

MORPHOLOGIE, ENTWICKLUNG UND ARCHÄOLOGISCHES POTENZIAL DES THEODULGLETSCHERS: GESTERN, HEUTE UND MORGEN

GEOGRAFISCHE LAGE

Der Theodulgletscher gehört zum System des Gornergletschers, das mit einer Fläche von 54 km² das zweitgrösste (nach dem Aletschgletscher) und mit einer Länge von 13,4 km das drittlängste (nach dem Aletsch- und dem Fieschergletscher) Gletschersystem im Alpengebiet darstellt.¹ Das Gornergletschersystem besteht aus sieben Teilgletschern. Von Westen nach Osten sind dies der Obere Theodul-, der Untere Theodul-, der Triftji-, der Breithorn-, der Schwärze-, der Zwilling-, der Grenz- und der namensgebende Gornergletscher (Abb. 14). Der Theodulgletscher fliesst von der Westflanke des Breithorns (4164 m ü.M.) ab und teilt sich anschliessend in zwei verschiedene Zungen: den Oberen und den Unteren Theodulgletscher. Während der Kleinen Eiszeit war der Untere Theodulgletscher mit dem viel grösseren Gornergletscher verbunden. Heute laufen die zwei Gletscherzungen getrennt voneinander aus (Abb. 15), wobei der Obere Theodulgletscher das Plateau Rosa bedeckt, ein mit Transportanlagen gut erschlossenes und beliebtes Skigebiet.

Während des letzten Gletscherhochstands um 1850 reichte der Theodulgletscher auf der Südseite des Theodulpasses bis zum Lago Goillet bei Breuil Cervinia hinunter, welcher 2 km vom Pass entfernt liegt. Südlich des Passes ist der Gletscher heute völlig abgeschmolzen.

