

Semesterübung "Angewandte Glaziologie"
**Bau einer Sesselbahn auf einem
Gletscher**

Alessandro Agazzi - René Kaufmann

11. Dezember 2009

1. Einführung

Der Obere Theodulgletscher in der Nähe von Zermatt ist ein Skigebiet, das durch einige Skilifte erschlossen ist. Der Skilift, welcher den Trockenen Steg (2939 m.ü.M) mit dem Furggsattel (3349 m.ü.M) verbindet, soll durch eine Sesselbahn ersetzt werden. In dieser Übung wird für diese neue Sesselbahn ein optimaler Routenverlauf und eine passende Anzahl Stützen bestimmt. Dabei werden die Oberflächengeschwindigkeiten, Akkumulations- und Ablationsraten berücksichtigt als auch Steil- resp. Spaltenzonen im Routenverlauf vermieden. Zudem müssen die Fundamente der Stützen so dimensioniert werden, dass die Bruchfestigkeit des Eises und die Einsinkraten infolge Druckschmelze und Deformation nicht überschritten werden. Ferner wird kurz auf die Auswirkungen der neuen Sesselbahn auf die Natur eingegangen.

2. Zusammenfassung

Der Routenverlauf der neuen Sesselbahn liegt auf der Linie des alten Skilifts, wodurch der Trockene Steg geradlinig mit dem Furggsattel verbunden werden. Durch diese Wahl der Route wurde eine minimale Anzahl Stützen von 18 bestimmt, wobei diese bei jeder Gefällsänderung und spätestens nach 166 m platziert wurden.

Mit der Vorgabe des Arbeitgebers, dass die maximale Einsinkrate der Stützenfundamente 2 m/a betragen darf, wurde anhand der Summe aus Druckschmelz- und Deformationsrate eine minimale Fläche der Stützenfundamente von 6.8 m² für Eis und 9.5 m² für Firn berechnet. Das Seitenverhältnis wurde dabei als 5:1 angenommen.

Durch die höhere Transportkapazität der Sesselbahn gegenüber dem Skilift, der guten Erschliessung und der attraktiven Lage des Oberen Theodulgletschers darf in Zukunft mit mehr Besuchern gerechnet werden, welche die Natur in diesem Gebiet stärker belasten.

3. Arbeitsschritte

3.1. Relevante, glaziologische Probleme für den Bau und Betrieb

Folgenden glaziologischen Problemen sollten sowohl während der Bauzeit als auch im Betrieb der Sesselbahn besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden:

- Der Gletscher ist keine starre Masse. Er bewegt sich talabwärts. Die höchsten Fliessgeschwindigkeiten im Fall des Theodulgletschers betragen an der Oberfläche rund 3.5 m/a (im obersten Steilhang und im Mittelteil).
- Steilzonen resp. Abbruchzonen sollten nach Möglichkeit vermieden werden.
- Die Sesselbahn erstreckt sich über einen Höhenbereich, der Akkumulations- und Ablationszone des Theodulgletschers einschliesst. Darum müssen die Schneefall- und Schmelzraten berücksichtigt werden. Diese Raten haben einen Einfluss auf die Eismächtigkeit, die über den Gletscher variabel ist.
- Die Stützenfundamente führen zu einer Anpassung der Gletscheroberfläche an das Bauteil, das heisst die Fundamente sinken ein.
- Die Stützenfundamente bewegen sich mit dem Gletscher hangabwärts. Die Masten werden oben an einem Seil fixiert, unten aber können sie sich frei bewegen. Am Ende der jeder Betriebsperiode muss darum der Mast wieder in seine ursprüngliche Position gebracht werden.
- Für Bau und Unterhalt der Masten müssen schwere Maschinen vor Ort gebracht werden. Dies ist aufgrund der Lage nur mit Helikoptern realisierbar.
- Der Theodulgletscher wird von Spalten und Mini-Surges durchzogen, die einen schlechten Untergrund für die Stützen darstellen und die Arbeit während der Bauzeit resp. auch beim Unterhalt erschweren.

3.2. Dimensionierung der Fundamentfläche

Randbedingungen

Bei der Dimensionierung der Fundamente auf dem Gletscher mussten folgende Randbedingungen eingehalten werden:

- Die Bruchfestigkeit des Eises darf durch die Belastung der Stützen nicht überschritten werden.
- Der Betrieb der Sesselbahn darf durch das Einsinken der Stützenfundamente in den Gletscher nicht beeinträchtigt werden, wobei die maximale Einsinkrate von 2 m/a nicht überschritten werden darf.
- Akkumulations- und Ablationsraten müssen berücksichtigt werden.

