

# Zusammenfassung

Klimaänderungen widerspiegeln sich deutlich in Gletscherschwankungen. Als direkte Funktion von Temperatur und Niederschlag bestimmt die Massenbilanz, neben anderen Faktoren, das dynamische Verhalten und die Schwankungen eines Gletschers. Obwohl Gletscherlänge ein indirektes und verspätetes Signal einer Klimainformation darstellt, ist sie ein geeignetes Mittel, um Gletscher-Klima-Beziehungen zu untersuchen. Ende des 19. Jahrhunderts wurden erstmals genaue Messungen von Gletscherlängenänderungen durchgeführt. Leider ist die vorhergehende Zeit der Kleinen Eiszeit nicht durch instrumentelle Daten dokumentiert. Dieser Umstand erfordert interdisziplinäre Ansätze, welche sowohl historische als auch physikalische Methoden einschliessen, um das Verhalten von Gletschern in jener Zeit zu rekonstruieren. In der vorliegenden Arbeit wurde ein solcher Ansatz gewählt, um die Schwankungen des *Mer de Glace* (Mont Blanc-Gebiet, Frankreich) zu untersuchen.

## Gletscherlängenänderungskurve für das *Mer de Glace*

Das *Mer de Glace*, ein 12 km langer Talgletscher mit drei Haupteinzugsgebieten (*Glacier du Géant*, *Glacier de Leschaux*, *Glacier de Talèfre*), liegt nördlich des Mont Blanc. Einschliesslich aller Nebenzuflüsse ist es ein ca. 32 km<sup>2</sup> grosser Eisstrom, der heute einen Höhenbereich von 1500 bis 4000 m ü. M. umspannt und damit der längste und grösste Gletscher der Westalpen ist. Während der Kleinen Eiszeit reichte das *Mer de Glace* praktisch ununterbrochen bis in den Talboden bei Chamonix auf 1000 m ü. M. hinunter. Die Attraktivität der Landschaft und die leichte Zugänglichkeit machten den Gletscher schon früh zu einem begehrten Studienobjekt für Wissenschaftler, Künstler und Touristen. Dies führte zu einer grossen Anzahl von historischem Dokumentationsmaterial über den Gletscher.

Dieses Datenmaterial bildet die Grundlage der vorliegenden Diplomarbeit mit dem Ziel, eine Gletscherlängenänderungskurve für das *Mer de Glace* für die Zeit der Kleinen Eiszeit zu erstellen. Zwar gibt es bereits eine solche Kurve für die Zeitspanne 1590-1911 von Mougins (1912). Diese Kurve weist jedoch gewisse Unsicherheiten auf und ist wenig detailliert. Weitere Untersuchungen über Schwankungen des *Mer de Glace* im späten Holozän wurden von Wetter (1987) gemacht. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, eine revidierte und verfeinerte Gletscherlängenkurve für das *Mer de Glace* zu erstellen, indem neu zugängliches Dokumentationsmaterial ausgewertet wird unter Berücksichtigung der Resultate der bisherigen Arbeiten.

## Historische und physikalische Methoden

Die Analyse und Interpretation von historischen Dokumenten ermöglichen die Rekonstruktion früherer Gletscherstände. Dokumente, die historische Bildinformationen über das Gletscherende enthal-

ten (Zeichnungen, Ölgemälde, Drucke, Fotografien und Karten), als auch Texte (Talbeschreibungen etc.) werden ausgewertet. Eine kritische Auswahl des Dokumentationsmaterials ist wichtig, um verlässliche Informationen zu erhalten. Der Vergleich von alten Bildern mit der heutigen Situation vor Ort im Feld sowie Moränenkartierungen sind hilfreich für die Bestimmung von früheren Gletscherständen. Exzellente Beispiele für Gletscherabbildungen des *Mer de Glace* sind gegeben durch die Zeichnungen von Jean-Antoine Linck (1766-1843) und Samuel Birmann (1793-1847), sowie durch die Karten von James David Forbes (1809-1868) und Eugène Viollet-le-Duc (1814-1879).

Die neue Längenkurve dient als Basis für Gletscher-Simulationen, in denen Klimadaten und ein neuer statistischer Ansatz basierend auf neuronalen Netzen verwendet wird (Steiner, 2005). Ein nicht-lineares "*back-propagation neural network*"-Modell wird auf das *Mer de Glace* angewandt unter Verwendung von multiproxy Rekonstruktionen von saisonal aufgelösten Temperatur- und Niederschlagsdaten bis ins Jahr 1500 zurück (Casty *et al.*, 2005).

Als Ergänzung gibt die Analyse von alten topographischen Karten (von anfangs 20. Jahrhundert, 1939, 1958 und 1967) und die photogrammetrische Auswertung von aktuellen Luftbildern (von 2001) eine detaillierte Beschreibung des Ist-Zustandes des *Mer de Glace*. Die Berechnung eines digitalen Höhenmodells (DEM) für die verschiedenen Jahre erlaubt zudem die Quantifizierung von Gletschervolumenänderungen für das 20. Jahrhundert.