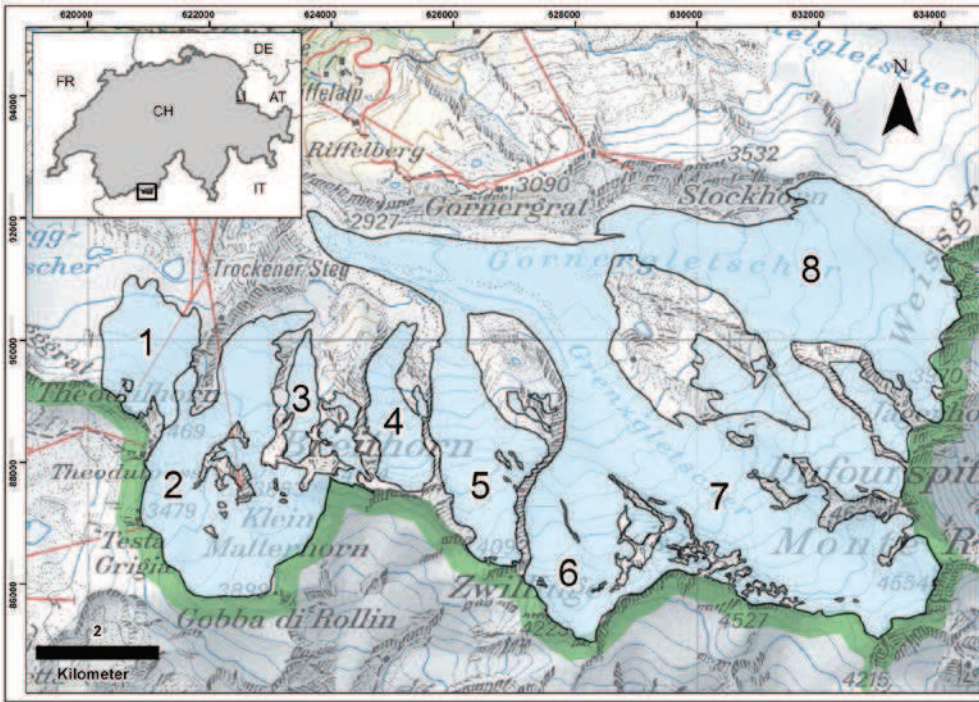
HOLOZÄNE GLETSCHERSCHWANKUNGEN IN DEN SCHWEIZER ALPEN

Der Rückzug der Gletscher in die Alpentäler am Ende der letzten Eiszeit vor etwa 11 500 Jahren läutete das Holozän ein. Dendro- und Radiokarbondatierungen von fossilen Böden und Bäumen, welche während einer Vorstossphase der Gletscher umgedrückt und überdeckt wurden und heute unter dem abschmelzenden Eis wieder zum Vorschein kommen, deuten auf zwölf holozäne Gletscherschwundphasen hin,² während deren die Gletscher teilweise etwas kürzer waren als heute. Diese Resultate weisen auf ein in-

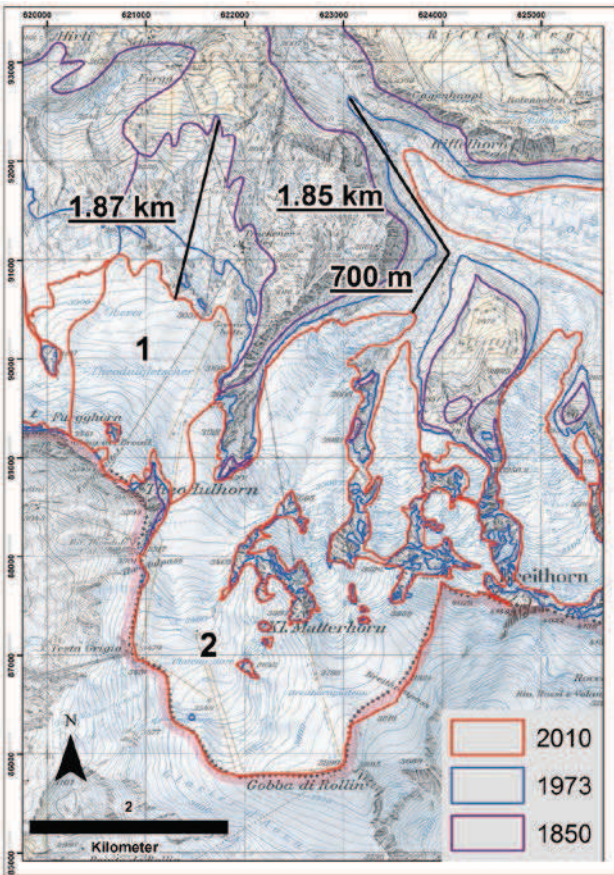
stabiles holozänes Klima hin, welches die Forschung bis heute nicht genau erklären kann.

DER ALETSCHE- UND DER GORNERGLETSCHER

Der Kanton Wallis verfügt über die weltweit genauesten Gletscheraufzeichnungen. Besonders für die zweite Hälfte des Holozäns liegt ein grosser Datenreichtum vor. Dank der Untersuchung historischer Quellen (kartografische Zeugnisse, Bild- und Schriftquellen) und geländearchäologischer Quellen (Weg-, Behausungs- und Wasserleitungsspuren) sowie der Radiokarbon- und Dendrodatierung fossiler Böden und Bäume konnten die Veränderungen der Zungenlängen des Aletsch- und des Gornergletschers während der letzten 3200 Jahre rekonstruiert werden.³ Die Informationen, die dabei gesammelt wurden, sind aufgrund ihrer Exaktheit einzigartig. Sie zeigen zeitgleiche Gletscherschwankungen für den Aletsch- und den Gornergletscher auf: Zwischen 1000 und 600 v.Chr., 500 und 600 n.Chr., 800 und 900 n.Chr., 1100 und 1200 n.Chr. und während der Kleinen Eiszeit zwischen 1300 und 1860 n.Chr. stiessen die Gletscher fast synchron vor. Während der bronzezeitlichen sowie eisen- und römischerzeitlichen Klimaoptima schrumpften die Zungen des Aletsch- und des Gornergletschers stark. Während des 800 Jahre anhaltenden Gletscherschwunds der ausgehenden Eisenzeit und der Römerzeit zwischen 400 v.Chr. und 400 n.Chr. schmolzen die beiden Gletscher auf mit heute vergleichbare Dimensionen. In der mittelalterlichen Warmzeit zwischen 900 n.Chr. und dem frühen 14. Jahrhundert zog sich der Gornergletscher hinter den Stand von 1940 zurück. Zum Schluss der Kleinen Eiszeit, die sich vom frühen 14. Jahrhundert bis um 1860 erstreckte, erreichten die Gletscher einen eindrücklichen Hochstand. Für das holozäne Zeitalter sind mehrere ähnliche, kräftige Vorstösse belegt. Holzhauser weist solche Hochstände für den Gornergletscher während der Kleinen Eiszeit um 1380 n.Chr., zwischen 1623 und 1670 n.Chr. sowie zwischen 1820 und 1860 n.Chr. nach.



