

Masterarbeit FS22

**RESEARCH  
MICHAEL  
NELSON.** • Menn / Vogt / Conzett

# ENTROPIA.

## Inhalt

03	Vorwort
07	Verflüssigt
15	Massen-Bewegung
28	Biosphäre
36	Resümee
39	Thesen
40	Intervention
44	Anhang

Landschaftsinfrastrukturen  
Starke Formen

Gastdozentur Corinna Menn  
Professur Günther Vogt  
Externer Gast, Jürg Conzett



Abb.01 Projekt Oberaletsch des Runden Tisches

## VORWORT.

### **Die Wasserkraft in einer neuen Landschaft**

Am Anfang des Diplom Semesters stand die Auseinandersetzung mit den 15 Projekten für die Wasserkraft des Runden Tisches vom Bund. Mit dieser gemeinsamen Erklärung der verschiedenen Interessensgruppen sollen die Differenzen überwunden und der Ausbau der Wasserkraft vorangetrieben werden. Eines dieser Projekte ist die Erschliessung eines neuen Gletschersees für die Kraftwerksgruppe Gibidum-Naters (Electra-Massa) im Gebiet Oberaletsch. Mit dieser Massnahme soll die Strom-Produktion gesichert werden, welche durch den schnellen Rückgang der Gletscher teils gefährdet ist. Schon heute ist das Gebiet stark vom Gletscher abhängig. Das zeigt sich auch daran, dass das Wasser hauptsächlich im Sommer turbinert wird, wenn am meisten Schmelzwasser anfällt. Der Strom wird dann dazu gebraucht, die Pumpspeicher der Grande-Dixence Kraftwerkgruppe für die Winterproduktion zu füllen.

Das Projekt Oberaletsch ist ein gutes Beispiel für die tiefgreifenden Veränderungen, welche durch den Klimawandel auf diese Region zukommen werden. Im Rahmen dieser Recherche wird der Blick auf die gesamte Region des Aletsch ausgeweitet mit dem Ziel, die rapiden Veränderungen der alpinen Landschaft besser zu verstehen und daraus Folgen für die Wasserkraft ab zu leiten. Schliesslich wird nach dem gestalterischen Potential dieser Veränderungen gefragt.

Mit dem prognostizierten Rückgang des Grossen Aletschgletschers werden verschiedene weitreichende Prozesse angestossen: Neue Seen formieren sich, die flankierenden Hänge werden zunehmend instabil

und zudem ist eine neue Vegetation langsam im Anmarsch. Das Bild der soliden Alpen gerät ins Wanken. Prozesse welche schon immer geherrscht haben beschleunigen sich und bergen neue Gefahren für den menschlichen Lebensraum. Kurz: eine neue Landschaft entsteht. Mit dem Titel *Entropia (Entropie: Mass des Energieausgleichs / Undifferenziertheit)* wird versucht, diesen vielfältigen und komplexe Prozesse zu Begreifen. Aus menschlicher Sicht wird die alpine Landschaft an Ungewissheit zunehmen und immer dynamischer werden. Gleichzeitig besteht ein Handlungsdruck, wenn man nicht gewillt ist, in Zukunft ganze Siedlungen auf zu geben. Zudem droht ein Identitätsverlust: Das Bild der schneebedeckten Berge weicht einer zunehmenden Verflachung und Vergrauung und die Artenvielfalt nimmt langfristig ab. Die Alpenregionen werden ihr Image wieder einmal mehr neu erfinden müssen.

Im Gegensatz zu der dynamisierten Landschaft erscheinen die Bauwerke der Wasserkraft für die Ewigkeit gebaut. Talsperren gehören zu den grössten Bauwerken unserer modernen Zivilisation und sind wahre Hercules-Aufgaben menschlicher Arbeit und Ingenieurskunst. Sie bleiben lange bestehen und müssen dementsprechend über lange Zeit konzipiert werden. Eine konventionelle Staumauer aus Beton ist so dauerhaft, dass es wirtschaftlich keinen Sinn macht, solche Strukturen jemals wieder abzubauen. Gleichzeitig sind Talsperren immer ein schwerer Eingriff in die Ökologie der betroffenen Gewässer, liefern jedoch CO<sub>2</sub> neutralen Strom und werden politisch gefördert.

Die Frage stellt sich, wie dauerhaft solche Bauwerke in dem Kontext der neuen dynamisierten Landschaft sein dürfen und welche zusätzlichen Aufgaben solche Bauwerke erfüllen müssten. Ist es möglich, solche Infrastrukturen anders zu denken?

1:1



Abb.02 Verhältnis der Zuleitungen für die Wasserkraft zu natürlichen Gewässern



Abb.03 Sieht so die Zukunft der alpinen Landschaft aus?

# VERFLÜSSIGT.



Abb.04 Geschiebe-Brocken am Aletschgletscher

## Die Alpen im Klimawandel

Die Alpen sind vom Klimawandel besonders betroffen und erwärmen sich schneller als das umliegende Mittelland. Dies ist zum einen auf ihrer grössere Distanz zu der kühlenden Wirkung der Ozeane zurück zu führen. Zudem kommt die positive Rückkoppelung des Albedo Effekts ins Spiel.<sup>1</sup> Dahinter steckt das Phänomen, dass Schnee mehr Sonnenlicht reflektiert als andere Oberflächen, was eine kühlende Wirkung mit sich bringt. Wenn der Schnee jedoch einmal weg ist steigt die Erwärmung umso stärker an. Insgesamt wird für den Alpenraum je nach CO<sub>2</sub>-Reduktions Szenario zwischen 1.5-5 °C Erwärmung prognostiziert.<sup>2</sup>

Die grösste Veränderung durch diese Erwärmung betrifft vor allem den Wasserhaushalt, mit gravierenden Auswirkungen auf diverse Bereiche. Als Wasserschloss Europas spielen die Alpen eine besondere Rolle im gesamten Wassersystem des Kontinents. Durch ihre topographische Erhöhung bilden die Bergketten eine natürliche Barriere für feuchte Luftströme, was zu überdurchschnittlich viel Niederschlag führt (1000ml). Die umliegenden Länder sind stark vom Wasserabfluss aus den Alpen angewiesen. Innerhalb der Berge schafft deren komplexe Topographie unterschiedliche klimatische Bedingungen, wie z.B. die alpinen Trockentäler im Wallis.

1 Siehe Weingartner, Die alpine Wasserlandschaft im Wandel, 2021, S.87-88

2 Siehe CH2018 Climate Szenarios for Switzerland, 2018, S.88 -89

## Temperature

deviation from the normal period 1981-2010

2060

RCP8.5

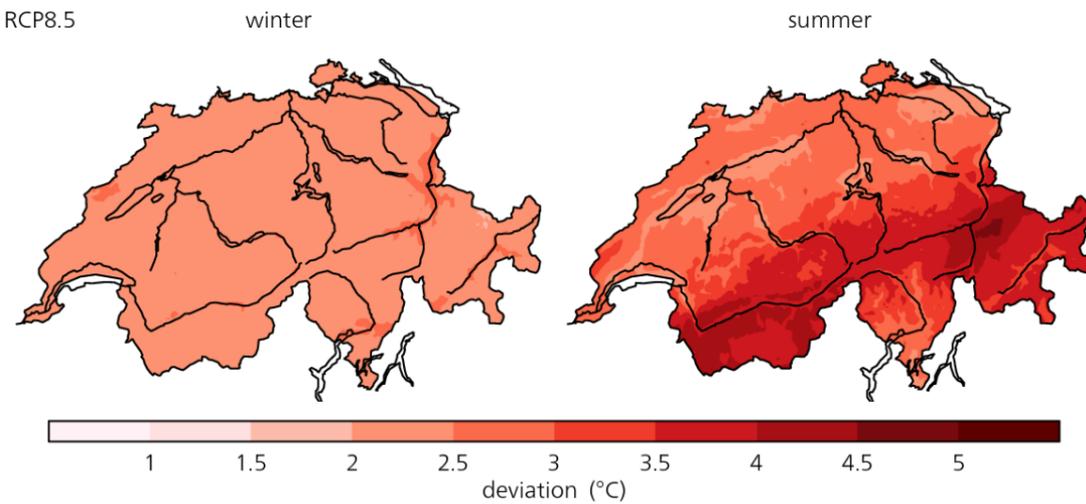


Abb.05 Temperaturentwicklung in den Alpen

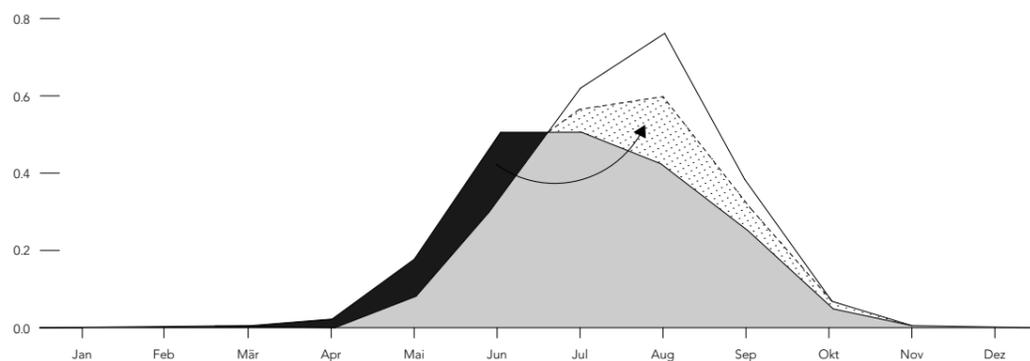


Abb.06 Jahresabfluss des Glacier de la Girose. Die rote Fläche symbolisiert die Abflussmenge, welche gesamthaft verloren geht. Die blaue Fläche representiert die Wassermenge, welche früher aufgrund des fehlenden Schnees abfließt. Diese Menge könnte zeitweise mit Staumauern kompensiert werden.