Einsinkrate für Eis

Die totale Einsinkrate $v_{\text{tot,Eis}}$ (m/a) in Eis setzt sich aus der Deformationsrate v_D (m/a) und der Einsinkrate aus der Druckschmelze v_S (m/a) zusammen gemäss

$$v_{\text{tot,Eis}} = v_D + v_S \quad (1)$$

Die Druckschmelze v_S wird bei negativen Temperatur-Tagesmitteln nicht berücksichtigt.

Einsinkrate für Firn

Da Firn kompressibler als Eis ist, wird für die totale Einsinkrate im Firn $v_{\text{tot,Firn}}$ (m/a) ein Sicherheitsfaktor von 1.5 gewählt.

$$v_{\text{tot,Firn}} = 1.5 \cdot (v_D + v_S) \quad (2)$$

Deformationsrate v_D

Die Deformation des Eises w (m) wird nach *Timoshenko und Goodier 1970* mit Gleichung 3 berechnet.

$$w = m \cdot \frac{P(1 - \nu^2)}{E\sqrt{S}} \quad (3)$$

Dabei ist m der Formfaktor (siehe Tabelle 1), P (N) die aufgebrachte Kraft, S (m²) die Fundamentfläche, E das Young'sche Elastizitätsmodul (bar/a) und ν die Poissonzahl.

Tabelle 1.: Formfaktoren m

	Kreis	Quadrat	Recheck mit $\alpha = a/b$					
			1.5	2	3	5	10	100
$m =$	0.96	0.95	0.94	0.92	0.88	0.82	0.71	0.37

Das Gletschereis wird als isotrop, inkompressibel und viskos angenommen. Daraus folgt mit der Analogie "Elastizität – Viskosität", dass die Poissonzahl ν durch das viskose inkompressible Poissonverhältnis $\nu^* = 0.5$ ersetzt werden kann. Das Young'sche Elastizitätsmodul E wird mit der dynamischen Zähigkeit η^* ersetzt. Für den nicht linearen, spannungsabhängigen Fall ergibt sich für $n = 3$ eine dynamische Zähigkeit von $\eta_{nl}^* = 20 \cdot \sigma^{-2}$. Die Eisdeformation w (m) wird zu einer Deformationsrate v (m/a) transformiert. Unter diesen Annahmen resultiert die Gleichung (4) für den nicht linearen, viskosen Fall.

$$v_{D,nl} = m \cdot 0.04 \cdot \sigma^3 \cdot \sqrt{S} \quad (4)$$

Dabei ist $v_{D,nl}$ die Deformationsrate (m/a), m der Formfaktor (-), σ der Druck des Körpers auf dem Eis (bar) und S die Fundamentfläche (m²).

Für Spannungen $\approx < 1$ bar kann das Eis als linear viskos betrachtet werden. Dabei wird $\eta_i^* = 8.3$ gesetzt. Die viskose Deformation v_D wird für den linearen, viskosen Fall zu

$$v_{D,1} = m \cdot 0.09 \cdot \sigma \cdot \sqrt{S}. \quad (5)$$

Einsinkrate Druckschmelze v_s

Die Einsinkrate v_s (m/a) einer linienförmigen Last, die auf das Eis einen Druck σ (Pa) ausübt, wird nach *Bejan und Tyvand 1992* (nach Einsetzen von Konstanten)

$$v_s = 1.44 \cdot 10^{-4} \frac{\sigma}{\sqrt{l}} \quad (6)$$

berechnet. Gleichung (6) gilt nur, wenn die Temperatur des Fundaments höher als 0°C ist. Sie wird deshalb nur bei Tagen mit positiven Tagestemperaturmitteln berücksichtigt.

Weitere Annahmen für die Berechnung

- Für die Stützenfundamente wurde ein Längen-/Breitenverhältnis von 5:1 angenommen, woraus ein Formfaktor von $m = 0.82$ resultiert (Tabelle 1).
- Die mittlere Tagestemperatur $T_{d,m}$ ist an 55 Tagen im Jahr $\geq 0^\circ\text{C}$. Das entspricht dem Mittelwert der Anzahl $T_{d,m} \geq 0^\circ\text{C}$ des Jungfraujochs (38 Tage) und des Corvatschgletschers (72 Tage). Der Corvatschgletscher liegt etwa im gleichen Höhenbereich wie der Theodulgletscher.