## Resultate und Diskussion

Die revidierte und verfeinerte Gletscherlängenkurve für das *Mer de Glace* reicht bis ins Jahr 1570 zurück und zeigt, nicht überraschend, eine generell grosse Gletscherausdehnung während der Kleinen Eiszeit (Appendix 4, Abbildung 7.25). Die grösste Gletscherausdehnung, dokumentiert durch verschiedene Archivtexte und Moränen, gab es um 1644. Der grösste Gletschervorstoss im 19. Jahrhundert kulminierte um 1821 und ist um ca. 40 m geringer als der Vorstoss im 17. Jahrhundert. Ein zweiter Vorstoss im 19. Jahrhundert fand 1852 statt, wobei der Gletscher jedoch ca. 70 m hinter die gut ausgebildete 1821er Moräne zu liegen kam. Weitere grosse Gletschervorstösse sind um 1600, 1720 und 1778 belegt. Mit Ausnahme von einigen kleinen Vorstössen (letztmals um 1995) zog sich der Gletscher seit den 1850er Jahren bis heute kontinuierlich um mehr als 2 km zurück. Im 20. Jahrhundert weist das *Mer de Glace* einen beträchtlichen Volumenverlust auf, welcher hauptsächlich im unteren Teil des Gletschers stattfand.

Aufgrund des Fehlens von Daten vor 1570 liefert das angewandte Gletschermodell basierend auf neuronalen Netzwerken plausible Rekonstruktionen für Gletscherschwankungen im 16. Jahrhundert (Gletschermaximum um 1565, -minima um 1552 und 1575). Unter Verwendung zweier Klimaszenarien ist es ausserdem möglich, das Verhalten des Gletschers bis 2042 zu simulieren. Gemäss Szenario 1, welches von gleichbleibendem Klima ausgeht, findet das *Mer de Glace* ein quasi Gleichgewicht mit einer Lage der Gletscherzunge um 2042 ähnlich wie heute. Szenario 2 berücksichtigt die gegenwärtige Klimaerwärmung und zeigt einen fortgesetzten und starken Gletscherrückzug an. Bei beiden Szenarien wird von 1900 bis 2042 simuliert, wobei die simulierten Gletscherschwankungen für das 20. Jahrhundert ausserordentlich gut mit den gemessenen Längendaten übereinstimmen. Das Modell ermöglicht schliesslich auch eine Sensitivitätsanalyse des Gletschers bezüglich Temperatur- und Niederschlagsparametern. Dabei konnte gezeigt werden, dass das *Mer de Glace* im Vergleich zum *Unteren Grindelwaldgletscher* stärker auf Temperatur statt Niederschlag reagiert.

Die neue Gletscherlängenkurve stimmt gut mit der Kurve von Mougins (1912) überein. Signifikante Unterschiede gibt es jedoch um 1850, als der Gletscher offensichtlich eine weitaus grössere Ausdehnung hatte, als dies von Mougins angenommen wurde. Ausserdem erlaubt das zusätzliche

---

Datenmaterial eine detailliertere Beschreibung der Gletscherschwankungen für die Zeitperiode von 1750-1820. Die Gletscherausdehnung um 1644 schliesslich ist ungefähr 100 m geringer als in der Mouginkurve gezeigt.

Ein Vergleich der Längenkurve des *Mer de Glace* mit derjenigen des *Unteren Grindelwaldgletschers* (Zumbühl, 1980; Zumbühl et al., 1983) hat gezeigt, dass die beiden Gletscher in den letzten 500 Jahren fast synchron reagierten, trotz den unterschiedlichen Lagen der Gletscher in den West- resp. Zentralalpen. Kleine Differenzen gibt es um 1850, als der *Untere Grindelwaldgletscher* sein Maximum im 19. Jahrhundert erreichte (*Mer de Glace* um 1821), wie auch zwischen 1650-1750 (generell grössere Ausdehnung des *Mer de Glace* mit mehr Variabilität).

Ein nichtlineares statistisches Gletschermodell basierend auf neuronalen Netzen wurde erfolgreich auf das *Mer de Glace* angewandt und trägt damit zu den Untersuchungen über das Gletscher-Klima-System bei. In Verbindung mit neuem historischem Datenmaterial (v. a. Bildmaterial), welches für das Mont Blanc-Gebiet in grosser Fülle auftritt, war es möglich, Gletscherschwankungen des *Mer de Glace* für die Kleine Eiszeit und für die nahe Zukunft aufzuzeigen. Obwohl der Einfluss von Klimaparametern auf Gletscherlänge kompliziert und schwierig zu bestimmen ist, waren klare Aussagen bezüglich der Reaktion eines Gletschers auf sich ändernde Klimaparameter möglich. Die gewonnenen Resultate zum *Mer de Glace* könnten mit weiteren Gletschern in den Alpen oder in anderen Teilen der Erde verglichen werden, um Gletscherschwankungen während der Kleinen Eiszeit weiter untersuchen und besser verstehen zu können.