## Veränderter Wasserhaushalt

Eine erste Folge des Klimawandels für die Alpen ist ein teilweiser Verlust ihrer Speicherkapazität. Durch die steigenden Temperaturen kommt es zu einer saisonalen Verschiebung und insgesamt geringerem Wasserabfluss bei gleichbleibendem Niederschlag. Vor allem aufgrund der geringeren Schneemenge und früheren Schneeschmelze kommt es zu einem erhöhten Abfluss in den Frühlingsmonaten. Dabei spielen die Gletscher im Vergleich zum Schnee eine untergeordnete Rolle als Wasserspeicher.<sup>3</sup> Der Schnee hilft zusätzlich, die Gletscher und den Permafrost durch seine isolierende Wirkung vor dem Schmelzen zu bewahren. Ohne den Schnee werden diese in Zukunft noch schneller auftauen.<sup>4</sup> Der Rückgang der Gesamtabfluss-Menge hat mit der höheren Verdunstungsrate bei höheren Temperaturen und dem Schmelzen der Gletscher zu tun. Im Gegensatz zum Schnee bilden die Gletscher einen nicht erneuerbaren Wasserspeicher.<sup>5</sup> Historisch gesehen haben wir bis anhin stark von den höheren Schmelzraten der Gletscher profitiert. Doch dieser Vorrat wird bald erschöpft sein. Wenn dieses Speichervolumen einmal wegfällt, kann es nur noch durch menschliches Eingreifen, und dann auch nur bedingt, kompensiert werden (Abb.06). Staauseen, welche heute besonders stark vom Gletscherwasser abhängig sind, (z.B. Mattmark mit 30%) werden vor neue Herausforderungen gestellt werden.

3 Siehe Weingartner, Die alpine Wasserlandschaft im Wandel, 2021, S.86-87

4 Siehe Etzelmüller et al, 20 years of European mountain permafrost dynamics, 2020, S.9

5 Siehe Farinotti, From dwindling ice to headwater lakes: could dams replace glaciers in the European Alps? 2021, S.1-2

### **Folgen**

In Zukunft ist mit mehr Extremereignissen wie Hochwasser zu rechnen, da das Wasser weniger lang in den Bergen gespeichert wird. Die wärmere Luft kann zusätzlich mehr Feuchtigkeit aufnehmen und wieder abgeben, was zu grösseren Starkniederschlägen führt.<sup>6</sup> Daher ist auch im Sommer mit mehr Hochwasser zu rechnen (wie im Sommer 2020).

Im Unterland kann es während den Sommermonaten zu saisonalen Wasserknappheiten kommen, vor allem in den starken Landwirtschaftsregionen. Die Speicherseen in den Alpen können nur begrenzt helfen, da es bis zum Verbraucher eine grosse räumliche Distanz gibt. In den trockenen Regionen werden künstliche Wasserspeicher jedoch eine grössere Rolle spielen müssen.

<sup>6</sup> Siehe Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer, BAFU Bundesamt für Unterwelt, 2021, S.8

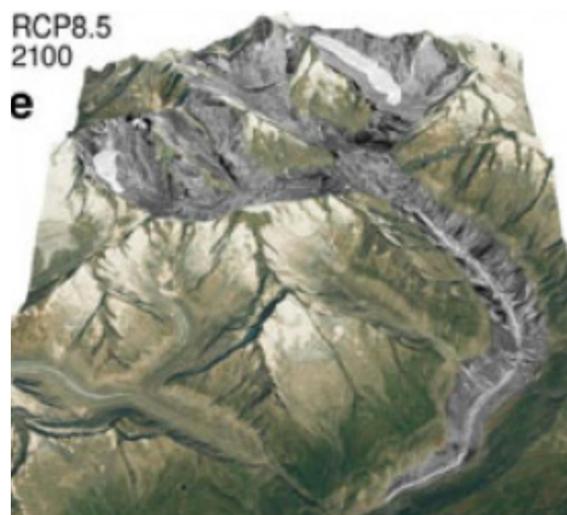
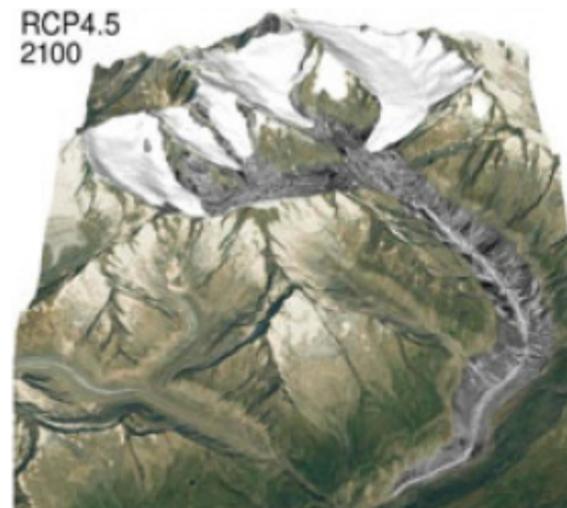
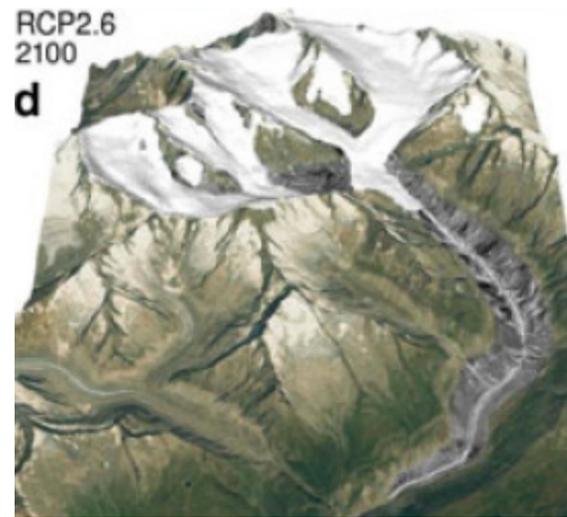


Abb.07 Drei Szenarien für den Rückgang des Aletschglaciers

### Das Gletschersterben

Das Sterben der Gletscher ist mittlerweile zur unaufhaltsamen Tatsache geworden. Auch im Best-Case Szenario wird der grösste verbleibende Gletscher Europas, der Grosse Aletschglatscher, mind. 50% seines Volumens verlieren (eine andere Studie geht auch bei optimalem Klimaschutzszenario von 75% Verlust aus<sup>7</sup>). Zwischen 1850 und 1975 ist die Hälfte des Eisvolumens in den Alpen verschwunden. Seither ist jährlich 1% verloren gegangen, mit stark steigender Tendenz. 2003 waren es ganze 8%.<sup>8</sup> Heute gibt es in den Alpen ca. 80-90km<sup>3</sup> Eis, davon schmelzen jährlich 2km<sup>3</sup>. Bis zum Ende des Jahrhunderts werden nur noch klägliche Reste übrig sein. Weil gerade die grossen Gletscher verzögert auf das neue Klima reagieren, ist ein riesiger Eisverlust praktisch irreversibel,<sup>9</sup> und könnte sich ab Mitte des Jahrhunderts erst recht beschleunigen. Durch wirksame Klimamassnahmen (RCP2.5) lässt sich das Verschwinden der Gletscher höchstens verlangsamen.

Kurzfristig bedeutet das einen Anstieg des Schmelzwassers, von dem die Wasserkraft profitieren könnte. Längerfristig wird die Wassermenge ab ca. 2075 bereits unter dem heutigen Niveau sein. Mit dem Rückzug der Gletscher offenbart sich eine neue Topographie. Bereits überlegt man sich, wie man die neu entstehenden Gletscherseen für die Wasserkraft nutzen könnte. Zudem ist unklar, was der Verlust für das Gebiet als Unesco-Weltkulturerbe-Stätte bedeuten wird.

