit anzeigen, und die Moränen am östlichen Rand des Gebietes bereits im Pleistozän entstanden sein müssen. Die Siegfried-Karte (II) (Maßstab 1:50.000) zeigt die Gletscherstände um das Jahr 1927. Auffällig ist zunächst die Transfluenz am Jungpass, die auf der Dufour-Karte nicht zu erkennen ist. Der nördliche Teil des Gletschers umfließt auf der Siegfriedkarte Festgestein (siehe Pfeil), was ebenfalls auf keiner anderen Karte dargestellt ist, bei den Geländearbeiten aber ebenfalls, stark von Schutt bedeckt, nachgewiesen werden konnte. Die Lage ist auf dem Hillshade (IV) in Abbildung 5-8 markiert (a) und auf den geomorphologischen Karten eingezeichnet. Meiner Meinung nach kann auch der Kartierer 1927 kein reines Festgestein ohne Schuttbedeckung vorgefunden haben. Die Gründe dafür werden in den nächsten Abschnitten erläutert, da für weitere Analysen sowohl die Dufour- als auch die Siegfriedkarte zu kleinmaßstäbig sind.

Da es meines Wissens keine weiteren genauen Aufzeichnungen über den Gletscher existieren und ich im Wesentlichen nur den heutigen Gebietszustand kenne, kann ich die Entstehung der Formen im Gebiet und die Entwicklung des Gletschers nur methodisch abduktiv erklären (vgl. Inkpen 2005). Dies bedeutet, dass ich aufgrund der heutigen vorhandenen Formen und meines Wissens über die Entstehung von Formen und mögliche Prozesse, versuche die Entwicklung der Rinderalpji zu rekon-

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

struieren und den wahrscheinlichsten Ablauf zu finden. Dazu werden in der Regel mehrere Arbeitshypothesen aufgestellt (Chamberlin 1890) und die wahrscheinlichste, wenn möglich, durch das Finden der „smoking gun“ (Cleland 2001, S. 988) also einem eindeutigen Beweis, identifiziert. Zu den folgenden Hypothesen zum Verhalten des Gletschers seit dem Ende des Pleistozäns haben mich die Geländebefunde und die Erkenntnisse während der Kartenerstellung bewogen. In den anschließenden Abschnitten werden nur die wahrscheinlichsten Hypothesen vorgestellt. Dabei werden vier Phasen unterschieden und anhand von Buchstaben in der Abbildung 5-8 (IV) verdeutlicht.

Ich gehe davon aus, dass in der ersten Phase das bereits erwähnte Festgestein (a) den Gletscher nach Ende des Pleistozäns bis zum Beginn der Kleinen Eiszeit aufgestaut hat. Dadurch konnte dieser eine große Menge Moränenmaterial ablagern, was die fast vollständige Bedeckung des Festgesteins mit Sediment, welches wenig bewachsen aber einigermaßen fest ist, erklären könnte. Auch das heute abschmelzende Toteis könnte ein Hinweis darauf sein.

In der zweiten Phase, also während der Kleinen Eiszeit, wuchs der Gletscher und überfloss den stauenden Riegel an zwei Seiten (b, c). Der mittlere, östliche Bereich dieses Riegels wurde wahrscheinlich nicht davon beeinflusst. Diese Annahme wird durch das Vorhandensein von Festgestein und deutlich bewachsenen Bereichen an dieser Seite bestätigt (vgl. Abbildung 4-8). Auch in dieser Phase könnte das Festgestein(a) durch Geröll bedeckt worden sein. Wahrscheinlich lag schon seit dieser Phase eine deutliche Schuttbedeckung des Gesteins vor. Aus diesem Grunde konnte der Kartierer der Siegfriedkarte 1927 meiner Meinung nach die Ausdehnung des Festgesteins nicht eindeutig aufnehmen, sondern nur vermuten.