14



15

14 Das Gornergletschersystem und seine Gletscher auf Schweizer Seite: Der Obere (1) und der Untere (2) Theodulgletscher, der Triftji- (3), Breithorn- (4), Schwärze- (5), Zwillings- (6), Grenz- (7) und der namensgebende Gornergletscher (8). Gletscher- ausdehnungen nach dem Gletscherinventar von 2010.

15 Flächenänderungen des Oberen (1) und Unteren (2) Theodulgletschers. Zwischen 1850 und 2010 hat sich der Obere Theodulgletscher ungefähr 1,87 km zurückgezogen. Ab 1973 hat sich der Untere Theodulgletscher vom Gornergletscher getrennt und ist ebenfalls stark geschrumpft.

Ähnliche Schwankungen sind für den Aletschgletscher belegt. Seit 1865 hat sich der Gornergletscher pro Jahr durchschnittlich 21 m zurückgezogen und ist heute etwa 3000 m kürzer als damals.⁴

DIE SCHWANKUNGEN DES THEODULGLETSCHERS

Es ist anzunehmen, dass der Theodulgletscher ähnliche Schwankungen wie der Gorner- und der Aletschgletscher durchmachte. Während der letzten grossen Gletscherschwundphase in der Eisen- und Römerzeit war der Theodulgletscher kleiner als heute. In der mittelalterlichen Warmzeit schrumpfte der Theodulgletscher wahrscheinlich auf den Stand von 1950. Die maximale Ausdehnung des Theodulgletschers während des letzten Hochstands um 1860 geht einher mit gewaltigen Gletschervorstössen im gesamten Alpenraum. Der Vorstoss des Theodulgletschers ist auf Schweizer Seite dank historischen Karten und aktuellen Moränenwällen im Gletschervorfeld genau dokumentiert (Abb. 15).⁵

Mithilfe der Kartierung aller Gletscher der Schweiz, der Erstellung sogenannter Inventare, können ehemalige Gletscherstände visualisiert und zukünftige Gletscherschwankungen simuliert werden. Das erste Gletscherinventar beschreibt die Grösse jedes Gletschers um rund 1850, also beim Maximalstand der Kleinen Eiszeit. Dieser Datensatz konnte dank Moränenwällen im Gelände und alten Karten erstellt werden.⁶ Ein weiteres Inventar wurde 1973 aufgrund der Kartierung der Gletscherumrisse auf Luftbildern erstellt.⁷ In den letzten Jahren wurden die Gletscher der Schweizer Alpen auch mittels Satellitendaten beobachtet. Das letzte Inventar beschreibt die Ausdehnung der Gletscher im Jahr 2010 und beruht auf der Digitalisierung von sehr präzisen Luftbildern.⁸ Der Theodulgletscher ist seit 1860 stark geschrumpft (Abb. 15). Bis 2010 ist der Obere Theodulgletscher um ungefähr 1,87 km zurückgegangen. Ab 1973 hat sich der Untere Theodulgletscher

vom Gornergletscher getrennt und hat ebenfalls stark an Masse und Länge verloren. Um 1850 bedeckte der Obere Theodulgletscher eine Fläche von 4,78 km². Die vergletscherte Fläche hat sich bis 1973 auf 3,39 km² reduziert und betrug 2010 noch 2,6 km², was seit 1850 einem Flächenverlust von rund 50 Prozent entspricht.