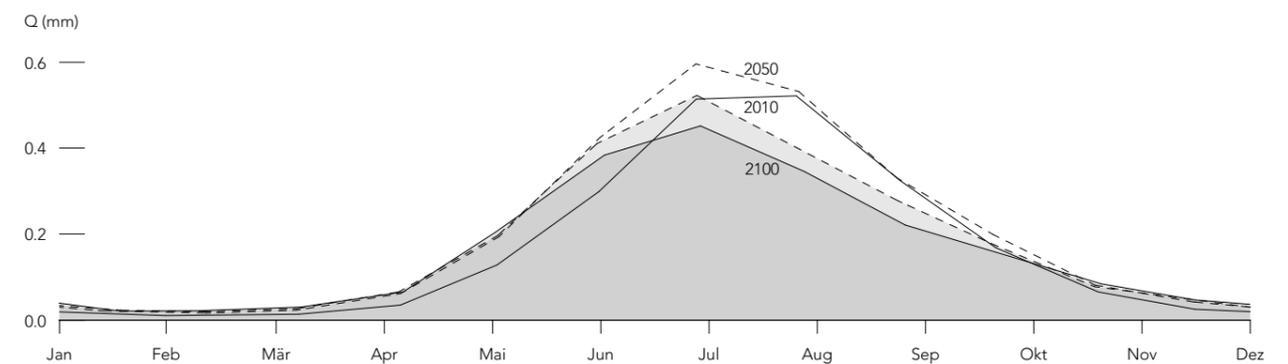


Abb.08 Entwicklung der Abflussmenge (Schmelzwasser) am Aletschglatscher

7 Siehe Jouvét und Huss: Future retreat of Great Aletsch Glacier 2019, S.871  
 8 Siehe Haeberli und Maisch, Klimawandel im Hochgebirge, 2017, S.102-103  
 9 Siehe Haeberli: Verschwindendes Eis im Hochgebirge, was nun?. 2020, S.100



Abb.09 Eine neue Topographie wird freigelegt (Eishöhle am grossen Aletschgletscher)

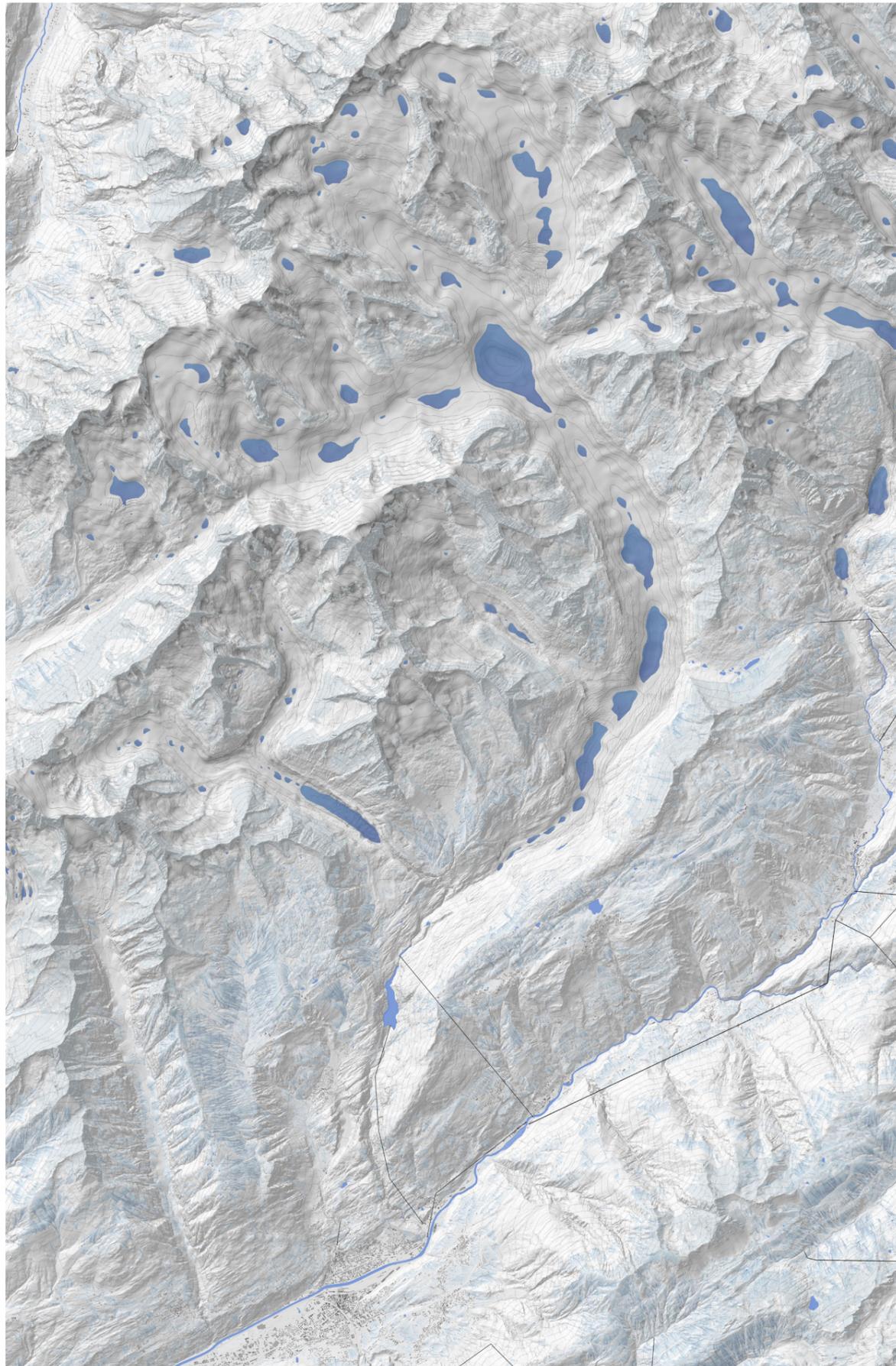


Abb.10 Neue Seen im Aletsch Gebiet

### Neue Seen

Topographische Einbuchtungen im felsigen Untergrund werden bald durch den Gletscher freigegeben und mit Schmelzwasser gefüllt. Theoretisch könnten so, je nach Schätzung, zwischen 600-1200 neue Seen in den Schweizer Alpen entstehen und das Gesicht der Alpen in Zukunft entscheidend mitprägen. Das Aufspüren der Vertiefungen ist Gegenstand der Forschung und modernen Kartierungsarbeit mittels Radargeräten. Die grossen Seen werden erhalten bleiben, die kleineren werden sich jedoch über Zeit mit Sedimenten füllen und verschwinden.<sup>10</sup> Diese Seen bergen Chancen für neue Wasserkraft-Konzessionen und den Tourismus, haben jedoch auch ein grosses Gefahrenpotential.

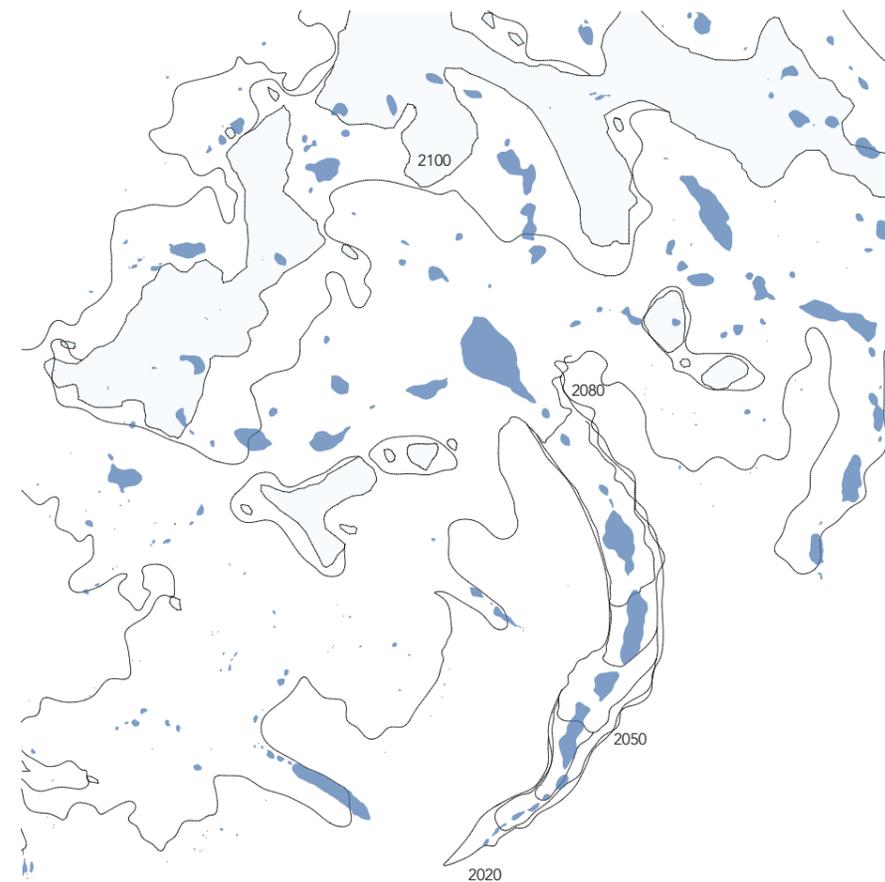


Abb.11 Gletscherrückzug und neue Seen

<sup>10</sup> Siehe Haerberli und Schleiss, Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen, 2012, S.95