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

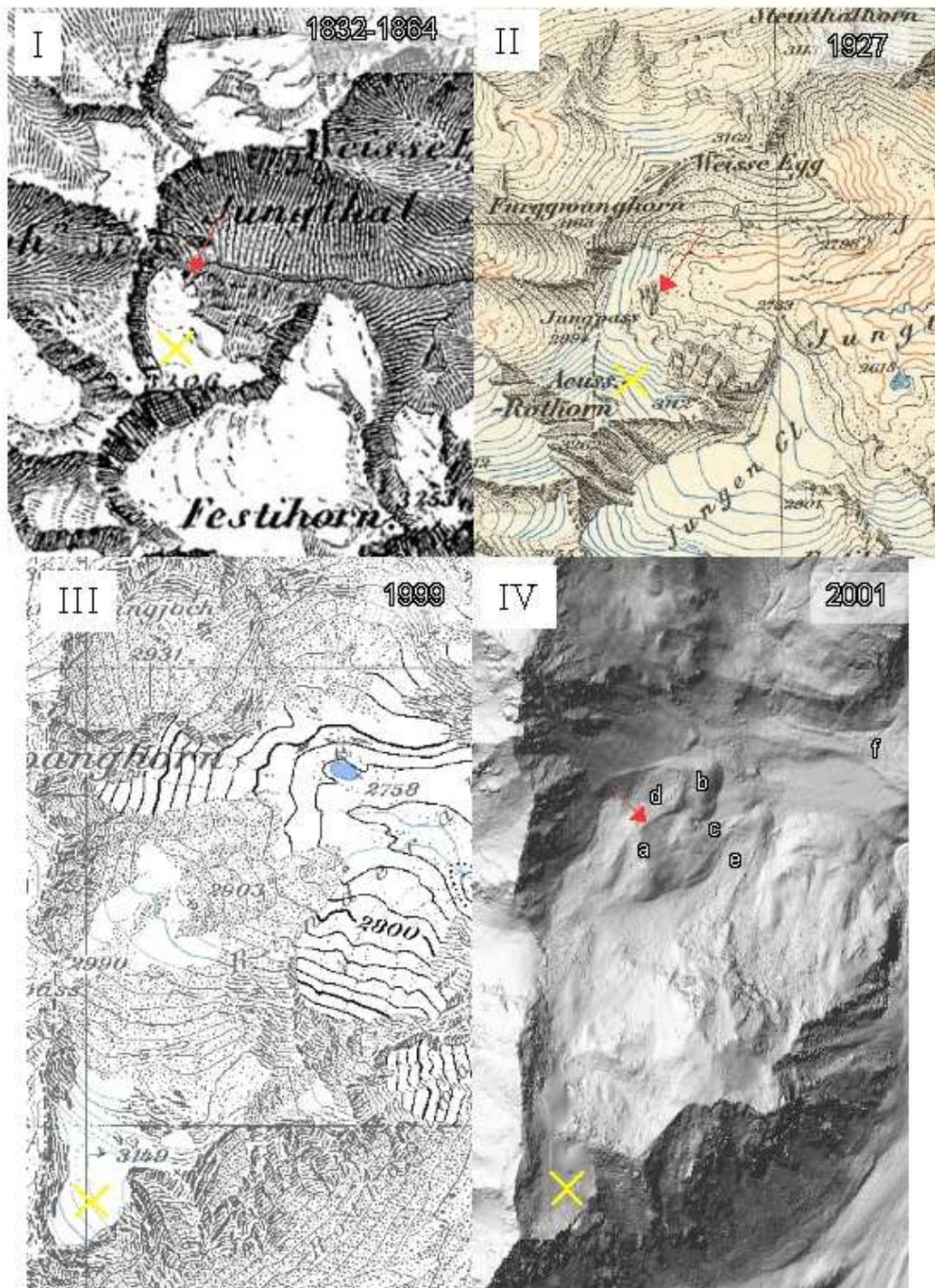


Abbildung 5-8: Ausschnitte aus der Dufour- (I), Siegfried (II)- und der Landeskarte der Schweiz (III), die mit dem Hillshade (IV) die Entwicklung des Rinderalpji-Gebiet illustrieren sollen. Das gelbe Kreuz markiert den Rothorn-Nordost Gletscher, die Pfeile und Buchstaben werden im Text erläutert.

## 5 Ergebnisse der Kartierungen und Diskussion der Geomorphologie

Da es während der kleinen Eiszeit mehrere Gletschervorstöße gab ist es möglich, dass ein weiterer Vorstoß in einer dritten Phase stattgefunden hat. Im nördlichen Bereich hätte der Gletscher den Hochstand somit nicht um 1850 erreicht, sondern bereits früher, was häufig in den Alpen vorkommt (Maisch, et al. 2000). Dafür spricht, dass auf der Moräne (b) selbst noch eine weitere Moräne (d) deutlich zu erkennen ist. Die jüngere Seitenmoräne hebt sich von der Rückseite des Walls (siehe Pfeil) und zusätzlich vom Hang gut sichtbar ab.

Die südliche Lobe (e) scheint im Gegensatz zur nördlichen ihren Höchststand Mitte des 19. Jahrhunderts gehabt zu haben, jedenfalls sind keine zwei eindeutig voneinander unterscheidbaren Phasen vorhanden.

Problematisch bei dieser Interpretation ist, dass bisher keine periglazialen Prozesse berücksichtigt wurden. Es ist möglich, dass sich das Moränenmaterial aus Phase zwei als Blockgletscher weiter bewegt hat (vgl. Kapitel 5.2.1.7).

In der vierten Phase wird der Rückzug bis heute zusammengefasst. Moränen nach dem Höchststand der kleinen Eiszeit sind im Gegensatz zum Turtmanngletscher nicht im Gebiet vorhanden. Die Landeskarte der Schweiz zeigt 1999 einen zweigeteilten Gletscher Rothorn-Nordost mit Gletscherresten am Wall und dem Hauptteil im Süden der Rinderalpji. Im Jahr 2006 war der Teil am Wall bis auf wenige Reste am Jungpass abgeschmolzen und der Gletscher nur noch im Süden vorhanden.

## 6 Diskussion der Kartierlegenden

Ein Ziel dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung der Kartierlegende GMK 25 und GMK Hochgebirge hinsichtlich ihrer Eignung für großmaßstäbige Kartierungen (1:5.000 und 1:10.000) im Hochgebirge.

Die vier erstellten geomorphologischen Karten belegen, dass beide Kartiersysteme für großmaßstäbige Aufnahmen im Hochgebirge geeignet sind. In den folgenden Kapiteln sollen ihre Anwendbarkeit, Unterschiede und vorhandene Probleme abschließend diskutiert werden.

### 6.1 GMK 25

Die Kartierlegende GMK 25 eignet sich für Karten im Maßstab 1:5.000 und 1:10.000 im Hochgebirge.

Aufgrund des größeren Maßstabs braucht meiner Meinung nach nicht auf die von Fischer (1984) im Blatt Königsee vorgeschlagenen Vereinfachungen eingegangen werden (vgl. Kapitel 2.4.3.1). Dieser rät beispielsweise auf die Hangneigung, die sehr wichtig für die genaue Charakterisierung des Untersuchungsgebiets und zur Abschätzung von Prozessintensitäten ist, zu verzichten.

Trotz der insgesamt guten Anwendbarkeit traten besonders während der 1:5.000er Kartierung einige Probleme auf. Die angegebenen Basisbreiten in der GMK 25 Legende sind nicht eins zu eins übertragbar, sondern müssen dem Maßstab angepasst, also in dieser Anwendung verkleinert werden. Symbolische Darstellungen, z.B. die eines Schuttkegels können erst bei einer geringeren Größe verwendet werden. Einige Formen mussten vollständig auskartiert werden. Dazu bietet die Legende der GMK 25 beispielsweise mit den Stufensignaturen viele Möglichkeiten. Im Fall großer Hangschuttbereiche wurde zusätzlich eine einfache Liniensignatur eingeführt, welches explizit durch das Kartiersystem erlaubt ist. Insgesamt ist die große Flexibilität der Legende hervorzuheben, auch wenn diese im ersten Moment auch zu Verwirrungen führen kann. So werden beispielsweise Moränen je nach ihrer Geomorphometrie unterschiedlich dargestellt. Im Blatt Königsee werden sie durch eine Wölbungssignatur, bei Mani & Kienholz (1988) durch die Signatur für Wall und in meiner Kartierung des Rinderalpji-Gebiets größtenteils durch Stufensignaturen ausgewiesen.

Für die Identifikation bestimmter Formen wie Moränen oder Blockgletscher müssen beim Lesen der Karte die einzelnen Informationsschichten zu einem Gesamtbild

## 6 Diskussion der Kartierlegenden

zusammengefügt werden. Aus einer Stufe z.B. ergibt sich erst im Zusammenhang mit dem glazialen Prozessbereich und dem genetischen Substrattyp Geschiebe/Moräne die Information, dass es sich um eine stufenförmige Moräne handelt. Die geomorphometrische Darstellung einer Form ermöglicht meines Erachtens auch nach der Kartierung noch Interpretationsspielräume. Wie bereits im Ergebnisteil vorgestellt bestehen in der Rinderalpji Probleme in der Unterscheidung von Moräne und Blockgletscher. Die Darstellung als Stufe ist im ersten Moment neutral, erst die Zuordnung eines Prozessbereichs lenkt die Interpretation in eine bestimmte Richtung.