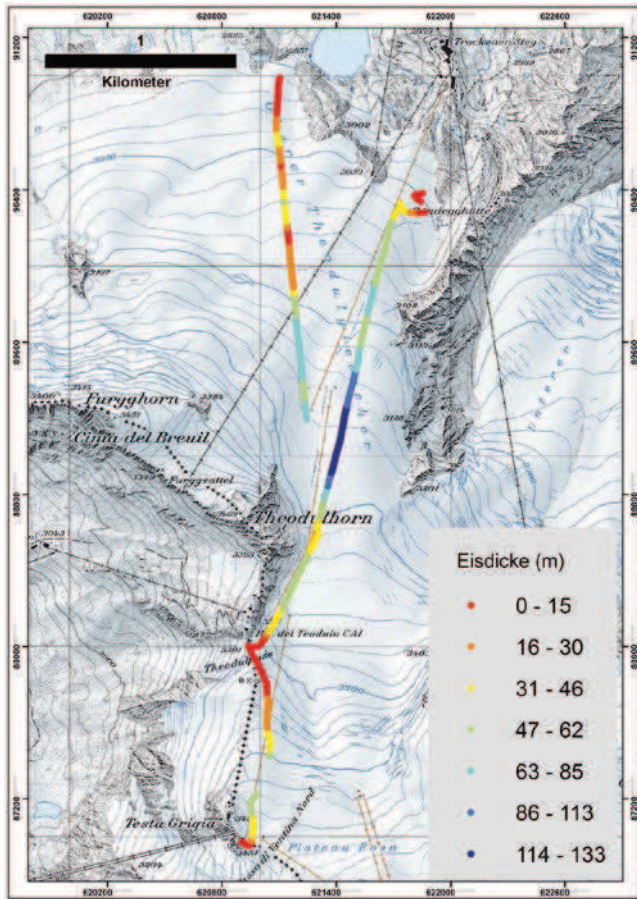
DER AKTUELLE STAND DES THEODULGLETSCHERS

Die Verfasser haben 2012 im Rahmen des Schweizerischen Nationalfondsprojekts *Modelling archaeological potential in the Pennine Alps using GIS tools* zusammen mit der Universität Freiburg i. Ü. und dem Kanton Wallis mit weiteren Projektkollegen Georadar-Messungen durchgeführt (Abb. 19), um die Eismächtigkeit des Theodulgletschers zu bestimmen (Abb. 16).⁹ Georadare werden in der Geophysik eingesetzt, um die oberen Schichten des Erdbodens oder, wie in diesem Fall, eine Eisdecke zu untersuchen. Die Messungen ergaben Eisdicken von maximal 133 Metern. Der tiefste Abschnitt liegt nordöstlich des Theodulhorns. Das Eis beim Zungenende des Oberen Theodulgletschers und in der Nähe des Theodulpasses ist mit weniger als 20 Metern relativ dünn.

DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DES OBEREN THEODULGLETSCHERS

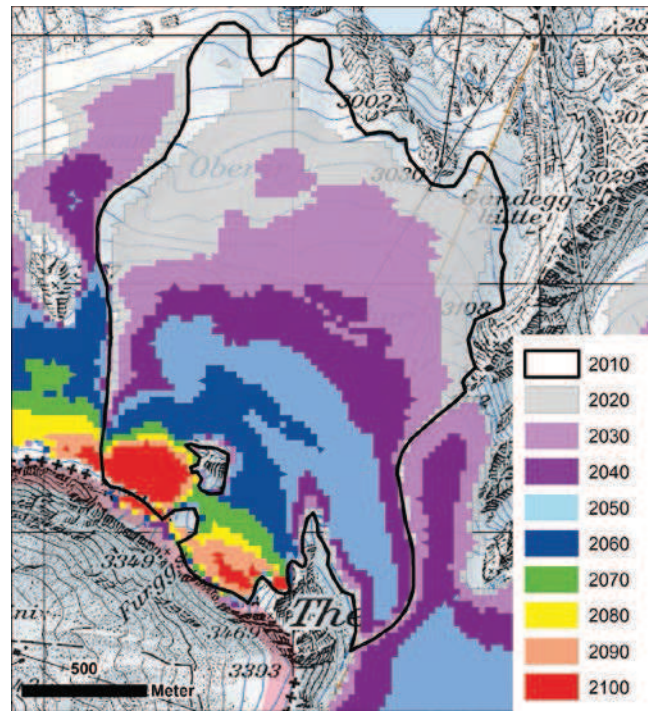
«Modellierungen» oder «Simulationen» sind mathematische Werkzeuge, die in der wissenschaftlichen Forschung – so zum Beispiel in der Glaziologie – eingesetzt werden. Sie stellen eine vereinfachte Realität mit zahlreichen Unbekannten und Grenzen dar. Ihre kritische Prüfung durch Fachpersonen (Glaziologen, Archäologen...) und eine naturwissenschaftliche Herangehensweise sind Voraussetzung.

Das Team des Schweizerischen Nationalfondsprojekts hat die Entwicklung des Theodulgletschers von 2010 bis ins ausgehende 21. Jahrhundert simuliert.¹⁰ Klimadaten gehören zu den wichtigsten Messdaten, die in einer Glet-



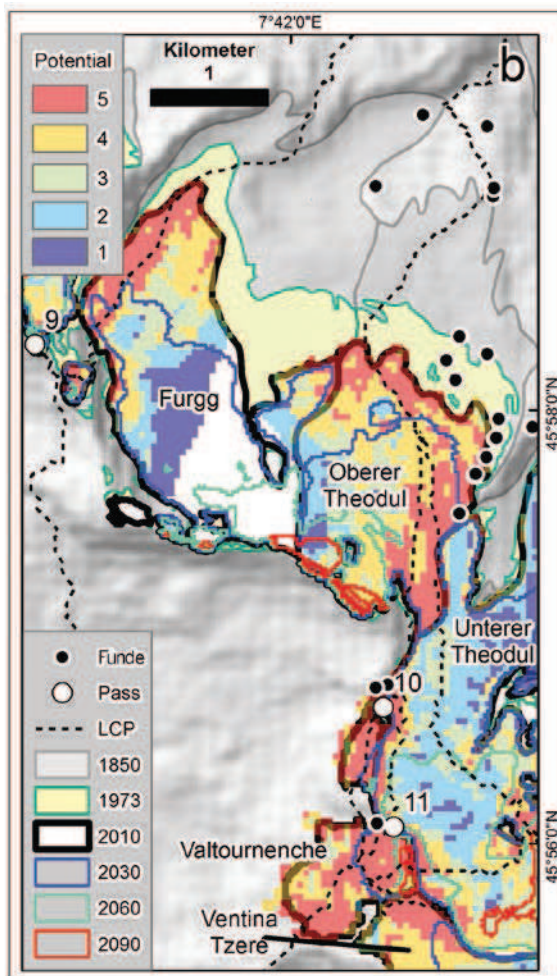
16

16 Ergebnisse der im Februar 2012 auf dem Theodulgletscher durchgeführten Georadar-Messungen. Die Eisdicken sind in Metern angegeben und farblich dargestellt.



17

17 Simulation des Gletscherrückzugs des Oberen Theodulgletschers. Die schwarze Linie folgt dem Gletscherstand von 2010. Die Ausmasse von 2020, 2030, 2040, 2050, 2060, 2070, 2080 und 2100 sind farblich dargestellt.