Abb.12 Die Neuen Seen der Schweiz

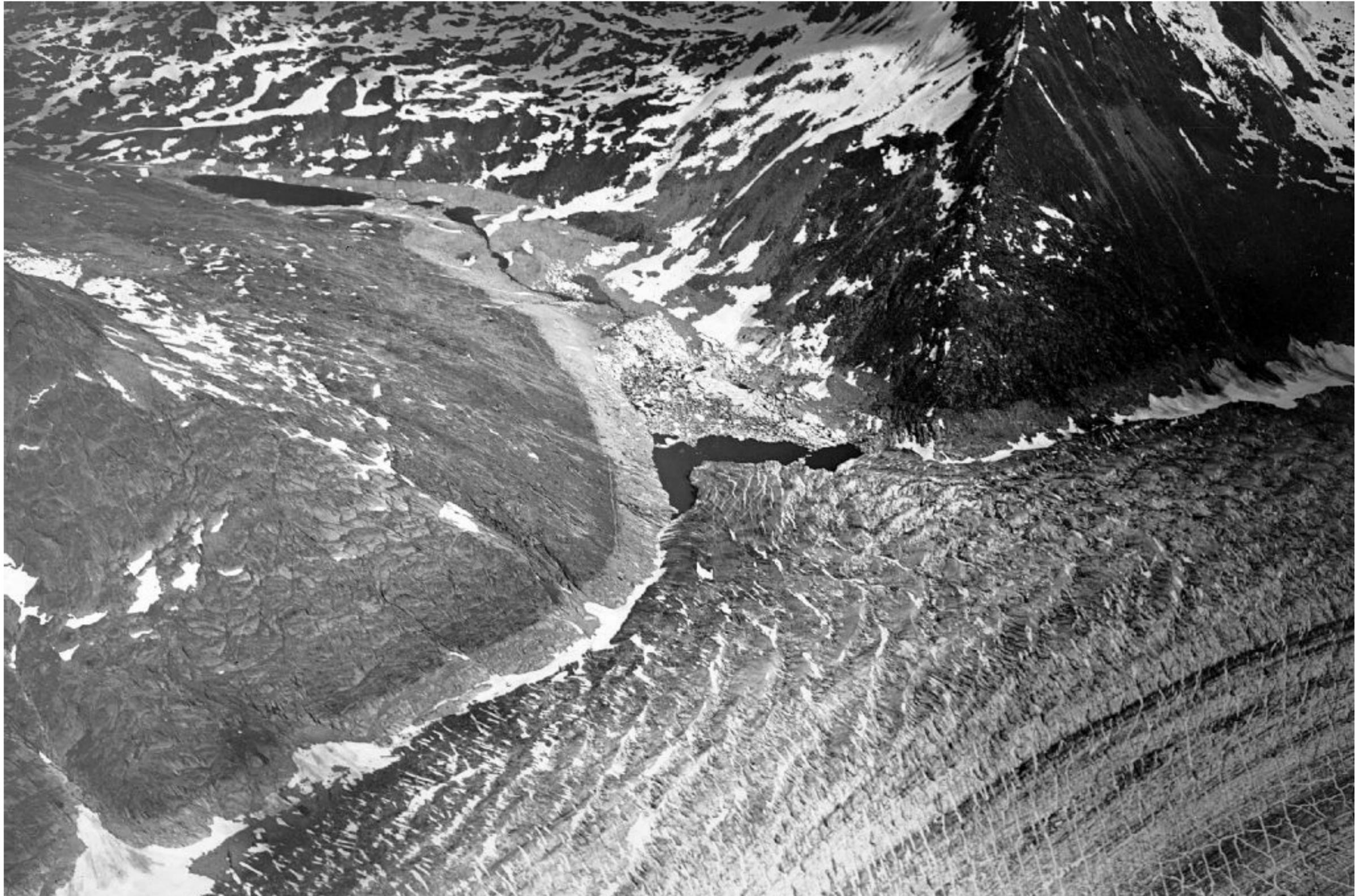


Abb.13 Bildung des Märlensees durch den Rückzug des Aletsch Gletschers im letzten Jahrhundert

# MASSEN-BEWEGUNG.

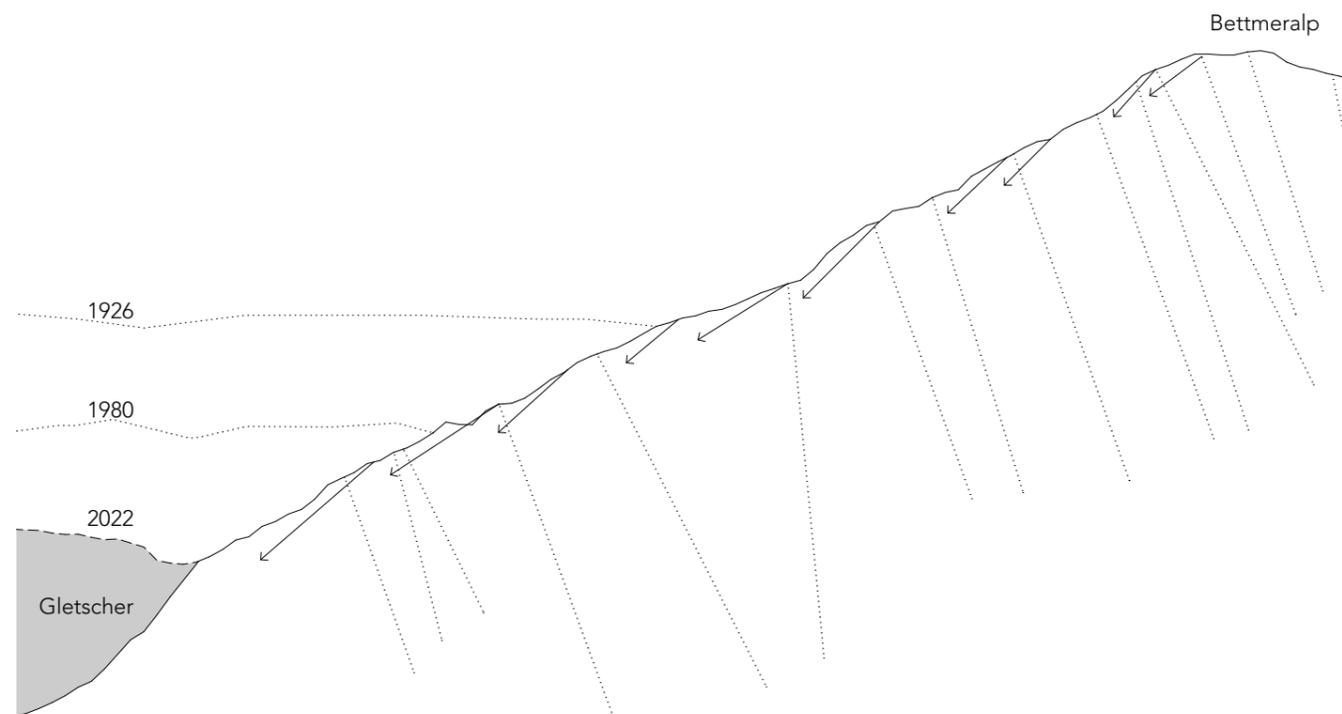


Abb.14 Querschnitt durch Hangrutschung Moosfluh

## Instabile Hänge

Der Rückzug der Gletscher durch die Klimaerwärmung bedeutet nicht nur eine tiefgreifende Veränderung des Wasserhaushalts. Auch die unmittelbare Stabilität der umliegenden Berghänge ist gefährdet. Gletscher stützen den umliegenden Hangfuss mit einem Druck von 35 Bar. Durch das Schwinden der Gletscher geht diese Stützfunktion verloren, und grosse Massen geraten in Bewegung. Im Gebiet Moosfluh am Fuss des heutigen Grossen Aletschgletschers bewegen sich 150 Mio.m<sup>3</sup> kristalliner Gneis und Granit-Gestein mit mehreren Metern pro Jahr talabwärts.<sup>11</sup> Solche grossen Bewegungen gefährden umliegende Infrastrukturen und werden genau beobachtet.

## Schwindender Permafrost

Mit den Gletschern schmilzt auch der Permafrost. In den Alpen geschieht dies zurzeit besonders schnell. Der Begriff Permafrost beschreibt in erster Linie einen Untergrund, welcher mindestens 2 Jahre hintereinander eine mittlere Temperatur von unter 0 °C aufweist<sup>12</sup>. Somit können sowohl Böden, Schutthalden und Felswände als Permafrost gelten. Mit ca. 5% der Landfläche bedeckt der Permafrost bereits heute mehr Fläche als die Gletscher.<sup>13</sup>

11 <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/dossiers/rutschung-moosfluh.html>

12 Siehe Etzelmüller et al 2020, S.1

13 [https://www.alpenverein.de/natur-klima/naturschutzverband/die-alpen/alpiner-permafrost-klimazeiger-und-klebstoff-der-alpen\\_aid\\_28517.html](https://www.alpenverein.de/natur-klima/naturschutzverband/die-alpen/alpiner-permafrost-klimazeiger-und-klebstoff-der-alpen_aid_28517.html)