Die Zuordnung zu einem Prozessbereich gestaltet sich teilweise schwierig. Da dieser aber die wichtigste Informationsschicht in der GMK 25 ist und durch die farbige, flächenhafte Signatur sofort auffällt muss dieser gründlich ausgewählt werden. Oftmals fällt es schwierig, Grenzen zwischen bestimmten Prozessbereichen zu ziehen. Häufig sind Formen polygenetisch, wie beispielsweise die Moränen des Turtmanngletschers, die zwar glazial entstanden sind, aber durch lineare Erosion überformt wurden und werden. Zusätzlich stellt sich die Frage, nach welcher Zeitspanne oder ab welcher Intensität rezente Prozesse in den Prozessbereich übernommen werden. Reicht eine Solifluktuionslobe auf einer Moräne aus um sie einem glazial/kryogenen Prozessbereich zuzuordnen? Müsste ich die orographisch linke Seitenmoräne mit linearer Erosion und einer Rutschung nicht durch drei Prozessbereiche, glazial, denudativ und gravitativ, ausweisen?

Diese Fragen sind natürlich maßstabsabhängig. Bei einer 1:25.000 Kartierung können feinere Unterscheidungen nicht getroffen werden, bei einer 1:10.000er oder 1:5.000er Kartierung ist dies aber möglich. In meinen Karten habe ich zwei Prozessbereiche angegeben, wenn die Formen auch deutlich polygenetisch waren. Eine Prozessspur eines anderen Bereichs reicht aber nicht zu einer Zuordnung in den Prozessbereich aus. Aus diesem Grund habe ich auch an der orographisch linken Seitenmoräne des Turtmanngletschers, trotz der Rutschung, keinen gravitativen Bereich eingezeichnet. Ein Kartierer kann nicht objektiv sein, die Karten werden also stets eine Gewichtung haben, auch wenn die GMK 25 Legende „objektive“ Informationsschichten wie Hangneigung, Stufen und Wölbungen bietet.

Nicht sinnvoll sind meines Erachtens die genetischen Substrattypen in der GMK 25 Legende. Es reicht aus, dass beispielsweise Moränenmaterial durch die Kombination der Signatur für grobblockigen Schutt und dem glazialen Prozessbereich ausgewiesen

## 6 Diskussion der Kartierlegenden

wird. Die zusätzliche Information „Moränenmaterial“ ist dabei überflüssig, besonders da in der Signatur auch keine Korngrößen angegeben werden.

Schumm (1991) hat in seinem Buch „To interpret the earth: ten ways to be wrong“ zehn Probleme, mit denen Erdwissenschaftler zu kämpfen haben, aufgelistet. Davon sind drei bei der Kartierung im Gelände besonders zu berücksichtigen: Konvergenz, Divergenz und Multiplizität. Konvergenz bedeutet, dass verschiedene Prozesse zur gleichen Form führen, Divergenz weist auf die Möglichkeit hin, dass ein Prozess verschiedene Formen entstehen lassen kann und Multiplizität steht für die Möglichkeit, dass Formen durch mehrere Prozesse entstanden sind. Diese drei Problembereiche führen zu Unsicherheiten in der Interpretation von Systemen. Ich denke, dass auch erfahrene Kartierer auf diese Schwierigkeiten stoßen werden, weswegen es meiner Meinung nach gerechtfertigt ist eine Informationsschicht mit dem Thema „Unsicherheiten“ in die GMK Legende einzuführen. Somit wird sichtbar, wo noch weiterer Forschungsbedarf besteht. Diese Schicht ist besonders für digitale Karten geeignet, da dort einfach nach erfolgter Klärung bestimmter Probleme die Signatur gelöscht oder bei neuen Fragen eine neue erstellt werden kann. Analoge Karten dagegen können nur den Forschungsstand zur Zeit der Erstellung der Karten widerspiegeln.

Insgesamt bietet die GMK 25 umfassendere Informationen als die GMK Hochgebirge. Das macht sie aber auch komplizierter zu lesen. Geomorphologisches Hintergrundwissen ist häufig notwendig um den Inhalt zu verstehen. Karten, die mit der GMK 25 kartiert wurden, richten sich meiner Meinung nach an ein geomorphologisches Fachpublikum. Sie sind in ihrer Erstellung und Gestaltung sehr aufwendig und deswegen auch nicht geeignet in einer Publikation nur nebenbei zur Darstellung der Geomorphologie verwendet zu werden, wenn das eigentliche Thema ein anderes ist.

### 6.2 GMK Hochgebirge

Die GMK Hochgebirge ist eine Legende, die bisher weit weniger getestet und angewendet wurde als die GMK 25. Insgesamt ist auch bei dieser Legende zu sagen, dass sie bei großmaßstäbigen Kartierungen anwendbar ist.

Durch den Verzicht auf Farben wirkt die GMK Hochgebirge anders auf den Betrachter als die GMK 25. Unterschiede in der Genese und aktuelle Prozesse sind nicht

## 6 Diskussion der Kartierlegenden

auf den ersten Blick zu erkennen. Dafür existieren Signaturen, die die Form mit der Genese vereinen. Moränen und Blockgletscher werden durch eine jeweils eigene Signatur hervorgehoben. Sie können sofort als diese erkannt werden ohne dass eine synthetische Betrachtung der einzelnen Informationsschichten notwendig ist.

Die GMK Hochgebirge legt weniger Wert auf geomorphometrische Darstellungen. Stufen werden am Festgestein nicht kartiert und die bereits erwähnten Moränen und Gletscher besitzen eigene Signaturen. Dabei gehen die Informationen, welche Form z.B. die Moränen auszeichnen, verloren. Es kann nur festgestellt werden, dass diese vorhanden sind. Dadurch kann die Kartierung subjektiver werden. Es muss sich beispielsweise für einen Blockgletscher oder eine Moräne als Signatur entschieden werden, was nachträgliche, vielleicht andersartige Interpretationen erschwert.

Die Hangneigung soll laut Kneisel et al. (1998) aus den Höhenlinien abgelesen werden und ist in der GMK Hochgebirge nicht als eigene Informationsschicht vorgesehen. Meiner Meinung nach kann diese jedoch in die 1:5.000er Kartierung problemlos eingefügt werden, eine Aufnahme in die 1:10.000er Karte ist ebenfalls möglich. Besonders für die Abschätzung von Prozessintensitäten liefert die Neigung wichtige Anhaltspunkte.

Neben der Neigung kann die Darstellung auch durch die Nutzung eines Hillshades als Kartengrundlage verbessert werden. Die Karten des Rinderalpji-Gebietes wirken dadurch plastischer. Im Turtmangletschervorfeld führt ein Hillshade nicht zur Verbesserung der Darstellung, da dieses zum einen aus Daten von 2001, die den Gletscher weiter nördlich zeigen, stammt, und zum anderen Probleme mit den Grauwerten der Signaturen existieren, die sich durch das Grau des Hillshades nicht überall genügend abheben. Dies zeigt, dass heutige technische Möglichkeiten zu einer Verbesserung des Kartenbildes führen können aber nicht zwangsläufig müssen. Über die Nutzung eines Hillshades als zusätzliche Kartengrundlage muss von Fall zu Fall entschieden werden.