18

18 Das Gebiet rund um das Theodulhorn und sein archäologisches Potenzial: Anwendung eines Vorhersagemodells. Ergebnisse des Vorhersagemodells für den Theodulgletscher (Schweiz und Italien). Die Wegberechnungen nach dem *Least-Cost-Path*-Prinzip sind mit schwarzen Strichlinien dargestellt: Der Breuiljochpass (9), der Theodulpass (10) und der Passo di Ventina Nord (11) sind ideale Übergänge. Das archäologische Potenzial dieser Passgebiete wird auf einer Skala von 1 bis 5 dargestellt. Zwischen 2010 und 2030 weisen die Gebiete rund um Furgg, den Oberen Theodulgletscher, den Theodulpass, den Passo de Ventina Nord und den Valtournenche-Gletscher das grösste archäologische Potenzial auf.

schersimulation verwendet werden. Zur Berechnung des zukünftigen Klimas werden die Ergebnisse von Treibhaus-effektsimulationen verwendet, die sich auf sozial-wirtschaftliche und technologische Entwicklungsszenarien stützen, die allerdings sehr unsicher sind. Klimamodelle sind das Resultat zahlreicher wissenschaftlicher Forschungsarbeiten, welche vom *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), der weltweit höchsten Instanz in Sachen Klima, anerkannt werden.

Das Simulationsprojekt der Universität Freiburg i.Ü. verwendet ein Klimaszenario mit bis in die Mitte des 21. Jahrhunderts ansteigenden und anschliessend reduzierten Treibhausgasemissionen. Zum jetzigen Forschungszeitpunkt scheint in den Walliser Alpen eine für das Jahr 2100 im Vergleich zu den Jahren 1980 bis 2009 um 4,7°C höhere Durchschnittstemperatur am wahrscheinlichsten. Mit Hilfe eines regionalen Klimamodells und den daraus hervorgehenden Temperaturschwankungen kann die zukünftige Gletscherentwicklung simuliert werden.

Folgende Messdaten wurden im Simulationsprogramm für die Berechnung der zukünftigen Entwicklung des Theodulgletschers verwendet:

1. Die Höhe der Gletscheroberfläche für jeden Punkt, der momentan vom Gletscher bedeckt ist
2. Meteorologische Daten (Temperatur, Niederschlag, direkte Sonneneinstrahlung) von der Wetterstation Zermatt
3. Eisdickenmessungen des Gletscherlängsprofils (Abb. 16), durchgeführt während einer Feldkampagne im Februar 2012 (Abb. 19)
4. Daten zum Gletschermassenhaushalt. Dieser beschreibt den Unterschied zwischen Massenzufluss durch Schneefall und Massenverlust durch Gletscherschmelze. Im oberen Gletscherbereich, dem Nährgebiet, ist im Gegensatz zum unteren Gletscherbereich, dem Zehrgebiet, die Eisbildung grösser als die Eisschmelze. Das Haushaltsjahr eines Gletschers entspricht dem sogenannten

hydrologischen Jahr zwischen dem 1. Oktober und dem 30. September des folgenden Jahres. Für den Theodulgletscher gibt es keine direkten Messungen des Massenhaushalts. Der Vergleich von Karten aus den 1980er-Jahren und von heute ermöglichte es aber, das in den letzten 30 Jahren weggeschmolzene Gletschervolumen festzustellen.¹¹

Diese Messdaten werden in das glazial-hydrologische Simulationsmodell GERM (*Glacier Evolution and Runoff Model*) importiert,¹² mit welchem die vom Gletscher abschmelzenden Wassermassen berechnet werden können. Die Simulationsergebnisse geben Auskunft über die zukünftige Entwicklung des Gletschers: räumliche Ausdehnung, Höhenveränderung der Oberfläche und Schmelzwasserabfluss.