Abb.15 Auch die Hänge beginnen zu fliesen

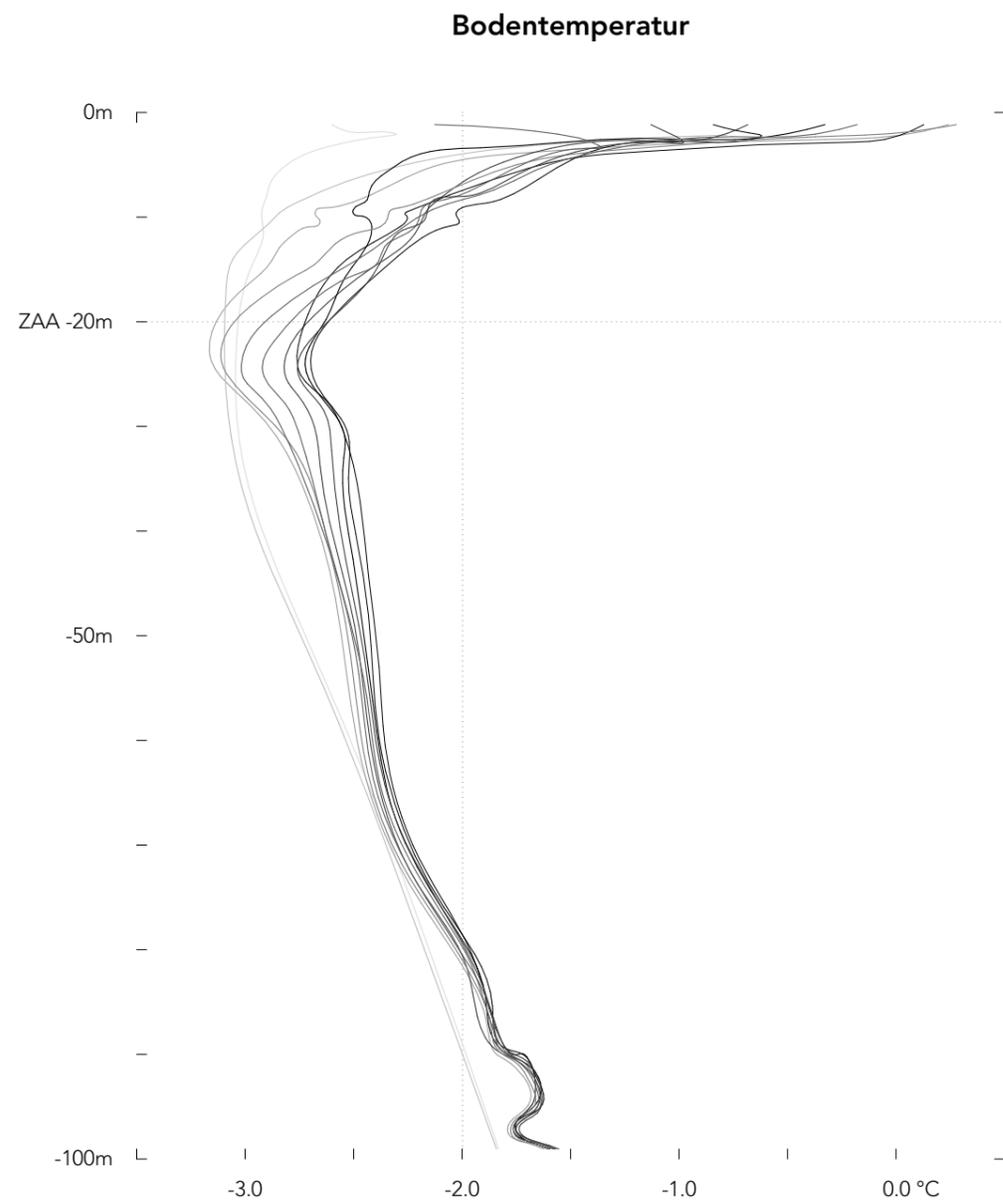


Abb.16 Temperatur in Permafrostböden

Gesteinsmassen bilden in den Bergen fast nie einen homogenen Untergrund. Meistens sind sie zerklüftet und von sogenannten Eislinsen durchzogen. Sobald sich dieses Eis auftaut, geht die Haftwirkung zwischen den Schichten verloren und bereits ab einer Temperatur von  $-2^{\circ}\text{C}$  droht ein Stabilitätsverlust. Der Permafrost funktioniert gewissermaßen als ‚Kleber‘ der Alpen. Die Rolle des Permafrosts in Verbindung mit möglichen Naturgefahren wurde kaum vor den 1990er erkannt und studiert.<sup>14</sup>

Ein typischer Permafrost-Boden besteht in den ersten paar Metern aus einer veränderlichen Auftauschicht, dann folgt der eigentliche Permafrost-Körper, welcher hunderte Meter tief sein kann, darunter liegen ungefrorene Schichten in grosser Tiefe.<sup>15</sup> Heute geht man davon aus, dass ein Grad Erwärmung der Luft eine Erwärmung bis in 60m Tiefe verursacht.<sup>16</sup> Obwohl es sich um ein relativ junges Forschungsfeld handelt ist man sich einig, dass mit der Klimaerwärmung der Permafrost auftaut und somit die Instabilität sowie die Wahrscheinlichkeit von Sturzereignissen zunimmt. Bereits in den letzten Jahrzehnten hat die Häufigkeit und Grösse solcher Ereignisse zugenommen und es ist zu erwarten, dass sich dieser Trend fortsetzen wird, auch an Lagen die bisher als sicher gegolten haben<sup>17</sup>.

Verschieden Faktoren bestimmen, wie schnell sich der Permafrost auftaut, darunter die Lufttemperatur, Höhenlage, Hangexposition und Geologie (Zerklüftung). Ab 3000 m.ü.M. an Südhänge und ab 2400-2600 m.ü.M. an Nordhänge kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von Permafrost ausgegangen werden. Eine Bedeckung durch Schnee und Schutt wirkt isolierend und verzögert ein Auftauen. Mit Eis und Schmelzwasser gefüllte Risse im Fels leiten die Wärme schneller als das Gestein selbst und beschleunigen den Stabilitätsverlust. Auch die Geo-

14 Siehe Etzelmüller et al 2020, S.1

15 [https://www.alpenverein.de/natur-klima/naturschutzverband/die-alpen/alpiner-permafrost-klimazeiger-und-klebstoff-der-alpen\\_aid\\_28517.html](https://www.alpenverein.de/natur-klima/naturschutzverband/die-alpen/alpiner-permafrost-klimazeiger-und-klebstoff-der-alpen_aid_28517.html)

16 Siehe Haerberli 2020, S.100

17 Siehe Günzel und Haerberli: Einfluss der Permafrostdegradation auf Hangstabilität, 2020, S.315



Abb.17 Die Häufigkeit und Grösse von Sturzereignissen wird zunehmen

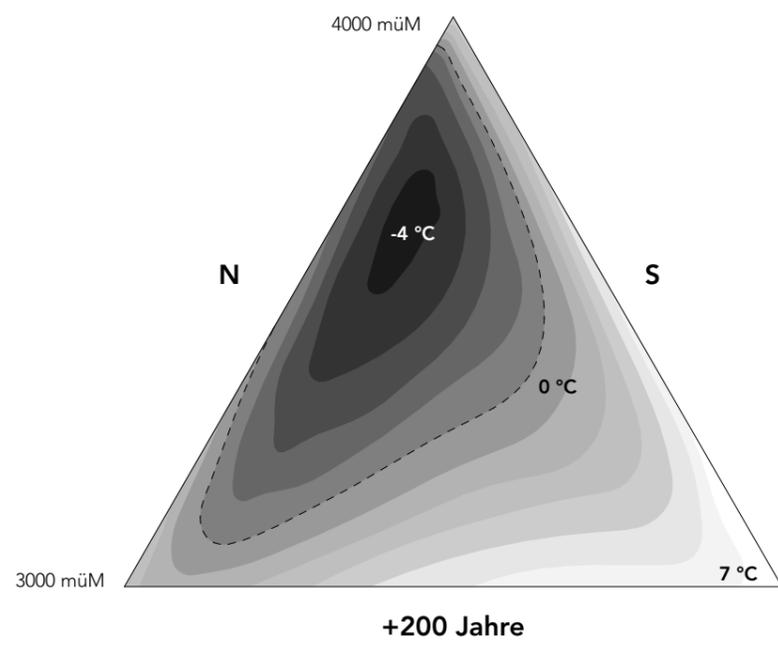
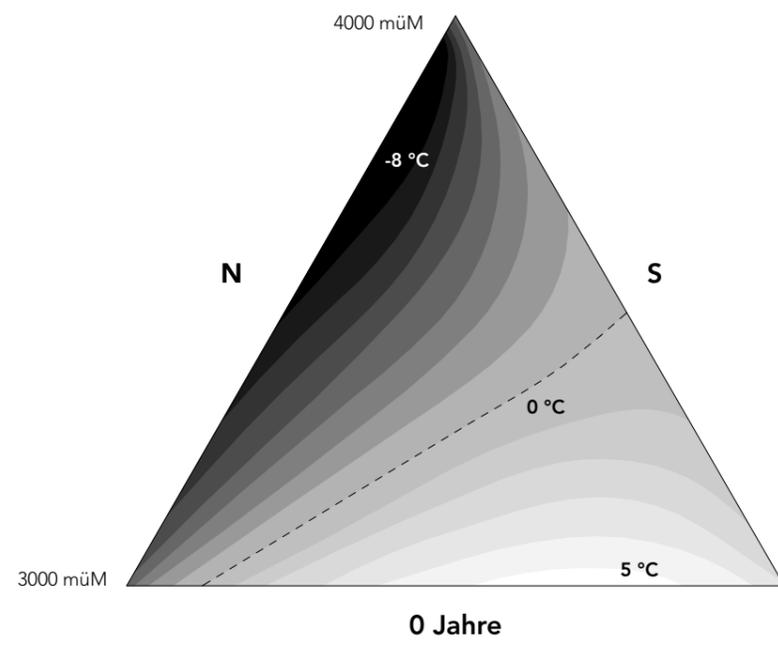