Eine zusätzliche flächendeckende Darstellung des Substrats in Graustufen ist schwierig und kann in einer analogen 1:10.000 GMK Hochgebirge Karte kaum realisiert werden. In einem 1:5.000er Maßstab könnte diese Information, wenn noch genügend Zeichenplatz vorhanden ist, jedoch dargestellt werden. Dafür wäre dann aber ein Verzicht auf ein Hillshade und eventuell auf die topographische Karte notwendig. Die stark vergrößerte topographische Karte im Rinderalpji-Gebiet ist ohnehin nicht

## 6 Diskussion der Kartierlegenden

sehr informativ und könnte durch errechnete Höhenlinien und die Informationsschicht Substrat ersetzt werden.

Besonders bei der GMK Hochgebirge in der Karte des Turtmanngletschervorfelds, teilweise aber auch bei der GMK 25, dürfen die Signaturen nicht alle in schwarz dargestellt werden. Sie sollten verschiedene Graustufen aufweisen. Nur so können dicht beieinander liegende Zeichen unterschieden werden.

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt ist die Existenz einer Informationsschicht „Unsicherheiten“ sinnvoll. Da es sich nur um einzelne Punktsignaturen handelt kann diese leicht in die Karte integriert werden. Auch eine Darstellung in Graustufen ist problemlos möglich.

Das Ziel der GMK Hochgebirge ist vor allem die Einsparung von Kosten für Farbdrucke und die leichtere Publizierbarkeit. Durch den Verzicht auf verschiedene Informationsschichten können geomorphologische Karten mit dieser Legende schneller hergestellt werden, was ebenfalls häufig eine große Rolle spielt. Je nach Maßstab und der Fragestellung sollten jedoch zusätzliche Informationsschichten wie Hangneigung und Substrat hinzugezogen werden. Wenn eine Karte als digitales Produkt veröffentlicht werden soll, sollten auf jeden Fall alle Schichten der GMK 25 vorhanden sein, für eine analoge Karte ist die Kartierlegende GMK Hochgebirge durchaus sinnvoll. Die GMK Hochgebirge zielt meines Erachtens eher auf ein breites Fachpublikum ab, da sie einfacher aufgebaut und dadurch leichter verständlich ist.

## 7 Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit der analogen und digitalen geomorphologischen Kartographie im Hochgebirge. Es wurde geprüft, ob die Kartierlegenden GMK 25 und GMK Hochgebirge (vgl. Kapitel 2.4) sowohl für Kartierungen im Maßstab 1:5.000 und 1:10.000 als auch für Kartierungen im Hochgebirge, also Gebieten die besonders durch große Reliefunterschieden auf kleinem Raum und steile Hänge gekennzeichnet sind (vgl. Kapitel 2.1), geeignet sind. Der analogen Kartierung von zwei Untersuchungsgebieten im Turtmantal und Matteredtal folgte eine digitale Aufbereitung der Daten am Computer in ArcGIS. Dabei stand nicht nur die Überprüfung der Legenden im Vordergrund, sondern auch die geomorphologischen Eigenschaften und Entwicklungen der Untersuchungsgebiete.

Zum ersten Kartiergebiet, dem Turtmanngletschervorfeld, ist zusammenfassend zu sagen, dass ein ausgeprägter glazialer Formenschatz vorhanden ist, der aber heute durch nicht-glaziale Prozesse verändert wird. Neben den in der Kartierlegende vorgegebenen Signaturen wurden Gletscherstände seit 1850 zur Entwicklung des Turtmanngletschers eingezeichnet, der von 1850 bis 2005 1284m an Länge verloren hat. Ausgeprägte Moränen zeigen den 1850er Stand des Gletschers, weitere Moränen kennzeichnen Vorstöße zwischen 1920 und 1930 und von 1970 bis in die 1990er. Besonders die 1850er Moränen werden heute durch lineare und periglaziale Prozesse abgetragen und modifiziert. Die umliegenden Hänge sind durch gravitative und denudative Prozesse geprägt und beeinflussen das Gletschervorfeld durch den Zufluss von Wasser und durch Materialakkumulationen durch Muren, Lawinen und Stein Schlag.

Nicht nur der Gletscher selber schmilzt seit den letzten Jahren stark ab, sondern auch das Toteis, welches an einigen Stellen vorhanden ist. Dazu leistet auch der Brunneggbach einen Beitrag, der Teile davon erodiert. Obwohl das Turtmantal insgesamt vergleichsweise wenig anthropogene Einflüsse aufweist, zeigt das Gletschervorfeld deutlich menschliche Eingriffe. Dazu gehören Staudamm, Sedimentfalle, Aufschüttungen aus Material aus der Sedimentfalle, Infrastruktur, aber auch Wanderwege und die Turtmannhütte.

Zusammenfassend ist zum zweiten Untersuchungsgebiet, der Rinderalpji im Matteredtal festzustellen, dass es sich um ein Gebiet mit einer ausgeprägten Form- und Pro-

## 7 Zusammenfassung

zessvielfalt auf einer kleinen Raumskala im Hochgebirge handelt. Das Kartiergebiet weist große Höhenunterschiede und Hangneigungen auf, die typisch für ein Hochgebirgsrelief sind. Einige der vorhandenen Prozesse, wie das plastische Fließen der Blockgletscher oder Solifluktion, laufen vergleichsweise langsam ab. Neben diesen eher statischen Bereichen existieren auch Sektoren die sich sehr stark verändert haben. Dazu gehören das Abtauen des Rothorn-Nordostgletschers und die Bildung des Sees durch abschmelzendes Toteis. Prozesse wie Steinschlag und lineare Erosion laufen ebenfalls in kürzerer Zeit ab und verändern das Gebiet, wenn auch nicht so prägend wie die zuvor dargestellten Prozesse.

Trotz zahlreicher Kartiertage im Gebiet und der intensiven Beschäftigung mit diesem bei der Herstellung der Karte, existieren noch Unsicherheiten. Diese beziehen sich besonders auf die Unterscheidung zwischen Moräne und Blockgletscher, der Entstehung der älteren Moränen und des glaziofluvial geprägten Bereichs.

Anhand der Kartierungen in den beiden Untersuchungsgebieten konnte festgestellt werden, dass sich beide Kartierlegenden für großmaßstäbige Kartierungen im Hochgebirge eignen. Auch die Erstellung der digitalen Karten im GIS war ohne größere Einschränkungen möglich.