4. Resultate

4.1. Stütze im Eis

Der Druck der Stütze auf ein Fundament liegt beim Eis im linearen Fall bei $\sigma = 1.65$ bar, im nicht linearen Fall bei $\sigma = 1.62$ bar. Für die Länge eines Fundaments im Eis wird daher der nicht lineare Fall gewählt, weil die Spannung > 1 bar ist. Aus den Gleichungen (4) und (6) folgt die Länge $l = 4.12$ m. Mit dem Verhältnis $l/b = 5$ damit eine Breite $b = 0.82$ m und eine Fläche von $S = 3.4$ m². Jede Stütze braucht zwei Auflageflächen und damit zwei Stützenfundamente. Somit benötigt eine Stütze eine Fläche von $S = 6.8$ m² im Eis. Die Einsinkrate beträgt $v_{\text{tot,Eis}} = 1.99$ m/a.

4.2. Stütze im Firn

Der Druck der Stütze im Firn beträgt im linearen Fall $\sigma = 1.16$ bar, im nicht linearen Fall $\sigma = 1.21$ bar. Für die Stütze im Firn wird daher der lineare Fall betrachtet. Die Länge des Fundaments wird dadurch zu $l = 4.86$ m, die Breite zu $b = 0.97$ m und die Fläche $S = 4.72$ m² berechnet. Die Stütze im Firn braucht demnach eine Fläche von $S = 9.5$ m². Daraus ergibt sich eine Einsinkrate von $v_{\text{tot,Firn}} = 2.00$ m/a, womit die vorgegebene Rate eingehalten ist.

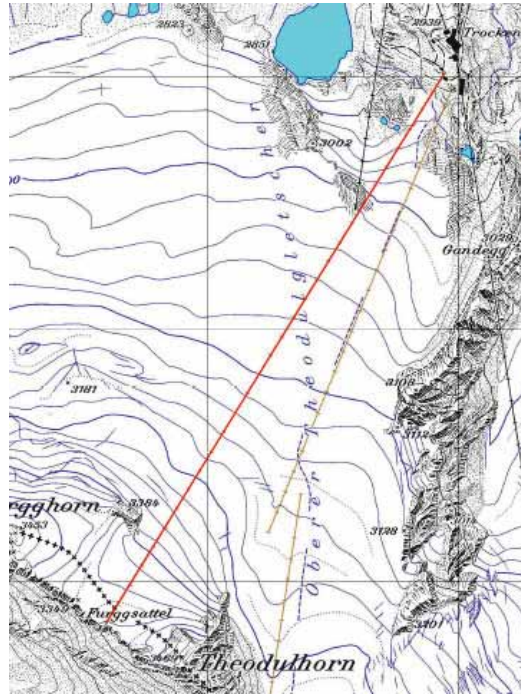


Abbildung 1.: Situationsplansplan des Theodulgletschers und vorgeschlagene Linienführung

4.3. Bruchfestigkeit

Die Bruchfestigkeit von Eis kann bei „mässigen Eistemperaturen“ ($> -5^{\circ}\text{C}$) mit $\sigma_D = 2.5 \text{ MN/m}^2$ angenommen werden [1]. Für Eis wird ein Druck von maximal $\sigma = 0.17 \text{ MN/m}^2$ im linearen Fall berechnet. Die Bruchfestigkeit ist somit gewährleistet.

4.4. Routenverlauf der Sesselbahn

Im Situationsplan (Abbildung 1) ist der Linienvverlauf der Sesselbahn eingetragen. Dabei wird berücksichtigt, dass die Linienführung möglichst gerade von Trockener Steg auf den Furggsattel verläuft. Im Bereich der Bergstation wird zudem auf die Spaltenbildung Rücksicht genommen, da in diesem Bereich die Fliessgeschwindigkeiten hoch sind (siehe Abbildung 2).

Der grösste Bodenabstand bei Sesselbahnen darf höchstens 15 Meter betragen [2]. Gestützt auf diese Richtlinie wird eine Höhe der Sesselbahn von 10 Meter über Grund angestrebt und wo nötig nach oben oder unten angepasst. Für die gesamte Strecke werden 18 Stützen benötigt. Diese werden bei jeder Gefällsänderung oder nach höchstens 166 Meter gesetzt.