Abb.18 Tauvorgang und Gebirgs-Geometrie

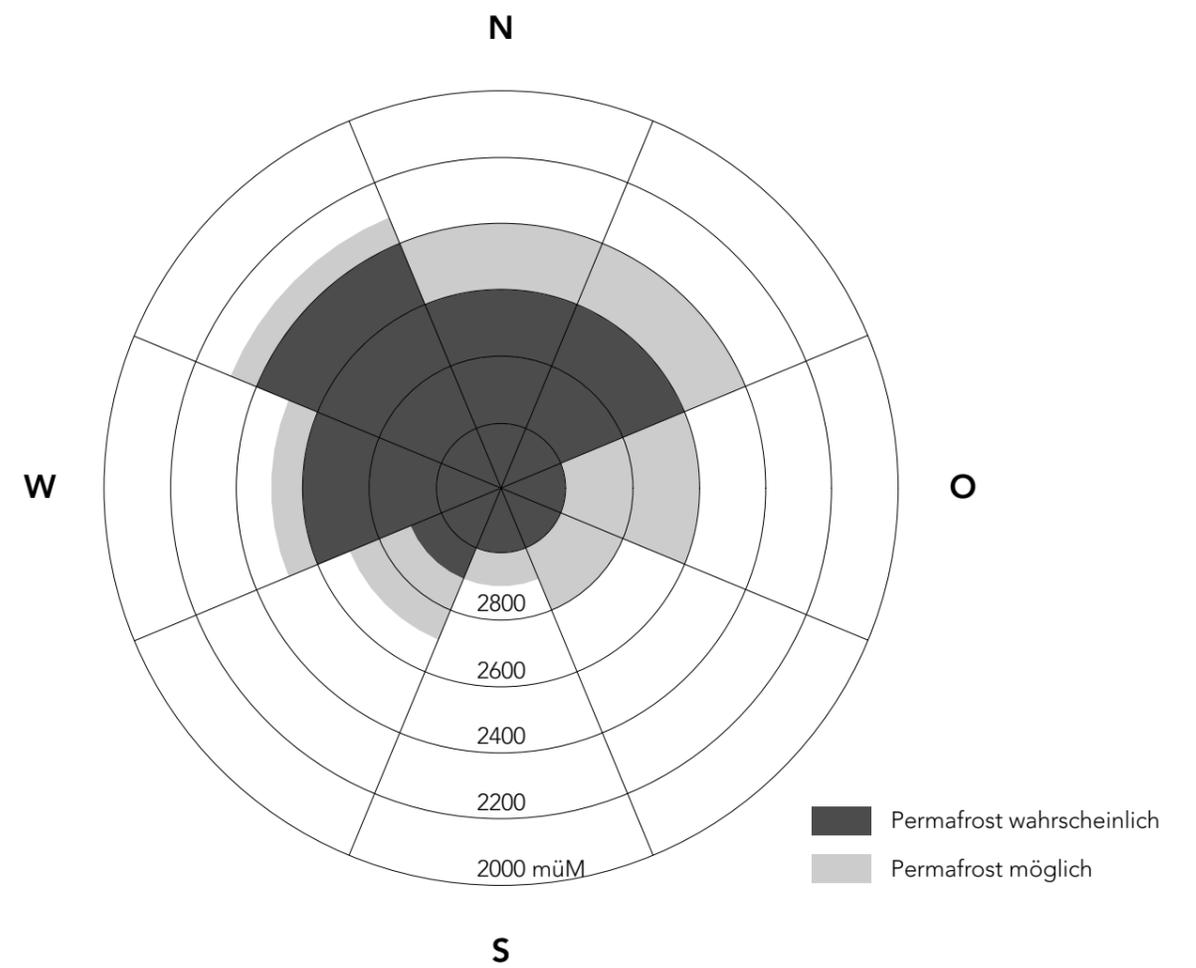


Abb.19 Tauvorgang und Hang-Ausrichtung

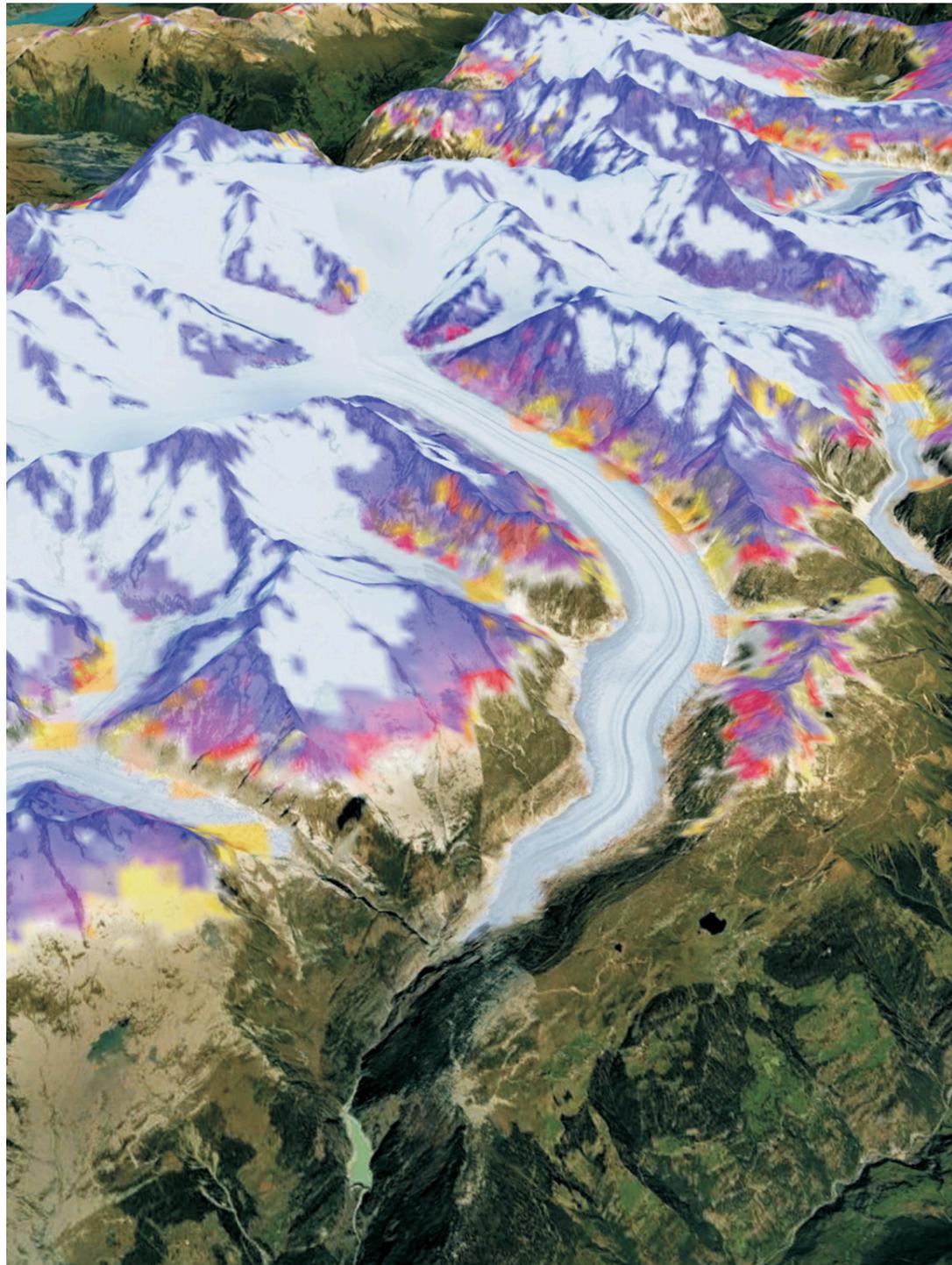


Abb.20 Steilhänge mit Permafrost oberhalb des Grossen Aletschgletschers

metrie eines Berges ist entscheidend: konvexe Formen wie Bergkanten und Gipfel tauen schneller auf als weniger exponierte Stellen.

### Permafrost an Steilhängen

Als Steilhänge gelten Hänge ab  $37^\circ$  Neigung. Diese weisen aufgrund ihrer Steilheit fast keinen Schutt mehr auf und bestehen somit vorwiegend aus Fels. An Steilhängen ist Permafrost schwierig zu erforschen. Von historischen Baustellen im alpinen Raum weiss man, dass schon 50cm dicke Eislinen in 100m Tiefe gefunden wurden.<sup>18</sup> Genaue Zusammenhänge fehlen. Trotzdem gilt die generelle Beobachtung, dass mehr Erwärmung zu vermehrtem Auftauen und somit zu mehr Sturzereignissen führt.<sup>19</sup>

Bei einem Sturzereignis sind verschiedene physikalisch Kräfte am Werk (Abb.21). Dabei ist auch die Festigkeit der Gebirge selbst entscheidend. Von Gebirge spricht man, sobald der Fels mit Trennlagen geschichtet ist. Somit hängt die Festigkeit von der Druckfestigkeit des Felsens und die Lage und Ausrichtung der Trennlagen ab.<sup>20</sup> Nebst der Festigkeit ist die Hanggeometrie ein wichtiger Faktor. Oberhalb von  $40^\circ$  Hangneigung besteht eine erhöhte Gefahr von Abbrüchen durch den Einfluss der Schwerkraft.