Die GMK 25 ist gut für großmaßstäbige Kartierungen geeignet, da sie aus einem flexiblen Konzept besteht. Geformen können geomorphometrisch aufgelöst und so beschrieben werden. Durch die Vergrößerung des Maßstabs im Gegensatz zum eigentlichen Zielmaßstab von 1:25.000 ist mehr Zeichenplatz vorhanden, so dass auch die Informationsschicht Hangneigung trotz großer Reliefunterschiede dargestellt werden kann. Neben den Vorteilen eines größeren Maßstabs treten auch Probleme auf. Sachverhalte, die normalerweise durch die GMK 25 Legende symbolisch dargestellt wurden, können vollständig kartiert werden. Dazu müssen jedoch neue Signaturen erstellt werden. Schwierigkeiten traten zusätzlich bei der Ausweisung der Prozessbereiche auf, die mit den Prozessen die wichtigste Informationsschicht darstellen. Eine klare Grenzziehung zwischen den Bereichen ist oftmals kaum möglich, zusätzlich erschweren polygenetische Formen die Zuordnung.

Die GMK Hochgebirge, die wie der Name sagt, für das Hochgebirge entwickelt wurde, ist ebenfalls für großmaßstäbige Kartierungen geeignet. Ziel dieser Karte ist eher die geomorphologische Illustration eines Gebietes für eine Publikation als eine vollständige geomorphologische Darstellung. Durch den Verzicht auf die Prozessberei-

## 7 Zusammenfassung

che (und damit auch auf farbige Darstellungen) und die Hangneigung wirkt vor allem die 1:5.000er Kartierung teilweise leer. Die Hangneigung kann einfach eingefügt werden, auch ein Hillshade als Untergrund kann zur Verbesserung des Kartenbildes führen. Geomorphometrische Darstellungen rücken bei der GMK Hochgebirge in den Hintergrund, da mehr synthetische Signaturen, die sowohl die Genese als auch die Form zeigen, vorhanden sind. So werden Blockgletscher und Moränen nicht durch Stufensignaturen, sondern durch eigene Symbole ausgewiesen. Dies erscheint im ersten Moment sinnvoll, doch erschwert eine nachträgliche Interpretation bei Unklarheiten.

Beide Legenden wurden, um zu zeigen wo in den Kartiergebieten noch Klärungs- und Forschungsbedarf besteht, durch die Informationsschicht „Unsicherheiten“ erweitert. Durch Formendivergenz, -konvergenz und polygenetische Einflüsse können Formen teilweise einem bestimmten Prozess nicht eindeutig zugeordnet werden, was nun hervorgehoben werden kann. Die erstellten Karten werden durch die neue Informationsschicht „ehrlicher“ und können leichter zur Diskussion gestellt werden.

## 8 Ausblick

Für die geomorphologische Kartographie ist es für die Zukunft wichtig, dass neue digitale Möglichkeiten diskutiert und genutzt werden um Karten besser gestalten und Vermarkten zu können. Der Aufbau der deutschen Kartierlegenden bietet dazu Möglichkeiten.

Die Gründung der „Working Group on Applied Geomorphological Mapping“ auf internationaler Ebene ist hilfreich um die geomorphologische Kartographie wieder in den Fokus der Forschung zu rücken und auch zu modernisieren. Deutsche Geomorphologen müssen sich dort engagieren und Möglichkeiten finden, die Karten auch für Nicht-Geomorphologen lesbar und verwendbar zu gestalten.

Das Rinderalpji-Gebiet ist ein Untersuchungsgebiet in dem noch einige Fragen offen sind, die im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht geklärt werden konnten. Interessant wären Bewegungsmessungen, um periglaziales Kriechen und damit Blockgletscher zu identifizieren. Wichtig wären auch Untersuchungen im weiteren Umfeld des Gebietes um festzustellen, wie beispielsweise der Junggletscher die Rinderalpji beeinflusst hat, und ob eventuell noch kleinere Gletscher existiert haben. Aufschlussreich würde ebenfalls eine weitere Beobachtung des oberen, neu entstandenen Sees und der Moräne sein. Vergrößert sich der See oder handelt es sich um einen periodischen See, der im Herbst austrocknet und im Frühjahr durch Schnee-, Gletscher- und Toteisschmelze wieder aufgefüllt wird? Kommt es zu einer Verfüllung durch hereinrutschendes Moränenmaterial?

Die Karte des Turtmanngletschervorfelds könnte in das WebGIS des Turtmantals eingefügt werden und so die Möglichkeit bieten beim Vergrößern der Karte von 1:25.000 auf 1:10.000 auch mehr Informationen zu erhalten. Bisher werden keine detaillierteren Informationen beim Vergrößern geboten.

## **Kartenverzeichnis**

- Barsch, D., Fränze, O., Leser, H., Liedtke, H. & G. Stäblein (Hrsg.) (1984): Geomorphologische Karte 1:25.000 der Bundesrepublik Deutschland, GMK 25 Blatt 16, 8443 Königsee, Aufnahme, K. Fischer 1977-1982.
- Bundesamt für Landestopographie (2002): Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blatt St. Niklaus 1308 (Stand 1999).
- Bundesamt für Landestopographie (1992): Landeskarte der Schweiz 1:25.000, Blatt Vissoie 1307 (Stand 1992).
- Bundesamt für Landestopographie (2004): Vector25, digitales Landschaftsmodell der Schweiz 1:25.000, Blatt St. Niklaus 1308 & Blatt Vissoie 1307 (Stand 1998 & 1999).
- Bundesamt für Landestopographie (1986): Digitale Landeskarte der Schweiz, Pixelkarte 1:25.000, Blatt St. Niklaus 1308 & Blatt Vissoie 1307 (Stand 1992).
- Bundesamt für Landestopographie (2003): Topographische Karte der Schweiz 1:100.000/Dufourkarte, CD-ROM, historische Karte (Stand 1832-1864).
- Bundesamt für Wasser und Geologie (2001): Geologischer Atlas der Schweiz, Pixelkarte Atlasblatt 71, 1308 St. Niklaus, geologische Aufnahmen von P. Bearth 1978.
- Eidgenössische Landestopographie (1927): Topographischer Atlas der Schweiz 1:50.000, Blatt Visperthal, Bern.
- Tscherrig, A. (1965): Karte der Gletscherstände des Turtmanngletschers 1850-1964. Unveröffentlichte Karte der Forstbehörde Oberems, Wallis, Schweiz.