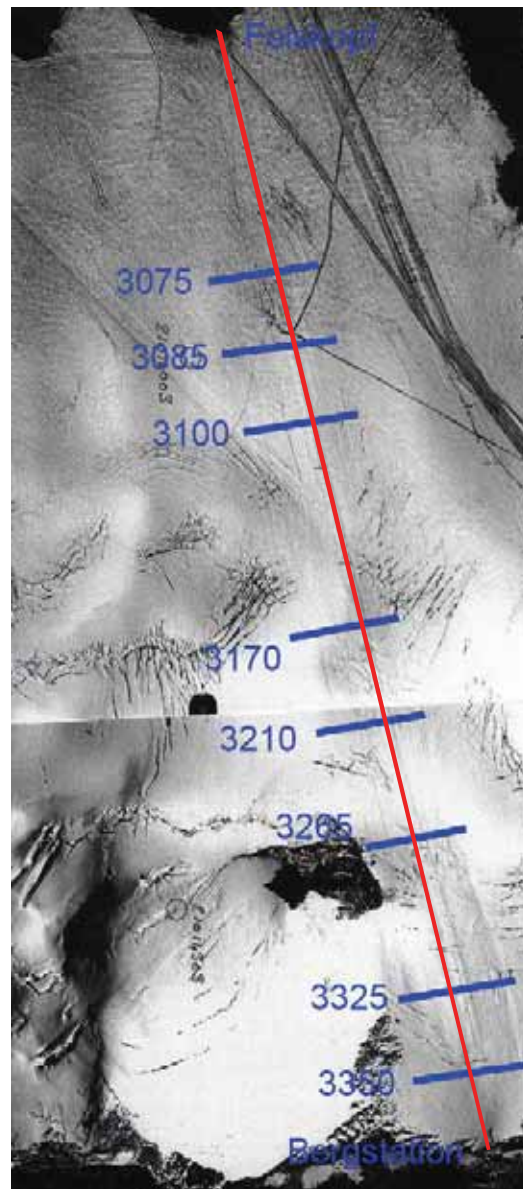


Abbildung 2.: Spaltensituation am Oberen Theodulgletscher von 1999 mit Höhenbereich und vorgeschlagener Linienführung.

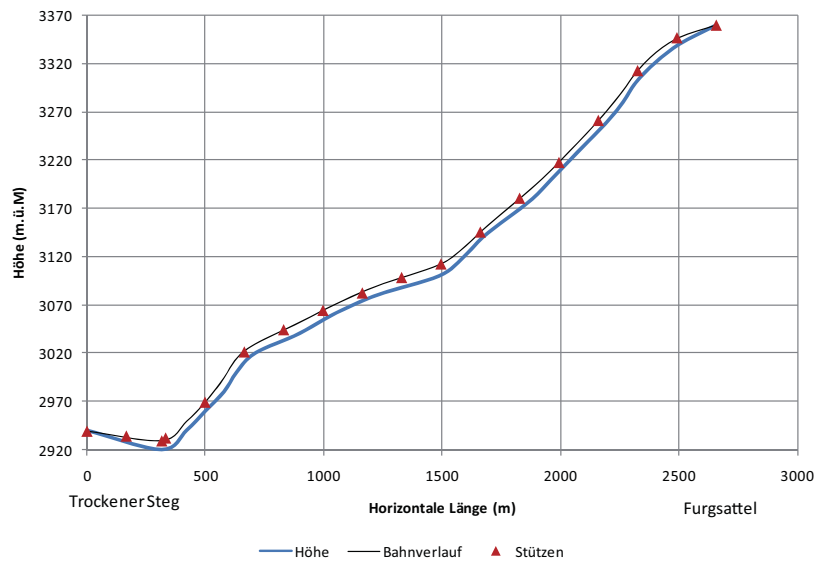


Abbildung 3.: Längsprofil der neuen Sesselbahn auf dem Oberen Theodulgletscher.

5. Diskussion

Die Dimension der Fundamente genügt für die heutigen Anforderungen. Damit kann die Vorgabe des Auftraggebers, das Einsinken der Fundamente in das Eis mit maximal $v_{tot} = 2$ m/a gerade erreicht werden. Allerdings sind zukünftige Entwicklungen des Klimas nicht berücksichtigt. Eine Erwärmung und damit eine Erhöhung der Tage mit einer durchschnittlichen Temperatur über 0°C kann die Einsinkrate durch die Druckschmelze erhöhen. Die Erhöhung um 20% von 55 auf 66 Tage mit einem positiven Tagestemperaturmittelwert benötigt ein um rund 6% längeres Fundament (von 4.12 m auf 4.36 m) respektive eine Grundfläche die um 12% grösser ist (von 3.33 m^2 auf 3.80 m^2). Wird die Stütze mit diesen Dimensionen gebaut, ist heute mit einer Einsinkrate von 1.70 m/a zu rechnen, was einer Reduktion um 15% entspricht. Für Firn ergeben sich ähnliche Resultate.