Wasser kann durch Risse und Felsspalten tief ins Gestein eindringen. So wird Wärme tief in den Felsen geleitet. Schmelzendes und wieder gefrierendes Wasser führt durch die Volumenveränderung zu inneren Druck-Spannungen und führt somit zu Abplatzung. Auftauendes Eis beginnt zu kriechen und löst sich von den Felsschichten.<sup>21</sup> Dagegen wirkt die Scherfestigkeit und das Eigengewicht der Gesteinsmassen. Wenn das Eigengewicht dieser Gesteinsmassen abnimmt (z.B. durch

18 Siehe Gruber und Haeberli, Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change, 2007, S.1-2

19 Siehe Gruber und Haeberli, 2007, S.7

20 Siehe Günzel und Haeberli, Einfluss der Permafrostdegradation auf Hangstabilität, 2020, S.309

21 Siehe Günzel und Haeberli, 2020, S.310

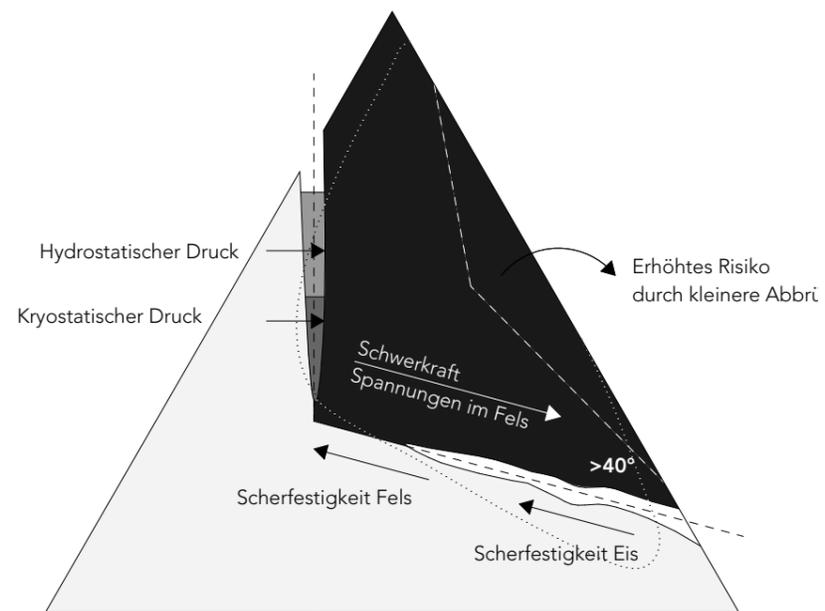


Abb.21 Physik eines Bergsturzes

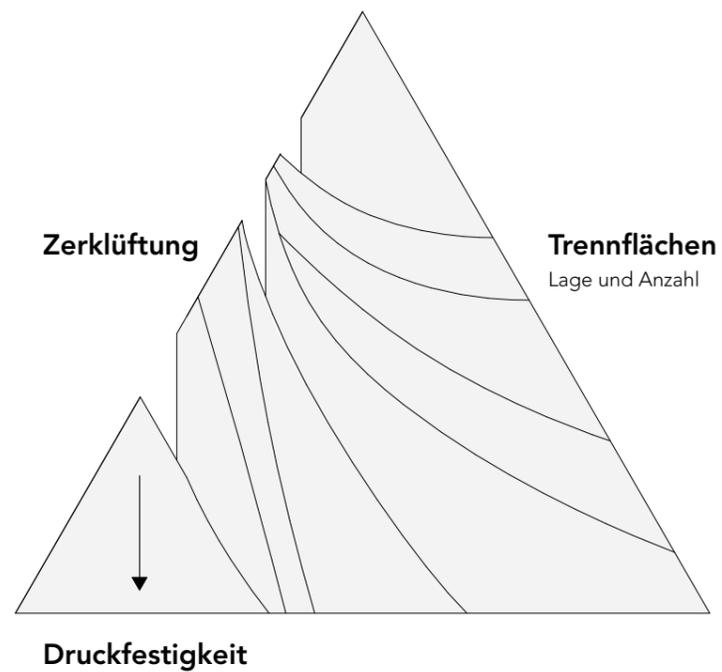


Abb.22 Festigkeit Gebirge

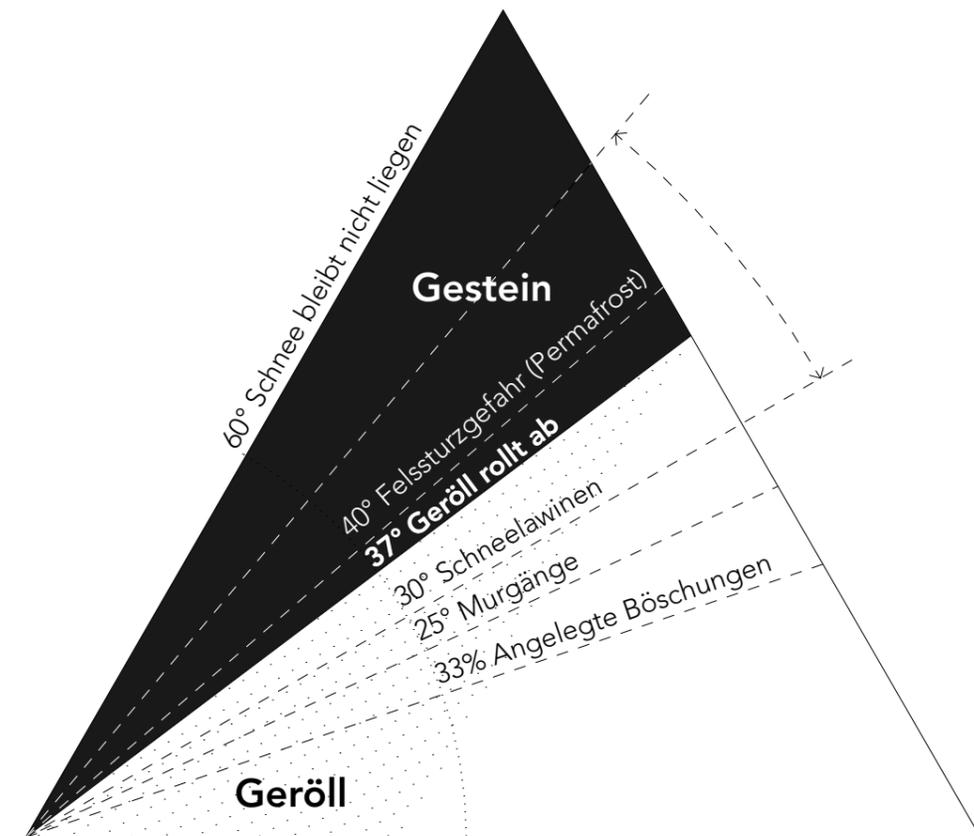


Abb.23 Hangneigungen und Gefahrenpotential



Abb.24 Blockgletscher im Schweizer Nationalpark

kleinere Steinschläge) kann das Gleichgewicht kippen. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit grösserer Abbrüche in der Folge von kleineren Oberflächen-Abbrüchen mit der Zeit immer mehr zunimmt.<sup>22</sup>

Bergstürze haben ein grosses Potential für Massenbewegung und setzen eine unglaubliche Menge an Lageenergie frei. Solche Hoch-Energie-Stürze verursachen auch unvorhersehbare Folgeereignisse. Der Bergsturz am Piz Cengalo pulverisierte durch seine Wucht einen darunterliegenden Rest eines Gletschers und setzte daraufhin einen Murgang bis ins Tal frei. Solche Kettenreaktionen stellen eine erhebliche Gefahr dar<sup>23</sup>. Ein Bergsturz in einen neuen Gletschersee könnte schockartige Flutwellen und lokale Hochwasser freisetzen. Bereits heute ereignet sich alle paar Jahre ein ‚Millionen-Sturz‘ mit mehreren Mio. m<sup>3</sup> Material. In den meisten Fällen ist der Faktor Eis beteiligt, die Sturzbahn reicht oft bis unter die Waldgrenze. Aber auch kleinere Events nehmen zu wie Stein- und Blockschläge, welche Mensch und Tier gefährden. Das Leben und Unterwegssein in den Alpen wird allgemein gefährlicher.

### **Kriechende Schutthalden**

Als gut sichtbares Phänomen des tauenden Permafrosts gelten die Blockgletscher. Dabei handelt es sich um ein Schutt- und Eisgemisch. Das Eis reduziert die innere Reibung zwischen den Steinen. Beim Auftauen beginnt die ganze Masse zu kriechen (0.1-1.0 m/a). Viele dieser Blockgletscher sind seit Ende der letzten Eiszeit gemächlich gewachsen und fliessen langsam den Hang hinunter. In ihrem Gesteinsanteil ist ein Jahrtausend alte geologische Geschichte enthalten. Mit der Klimaerwärmung beschleunigt sich das Kriechen. Der Auftauprozess erfolgt allerdings sehr langsam (Gesetze der Wärmediffusion). Diese trägen Riesen werden sogar die Gletscher überdauern.<sup>24</sup> Gefährlich werden sie, wenn die Stirn in einen stärker geneigten Hang vorstösst. Dies kann