Dem Simulationsmodell zufolge wird der Obere Theodulgletscher 2080 fast vollständig abgeschmolzen sein (Abb. 17). Für den gesamten Penninischen Alpenraum errechnet das Modell ein GletscherschwundszENARIO, welches die Gletscher bis 2030 um 37 Prozent auf 280 km², bis 2060 um 80 Prozent auf 91 km² und bis 2090 um 93 Prozent auf 30 km² zurückschmelzen lässt.¹³

GLACIARCH: EIN THEORETISCHES MODELL ZUR BESTIMMUNG VON GEBIETEN AUF DEM THEODULGLETSCHER UND IN SEINER UNMITTELBAREN NÄHE, WELCHE HEUTE UND ZUKÜNFTIG VON ARCHÄOLOGISCHEM INTERESSE SEIN KÖNNTEN

Die räumliche Modellierung des Theodulgletscher-Rückzugs im Verlauf des 21. Jahrhunderts wird mit einer LCP-Analyse (*Least Cost Path*), das heisst mit optimalen Wegrouuten, die aufgrund topografischer Gegebenheiten und Annahmen über die prähistorische Vegetationsbedeckung berechnet wurden, kombiniert.¹⁴ Daraus resultiert eine Karte der räumlichen Verteilung des heutigen archäologischen Potenzials im Gebiet rund um das Theodulhorn (Abb. 18). Letzteres variiert von 1 (schwaches Potenzial) bis

5 (erhöhtes Potenzial) für einzelne Gebiete. Gebiete mit hohem archäologischem Potenzial liegen in vergletscherten oder kürzlich eisfrei gewordenen Gebieten nahe der optimalen Wegrouuten, also im eher flachen, weniger als 40° steilen Gelände mit geringer oder gar keiner Eisbedeckung.

Um allfälligen Missverständnissen vorzubeugen, betonen die Verfasser an dieser Stelle, dass es sich bei den archäologischen Potenzialen um Wahrscheinlichkeiten handelt. Weist ein Gebiet ein hohes Potenzial auf, ist das noch keine Garantie dafür, dass es auch tatsächlich archäologische Fundstücke beinhaltet. Das Modell basiert auf der Tatsache, dass Menschen die Regionen vergletschelter Pässe nicht dauerhaft besiedelten, sondern diese nur traversierten, um von einer Talschaft in die nächste zu gelangen. Folglich ist es wichtig, anhand topografischer Kriterien wegsames Gelände zu identifizieren. Danach können Gebiete, in welchen es potenziell möglich ist, auf prähistorische Artefakte zu stossen, abgegrenzt werden. Die Karte der räumlichen Verteilung des heutigen archäologischen Potenzials soll Archäologen als Entscheidungsgrundlage dienen. Theoretisch betrachtet können hohe archäologische Potenziale im Gletscherrandbereich erwartet werden, während im Bereich der Gletschermitte aufgrund der höheren Eisdicke und Dynamik die Potenziale am niedrigsten einzuschätzen sind. Abbildung 18 zeigt eine «statische» Momentaufnahme eines an sich dynamischen Phänomens. Aufgrund der kontinuierlichen Änderungen der Gletschergeometrie müsste die räumliche Verteilung der archäologischen Potenziale im Untersuchungsgebiet richtigerweise jedes Jahr neu berechnet werden. Eine 2-D-Grafik vermag die Dynamik der archäologischen Potenziale leider nicht aufzulösen. Ideal für die Archäologen wäre die Möglichkeit einer computerbasierten, digitalen und interaktiven Visualisierung der Resultate in 4-D (Zeit und Raum). Um zukünftige Feldarbeiten besser planen zu können, müssen Archäologen nämlich folgende Frage beantworten können: Wo ist es wann am wahrscheinlichsten, Artefakte zu finden?



19

19 Das Forscherteam der Universität Freiburg i. Ü. führt im Februar 2012 Georadar-Messungen auf dem Oberen Theodulgletscher durch.