## Literaturverzeichnis

- Ahnert, F. (1994): Equilibrium, scale and inheritance in geomorphology. In: *Geomorphology* 11, S. 125-140.
- Ahnert, F. (1996): Einführung in die Geomorphologie. Stuttgart.
- AppGeMa, IAG - Working Group on Applied Geomorphological Mapping (2006), <http://www.geomorph.org/wg/wgagm.html>, 11.03.2007, Website.
- Bak, P. (1996): How nature works: the science of self-organized criticality. Oxford, Melbourne, Tokio.
- Ballantyne, C. K. (2002): Paraglacial geomorphology. In: *Quaternary Science Reviews* 21, S. 1935-2017.
- Ballantyne, C. K. (2005): Paraglacial Landsystems. In: Evans, D. J. A. (Hrsg.): *Glacial Landsystems*, S. 432-461, London.
- Barsch, D. (1976): Das GMK-Schwerpunktprogramm der DFG: Geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik. In: *Zeitschrift für Geomorphologie* 20 (4), S. 488-498.
- Barsch, D. (1987): Schlußbericht zum Schwerpunktprogramm Geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland (GMK - Schwerpunktprogramm). In: *Heidelberger Geographische Bausteine* 4.
- Barsch, D. (1988): Rockglaciers. In: Clark, M. J. (Hrsg.): *Advances in periglacial geomorphology*, S. 69-90, Chichester.
- Barsch, D. (1996): Rockglaciers. Indicators for the present and former geoecology in high mountain environments. Heidelberg.
- Barsch, D. & Caine, N. (1984): The nature of mountain geomorphology. In: *Mountain Research & Development* 4 (4), S. 287-298.
- Barsch, D. & Dikau, R. (1989): Entwicklung einer Digitalen Geomorphologischen Basiskarte. In: *Geo-Informationssysteme* 3 (2), S. 12-18.
- Barsch, D.; Fischer, K. & Stäblein, G. (1987): Geomorphological mapping of the high mountain relief, Federal Republic of Germany (with geomorphology map Königsee, scale 1:25.000). In: *Mountain Research & Development* 7 (4), S. 361-374.
- Barsch, D. & Mäusbacher, R. (1980): Auszugs- und Auswertungskarten als mögliche nutzungsorientierte Interpretation der Geomorphologischen Karte 1:25 000 (GMK 25). In: *Berliner Geographische Abhandlungen* 31, S. 31-48.
- Bearth, P. (1980): *Geologischer Atlas der Schweiz 1: 25.000. Erläuterungen zum Atlasblatt 71 (1308 St. Niklaus)*
- Benn, D. I. & Evans, D. J. A. (1998): *Glaciers and Glaciation*. London.
- Benn, D. I.; Kirkbride, M. P.; Owen, L. A. & Brazier, V. (2005): Glaciated Valley Systems. In: Evans, D. J. A. (Hrsg.): *Glacial Landsystems*, S. 372-406, London.
- Bertin, J. (1974): *Graphische Semiologie*. Berlin.
- Board, C. (1992): Report of the working group on cartographic definitions. In: *Cartographica* 29 (1), S. 54-57.
- Boulton, G. S. & Eyles, N. (1979): Sedimentation by valley glaciers: a model and genetic classification. In: Schluchter, C. (Hrsg.): *Moraines and Varves*, Rotterdam.

- Buckley, A.; Hurni, L.; Kriz, K.; Patterson, T. & Olsenholler, J. (2004): Cartography and visualization in mountain geomorphology. In: Bishop, M. & Shroder Jr., J. (Hrsg.): *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*, S. 253-288, Berlin.
- Chamberlin, T. C. (1890): The method of multiple working hypotheses. In: *Science* 15, S. 92-96.
- Chorley, R. J. & Kennedy, B. A. (1971): *Physical Geography: A systems approach*. London.
- Church, M. & Ryder, J. M. (1972): Paraglacial Sedimentation: A Consideration of Fluvial Processes Conditioned by Glaciation. In: *Geological Society of America Bulletin* 83, S. 3059-3072.
- Cleland, C. E. (2001): Historical science, experimental science, and the scientific method. In: *Geology* 29 (11), S. 987-990.
- Cooke, R. U. & Doornkamp, J. C. (1990): *Geomorphology in Environmental Management*. Oxford.
- Crone, G. R. (1962): *Maps and their makers: an introduction to the history of cartography*. London.
- Demek, J. (1971): *Manual of detailed geomorphological mapping*. Brno.
- Demek, J. & Embleton, C. (1978): *Guide to Medium - Scale Geomorphological Mapping*. Stuttgart.
- Denneler, B. & Maisch, M. (1995): Gletscher und Gletscherschwund im Mattertal (Südliche Walliser Alpen). In: *Bulletin de la Murithienne* 113, S. 147-171.
- Dikau, R. (2006): Oberflächenprozesse - ein altes oder ein neues Thema. In: *Geographica Helvetica* 61 (3), S. 170-180.
- Dikau, R.; Gärtner, H.; Holl, B.; Kienholz, H. & Mani, P. (1996): Untersuchung zur Murgangaktivität im Mattertal, Wallis, Schweiz. Internationales Symposium Interpravent, Tagungspublikation, Bd. 1, Garmisch-Partenkirchen.
- Dikau, R.; Gärtner, H.; Nyenhuis, M.; Otto, J. C.; Roer, I. & Sahling, I. (2007): Potenziale neuer Methoden zur Detektion von Reliefformen und der Kinematik der Erdoberfläche. In: *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement* 148, S. 116-125.
- Dikau, R.; Hörsch, B.; Nyenhuis, M.; Otto, J. -C.; Rasemann, S. & Roer, I. (2004): *Geomorphologische Forschung im Turtmantal*. Geographisches Institut Universität Bonn.
- Ebhardt, E.; Stead, D. & Coggan, J. S. (2004): Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes - the 1991 Randa rockslide. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41 (1), S. 69-87.
- Eybergen, F. A. (1986): Glacier snout dynamics and contemporary push moraine formation at the Turtmannglacier, Switzerland. INQUA Symposium on Genesis & Lithology of Glacial Deposits, Amsterdam.
- Eyles, N. (1983): *Glacial geology. An introduction for Engineers and Earth Scientists*. Oxford.
- Fischer, K. (1984): *Erläuterungen zur geomorphologischen Karte 1:25.000 der Bundesrepublik Deutschland*. - GMK 25, Blatt 16, 8443 Königssee. Berlin.
- French, H. M. (1996): *The Periglacial Environment*. Harlow Essex.