Eine Änderung des Längen- zu Breitenverhältnis von 5:1 auf 10:1 hat eine Reduktion des Formfaktors um 10% zur Folge. Das Fundament muss neu 5.52 m (+ 34%) lang sein um die Einsinkrate bei $v_{tot} = 2$ m/a halten zu können. Die notwendige Fläche reduziert sich jedoch um etwa 10% auf 3.05 m^2 . Auch hier sind die Resultate für Eis und Firn ähnlich.

Werden die Stützen mit einem kleineren Längen- zu Breitenverhältnis gebaut, wird zwar etwas mehr Fläche benötigt, dafür kann der Druck auf das Eis etwas besser verteilt und die Deformationsrate v_D reduziert werden.

Im Fall von Akkumulation wird die Einsinkrate optisch vergrößert (die Fundamente liegen tiefer im Eis), tatsächlich wird sich nach wie vor nur durch die Deformation und Druckschmelze bestimmt. Bei der Ablation nimmt die Gletschermächtigkeit ab, was aber einen geringen Einfluss auf die Einsinkrate habe, weil diese vor allem auf die Gletscheroberfläche wirkt.

Ein grosser Unsicherheitsfaktor ist das Klima. Wird – wie prognostiziert – eine Klimaerwärmung stattfinden, werden die Anzahl Tage mit negativen Tagesmittel-

werten zunehmen. Die Druckschmelze ist, auch wenn nur an einigen Tagen im Jahr auftretend, der dominante Faktor bei der Schmelze von Eis.

Die Fundamente müssen nicht auf den Millimeter genau mit den berechneten Dimensionen übereinstimmen. Dies würde die Baukosten unnötig in die Höhe treiben. Die Länge des Fundaments im Eis darf mit 4.5 Metern, im Firn mit 5.5 Metern angenommen werden. Daraus ergibt sich für 55 Tage mit einer Temperatur grösser als 0°C eine Einsinkrate von 1.55 Meter pro Jahr (-22%) im Eis, respektive 1.51 Meter pro Jahr (-25%) im Firn.

In dieser Übung wurden Tangentialkräfte in Bahnachse und senkrecht auf die Bahnachse nicht berücksichtigt. Tangentialkräfte in Bahnachse entstehen durch die natürliche Verschiebung der Masten hangabwärts. Tangentialkräfte senkrecht auf die Bahnachse werden durch Winde verursacht. Diese zu quantifizieren ist zu aufwändig und wurde daher nicht berücksichtigt. Hinzu wirken auf die Eisoberfläche Scherkräfte, die durch die nicht mehr senkrechte Normalkraft verursacht werden.

6. Ausblick

Die Sesselbahn auf dem Theodulgletscher wird Einfluss auf den Tourismus haben. Das Furgghorn kann mit verschiedenen Seilbahnen von Zermatt wie auch von Breuil-Cervinia (Italien) erreicht werden. Im Sommer und im Winter dient es als Skisportgebiet. Das Matterhorn ist weltweit ein bekanntes Schweizer Symbol, wodurch der Tourismus für die Region ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor ist. Daher sollten Investitionen und Bauvorhaben in diesem Gebiet sehr sorgfältig geplant und ausgeführt werden, damit die Natur erhalten bleibt.

Literatur

- [1] Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstrassen EAU 2004 / hrsg.: Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“ der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik., 10. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn, 2005, Seite 174.
- [2] e/1999 Richtlinie für den Bau und Betrieb von Sesselliften, Ausgabe August 1993, mit Einarbeitung der Nachträge einschliesslich Nachtrag e/1999, Verbindungsstelle der österreichischen Bundesländer Expertenkonferenz der seilbahntechnischen Amtssachverständigen.

A. Anhang

Tabelle 2.: Dimensionen des Fundaments

	Eis		Firn	
	Linear	Nicht linear	Linear	Nicht linear
Länge l (m)	4.08	4.12	4.86	4.76
Breite b (m)	0.82	0.82	0.97	0.95
Fläche S (m ²)	3.33	3.39	4.72	4.53
L/B	5.00	5.00	5.00	5.00
Formfaktor m	0.82	0.82	0.82	0.82
Anzahl Tage pos. Temp.mitteln	55	55	55	55
Kraft pro Fundament (N)	550000	550000	550000	550000
Druck (bar)	1.65	1.62	1.16	1.21
Druck (Pa)	165201	162009	116429	121372
Druck (MN/m ²)	0.17	0.16	0.12	0.12
Deformationsrate vd (m/a)	0.22	0.26	0.19	0.12
Druckschmelze vs (m/a)	1.77	1.73	1.15	1.21
Einsinktrate vtot (m/a)	2.00	1.99	2.00	2.00