- Gehne, H. (1912): Geomorphologische Karte der Umgebung von Thale nach einer neuen Methode auf Grund eigener Beobachtungen dargestellt. In: Mitteilungen des Sächsisch-thüringischen Vereins für Erdkunde Halle a. S. 36, S. 1-8.
- Grimm, F.; Haase, G.; Kugler, H.; Lauckner, M. & Richter, H. (1964): Empfehlungen für den Inhalt und die Bearbeitung einer Geomorphologischen Grundkarte im Maßstab 1:10:000. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 108, S. 150-157.
- Gruber, S. & Hoelzle, M. (2001): Statistical Modelling of Mountain Permafrost Distribution: Local Calibration and Incorporation of Remotely Sensed Data. In: Permafrost and Periglacial Processes 12, S. 69-77.
- Gruber, S.; Hoelzle, M. & Haeberli, W. (2004): Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003. In: Geophysical Research Letters 31 (L13504).
- Gruber, S.; King, L.; Kohl, T.; Herz, T.; Haeberli, W. & Hoelzle, M. (2004): Interpretation of geothermal profiles perturbed by topography: the alpine Permafrost boreholes at Stockhorn Plateau, Switzerland. In: Permafrost and Periglacial Processes 15 (4), S. 349-357.
- Gustavsson, M. (2006): Development of a Detailed Geomorphological Mapping System and GIS Geodatabase in Sweden. Department of Earth Sciences, University of Uppsala, Dissertation.
- Gustavsson, M.; Kolstrup, E. & Seijmonsbergen, A. C. (2006): A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. In: Geomorphology 77 (1-2), S. 90-111.
- Harley, J. B. (1989a): Historical geography and the cartographic illusion. In: Journal of Historical Geography 15 (1), S. 80-91.
- Harley, J. B. (1989b): Deconstructing the map. In: Cartographica 26 (2), S. 1-20.
- Harrison, S. (2005): What kind of Science is Physical Geography? In: Castree, N.; Rogers, A. & Sherman, D. (Hrsg.): Questioning Geography, S. 80-95, Malden, Oxford, Carlton.
- Herz, T. (2006): Das Mikroklima grobblockiger Schutthalden der alpinen Periglazialstufe und seine Auswirkungen auf Energieaustauschprozesse zwischen Atmosphäre und Lithosphäre. Institut für Geographie, Universität Gießen, Dissertation.
- Holling, C. S. (1973): Resilience and stability of ecological systems. In: Annual Review of Ecology and Systematics 4, S. 1-23.
- Hörsch, B. (2003): Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief in alpinen Einzugsgebieten des Wallis (Schweiz). Ein multiskaliger GIS- und Fernerkundungsansatz. In: Bonner Geographische Abhandlungen 110.
- Inkpen, R. (2005): Science, Philosophy and Physical Geography. Oxon, New York.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science basis. Summary for Policymakers. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch), 11.03.2007
- Jentsch, C. & Liedtke, H. (1980): Höhengrenzen in Hochgebirgen. Einleitende Bemerkungen zum Rundgespräch. In: Jentsch, C. & Liedtke, H. (Hrsg.): Höhengrenzen in Hochgebirgen. Arbeiten aus dem Geographischen Institut der Universität des Saarlandes. 29, S. 29-33.

- King, L. (1990): Soil and rock temperatures in discontinuous permafrost: Gornergrat and Unterrothorn, Wallis, Swiss Alps. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 1 (2), S. 177-188.
- King, L. (1996): Dauerfrostboden im Gebiet Zermatt - Gornergrat - Stockhorn: Verbreitung und permafrostbezogene Erschließungsarbeiten. In: *Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Suppl.*-Bd. 104, S. 73-93.
- Klimaszewski, M. (1990): Thirty years of detailed geomorphological mapping. In: *Geographia Polonica* 58, S. 11-18.
- Kneisel, C.; Lehmkühl, F.; Winkler, S.; Tressel, E. & Schröder, H. (1998): Legende für geomorphologische Kartierungen im Hochgebirge (GMK Hochgebirge). In: *Trierer Geographische Studien* 18.
- Kneisel, C. & Tressel, E. (2000): Zur Anwendung der neuen GMK Hochgebirge mit einer Beispielkartierung aus den Ostschweizer Alpen. In: *Trierer Geographische Studien* 23, S. 113-122.
- König, Olav (2006): Korngrößenmuster auf Oberflächen alpiner Sedimentspeicher. Geographisches Institut, Universität Bonn, Diplomarbeit.
- Kraak, M.-J. & Ormeling, F. (2003): *Cartography. Visualization of Geospatial Data.* Harlow Essex.
- Krautblatter, M. & Hauck, C. (submitted): Electrical resistivity tomography monitoring of permafrost in solid rockwalls. In: *Journal of Geophysical Research*.
- Kugler, H. (1964): Die geomorphologische Reliefanalyse als Grundlage großmaßstäbiger geomorphologischer Kartierungen. In: *Wissenschaftliche Veröffentlichungen des Deutschen Instituts für Länderkunde* 21/22, S. 541-655.
- Kugler, H. (1965): Aufgaben, Grundsätze und methodische Wege für großmaßstäbiges geomorphologisches Kartieren. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen* 109, S. 241-257.
- Labhardt, T. P. (2001): *Geologie der Schweiz.* Thun.
- Lane, S. N. & Richards, K. S. (1997): Linking river channel form and process: Time, space and causality revisited. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 22 (3), S. 249-260.
- Leser, H. (1977): *Feld- und Labormethoden der Geomorphologie.* Berlin.
- Leser, H. (1982): Legendenentwicklung und Arbeitsvorschrift für die GMK 25. In: *Berliner Geographische Abhandlungen* 35, S. 31-42.
- Leser, H. (2001): *Wörterbuch Allgemeine Geographie.* München, Braunschweig.
- Leser, H. & Schaub, D. (1987): Geomorphologische Kartierung im Hochgebirge: Ein Anwendungsbeispiel der "Grünen Legende" im Maßstab 1:10 000. In: *Berliner Geographische Abhandlungen* 42, S. 31-37.
- Leser, H. & Stäblein, G. (1975): Geomorphologische Kartierung. Richtlinien zur Herstellung geomorphologischer Karten 1:25 000, *Berliner Geographische Abhandlungen, Sonderheft.* Berlin.
- Leser, H. & Stäblein, G. (1980): Legende der Geomorphologischen Karte 1:25 000 (GMK 25) - 3. Fassung im GMK-Schwerpunktprogramm - In: *Berliner Geographische Abhandlungen* 31, S. 91-100.
- Leser, H. & Zollinger, G. (1987): Die Anwendung der "Grünen Legende" im Maßstab 1:5000. Probleme der größtmaßstäbigen geomorphologischen Kartie-

- rung - dargestellt am Beispiel eines Kartenausschnitts vom Badischen Oberrheingrabensrand. In: Berliner Geographische Abhandlungen 42, S. 5-15.
- Löwner, M. O. (2005): Semantische Modellierung von geomorphologischen Objekten in einem Geoinformationssystem (GIS) unter besonderer Berücksichtigung von Wänden und steilen Hangbereichen. Geographisches Institut, Universität Bonn, Dissertation.
- MacEachren, A. M. (1994): Visualization in modern cartography. Oxford.
- Maisch, M.; Wipf, A.; Denzler, B.; Battaglia, J. & Benz, C. (2000): Die Gletscher der Schweizer Alpen. Schlussbericht NFP 31. Zürich.
- Mani, P. & Kienholz, H. (1988): Geomorphogenese im Gasterntal unter besonderer Berücksichtigung neuzeitlicher Gletscherschwankungen. In: Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Suppl.-Bd. 70, S. 95-112.
- Matsuoka, N.; Ikeda, A. & Date, T. (2005): Morphometric analysis of solifluction lobes and rock glaciers in the Swiss Alps. In: Permafrost and Periglacial Processes 16, S. 99-113.
- Nyenhuis, M. (2005): Permafrost und Sedimenthaushalt in einem alpinen Geosystem. Geographisches Institut, Universität Bonn, Dissertation.
- Nyenhuis, M.; Hölzle, M. & Dikau, R. (2005): Rock glacier mapping and permafrost distribution modelling in the Turtmanntal, Valais, Switzerland. In: Zeitschrift für Geomorphologie 49 (3), S. 275-292.
- Orford, S. (2005): Cartography and Visualization. In: Castree, N.; Rogers, A. & Sherman, D. (Hrsg.): Questioning Geography, S. 189-205, Malden, Oxford, Carlton.
- Otto, J.-C. (2001): Das geomorphologische System des Turtmanntals. Geographisches Institut, Universität Bonn, Diplomarbeit.
- Otto, J.-C. (2006): Paraglacial sediment storage quantification in the Turtmann Valley, Swiss Alps. Geographisches Institut, Universität Bonn, Dissertation.
- Otto, J.-C. & Dikau, R. (2004): Geomorphologic system analysis of a high mountain valley in the Swiss Alps. In: Zeitschrift für Geomorphologie 48 (3), S. 323-341.
- Otto, J.-C.; Kleinod, K.; König, O.; Krautblatter, M.; Nyenhuis, M.; Roer, I.; Schneider, M.; Schreiner, B. & Dikau, R. (accepted): HRSC-A data: a new high-resolution data set with multi-purpose applications in physical geography. In: Progress in Physical Geography.
- Passarge, S. (1914): Morphologischer Atlas Lieferung I: Morphologie des Messtischblattes Stadtrema. In: Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in Hamburg 28.
- Pfeffer, G. (2000): Untersuchungen zur Permafrostverbreitung mit geophysikalischen Methoden im Turtmanntal/Wallis. Geographisches Institut, Universität Bonn, Diplomarbeit.
- Phillips, J. D. (1992): The end of equilibrium? In: Geomorphology 5, S. 195-201.
- Phillips, J. D. (2003): Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems. In: Progress in Physical Geography 27 (1), S. 1-23.
- Rasemann, S. (2004): Geomorphometrische Struktur eines mesoskaligen alpinen Geosystems, Bonner Geographische Abhandlungen 111.

- Rebetez, M. (1997): Climatic change and debris flows in high mountain regions: the case study of the Ritigraben torrent (Swiss Alps). In: *Climatic Change* 36, S. 371-389.
- Richards, A. (2002): Complexity in Physical Geography. In: *Geography* 87 (2), S. 99-107.
- Richter, H. (1962): Eine neue Methode der großmaßstäbigen Kartierung des Reliefs. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen* 106, S. 309-312.
- Roer, I. (2005): Rockglacier kinematics in a high mountain geosystem. Geographisches Institut, Universität Bonn, Dissertation.
- Roer, I.; Kääb, A. & Dikau, R. (2005): Rockglacier kinematics derived from small-scale aerial photography and digital airborne pushbroom imagery. In: *Zeitschrift für Geomorphologie* 49 (1), S. 73-87.
- Sartori, M.; Baillifard, F.; Jaboyedoff, M. & Rouiller, J.-D. (2003): Kinematics of the 1991 Randa rockslides (Valais, Switzerland). In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, S. 423-433.
- Sass, O. (2005): Spatial patterns of rockfall intensity in the northern Alps. In: *Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Suppl.-Bd.* 138, S. 51-65.
- Schär, C.; Vidale, P.L.; Lüthi, D.; Frei, C.; Haeberli, C.; Liniger, M. A. & Appenzeller, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. In: *Nature* 427, S. 332-336.
- Schumm, S. A. (1991): *To interpret the earth: ten ways to be wrong*. Cambridge.
- Spönemann, J. & Lehmeier, F. (1989): Geomorphologische Kartographie in der Bundesrepublik Deutschland: Normung und Weiterentwicklung. In: *Erdkunde* 43 (2), S. 77-85.
- Stahr, A. & Hartmann, T. (1999): *Landschaftsformen und Landschaftselemente im Hochgebirge*. Heidelberg.
- Strahler, A. N. (1958): Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. In: *Bulletin of the Geological Society of America* 69, S. 279-300.
- Thornes, J. B. (2003): Time: Change and stability in environmental systems. In: Holloway, S.; Rice, S. & Valentine, G. (Hrsg.): *Key concepts in Geography*, S. 131-150, London.
- Troll, C. (1966): Über das Wesen der Hochgebirgsnatur. In: Troll, C. (Hrsg.): *Ökologische Landschaftsforschung und vergleichende Hochgebirgsforschung*. *Erdkundliches Wissen* 11, S. 127-151.
- Tscherrig, A. (1965): Karte der Gletscherstände des Turtmanngletschers 1850-1964. Unveröffentlichte Karte der Forstbehörde Oberems, Wallis, Schweiz.
- Van Tantenhoove, F. & Dikau, R. (1990): Past and Present Permafrost Distribution in the Turtmantal, Wallis, Swiss Alps. In: *Arctic and Alpine Research* 22 (3), S. 301-316.
- VAW (1881-2005): "Die Gletscher der Schweizer Alpen", *Jahrbücher der Glaziologischen Kommission der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) No. 1-122*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. Zürich.
- Vinken, R. (1985): Digitale Geowissenschaftliche Kartenwerke - ein Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft. In: *Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen* 95, S. 163-173.

- Vitek, J. D.; Giardino, J. R. & Fitzgerald, J. W. (1996): Mapping geomorphology: A journey from paper maps, through computer mapping to GIS and Virtual Reality. In: *Geomorphology* 16 (3), S. 233-249.
- Von Bertalanffy, L. (1951): An outline of general system theory. In: *British Journal for the Philosophy of Science* 1, S. 124-165.
- Von Elverfeldt, K. (2001): Analyse der Blockgletscher Kinematik im Turtmantal (Wallis, Schweiz) mittels digitaler Photogrammetrie. Geographisches Institut, Universität Bonn, Diplomarbeit.
- Von Lozinski, W. (1912): Die periglaziale Fazies der mechanischen Verwitterung. *Comptes Rendues, XI Congrès International de Géologie*, S. 1039-1053, Stockholm.
- Wilhelmy, H. (1990): *Kartographie in Stichworten*. Unterägeri.
- Wolff, I. (2006): Spätglaziale und holozäne Gletscherstände im Turtmantal, Wallis, Schweiz. Geographisches Institut, Universität Bonn, Diplomarbeit.