22 Siehe Günzel und Haeberli, 2020, S.309-310

23 Siehe Haeberli und Maisch, 2017, S.105-106

24 Siehe Günzel und Haeberli, 2020, S.312-313

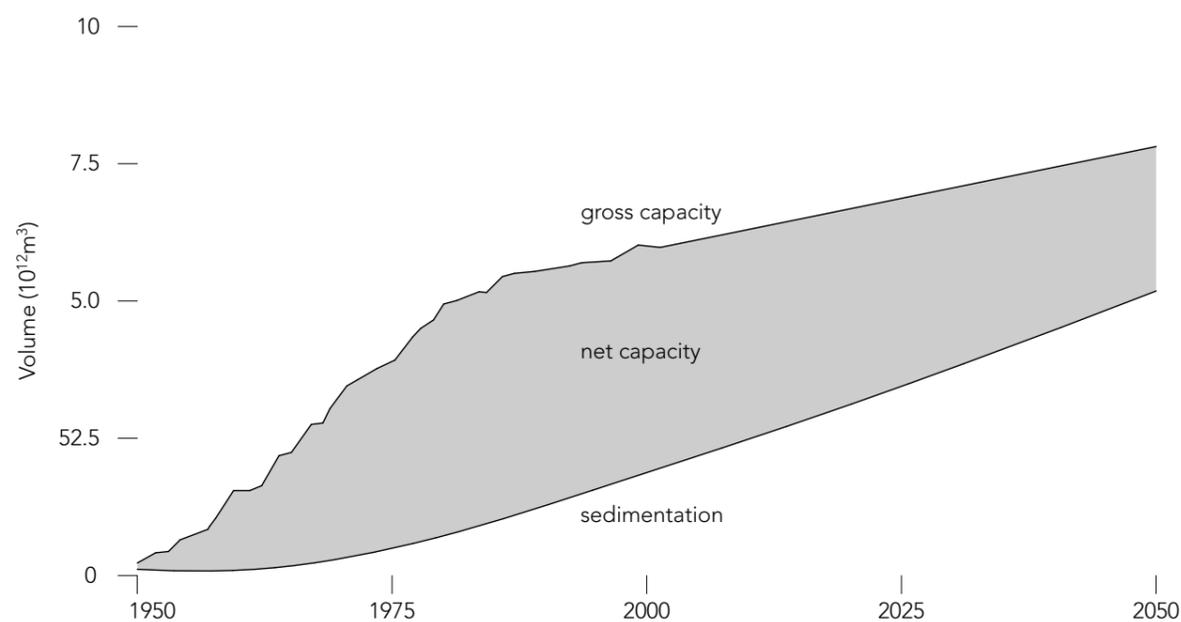


Abb.25 Verlandungsrate globaler Stauseen

wiederum Murgänge etc. auslösen. In Pontresina wurde zur Verhinderung dieses Szenarios eine Reihe von Schutzwällen errichtet.

### Murgänge

Murgänge sind geläufiger als Schlammlawinen bekannt und bestehen aus einem Wasser-Gesteinsgemisch mit hohem Feststoffanteil. Das meiste Material wird in raschen und spektakulären Ereignissen talwärts getragen mit Geschwindigkeiten bis zu 60 km/h. Ein Murgang entsteht, wenn wenig gefestigtes Material mit Wasser übersättigt wird und durch die Schwerkraft in Bewegung gerät<sup>25</sup> (ab Hangneigung 25°).

Mögliche Auslöser sind hohe Niederschläge, Abschmelzen von Gletschern, Permafrost und Seeausbrüche in instabilen Moränen-Schutthängen<sup>26</sup>. Murgänge folgen meist best. Bachläufen. Grosse Steine und Blöcke konzentrieren sich an der Murfront, viel Material wird bereits unterwegs abgelagert. Im Talboden läuft das Material zu einem Murkegel aus.

### Sedimentation, Geschiebe und Verlandung

Jährlich wird weltweit 1% des Speichervolumens der Wasserkraft mit Sedimenten gefüllt. Bereits 2010 wurde weltweit durch die Verlandung der Seen mehr Speichervolumen verloren als das neue Speichervolumen ausgebaut wurde. Diesem Trend folgend würden alle Speicherseen bis 2100 aufgefüllt werden, falls nicht entsprechende Vorkehrungen getroffen werden. Besonders betroffen sind Speicherseen im Asiatischen Raum, aber auch Speicherseen, die direkt im Gletschervorfeld liegen und einen höheren Abtrag aufweisen (z.B. Gibidum<sup>27</sup>). Der höhere Abtrag lässt sich durch die fehlende Vegetation im Gletschervorfeld und den vermehrten Starkniederschlägen erklären<sup>28</sup>. Eine Talsperre wirkt

25 Siehe Haeberli und Maisch, 2017, S.105-106

26 Siehe Haeberli und Maisch 2017, S.106

27 Die Turbinen der Kraftwerkszentrale in Naters werden mit 40 Tonnen Sedimente pro Stunde belastet

28 Schleiss und De Casare et al, Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft, 2010, S.33

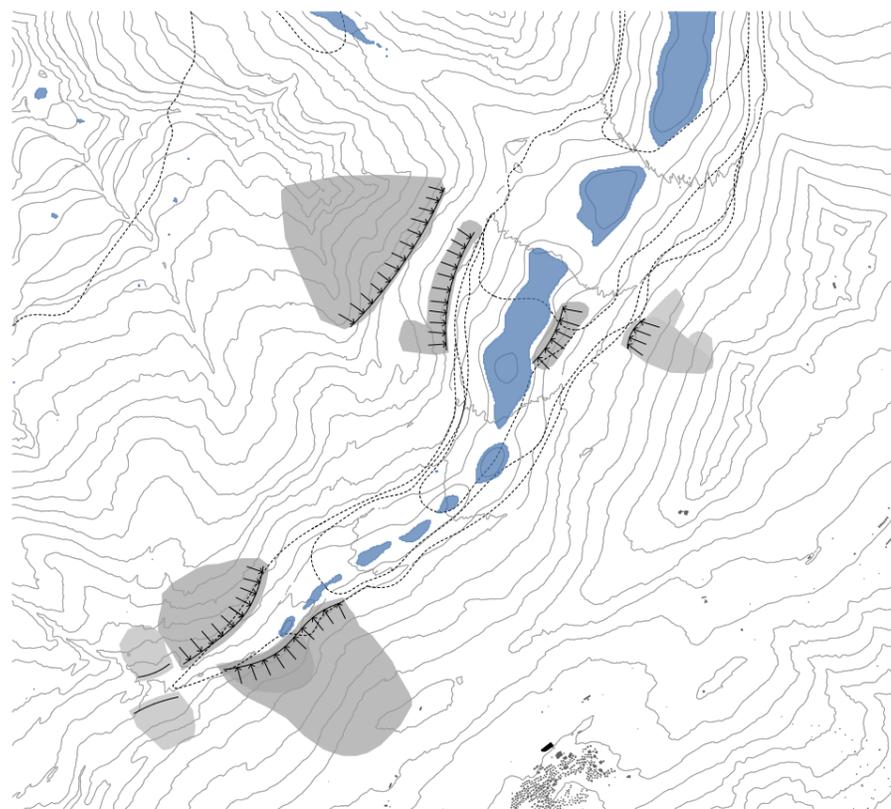


Abb.26 Simulation Seeausbruch



Abb.27 Überflutungs-Prognose Naters bei Seeausbruch

wie eine natürliche Senke für die Sedimente. Das beeinflusst auch das Ökosystem von darunterliegenden Gewässern. So sind z.B. gewisse Fische und Pflanzenarten auf einen bestimmten Anteil Sedimente und Geschiebe im Wasser angewiesen<sup>29</sup> (Als Geschiebe werden grössere Steine bezeichnet, welche entlang des Flussbettes befördert werden).

Massnahmen: Spülen, Absaugen, künstliches Fluten. Evtl. könnten neue Gletscherseen einen Teil des Geschiebes Zurückhalten.

### Erhöhtes Gefahrenpotential durch Prozessketten

Das Unglück am Piz Cengalo hat gezeigt, wie neue und unvorhersehbare Gefahrenketten in Zukunft aussehen könnten. In diesem Fall fiel ein Bergsturz auf einen bereits mit Wasser gesättigten Boden und pulverisierte durch die Wucht den Rest eines Gletschers. Dadurch entstanden mehrere Murgänge, mit gravierenden Folgen für die Ortschaft Bondo im Talboden.<sup>30</sup>

Insbesondere die neuen Seen kombiniert mit zunehmender Hanginstabilität könnten im Zentrum solcher Prozessketten stehen. Wenn grosse Felsmassen (oder ein Eisabbruch wie am Triftgletscher<sup>31</sup>) einen See treffen, wird das schockartige Flutwellen produzieren, welche zusätzliche Schäden verursachen können. Das Wasservolumen würde dabei das des Felssturzes um ein Mehrfach übertreffen. Gerade die Aletsch Region wird diesbezüglich ein besonderer ‚hot spot‘ werden. Eine Simulation hat ergeben (Abb.26/27), dass bereits ein Teilausbruch eines Sees mit 20 Mio. m<sup>3</sup> Wasser die Stadt Brig/Naters erheblich treffen würde.<sup>32</sup> Solche Seeausbrüche könnten jedoch auch ohne Einwirkung von Sturzmassen verursacht werden, wenn z.B die Uferkannten eines Sees aus instabilen Schuttmoränen bestehen und dem Wasserdruck nicht mehr standhalten können. In einem anderen Fall könnte ein kleiner Murgang aus einer Seitenrinne den Abfluss verstopfen und als temporäre Tal Sperre wirken, um dann wieder verzögert einen Ausbruch zu produzie-

29 Siehe Geschiebe- und Habitatsdynamik, Bafu 2017

30 Siehe Haerberli 2020; Regio

31 Siehe Haerberli und Maisch 2017

32 Siehe Haerberli 2020; Regio



Abb.28 Felssturz in einen Gletschersee bei Grindelwald



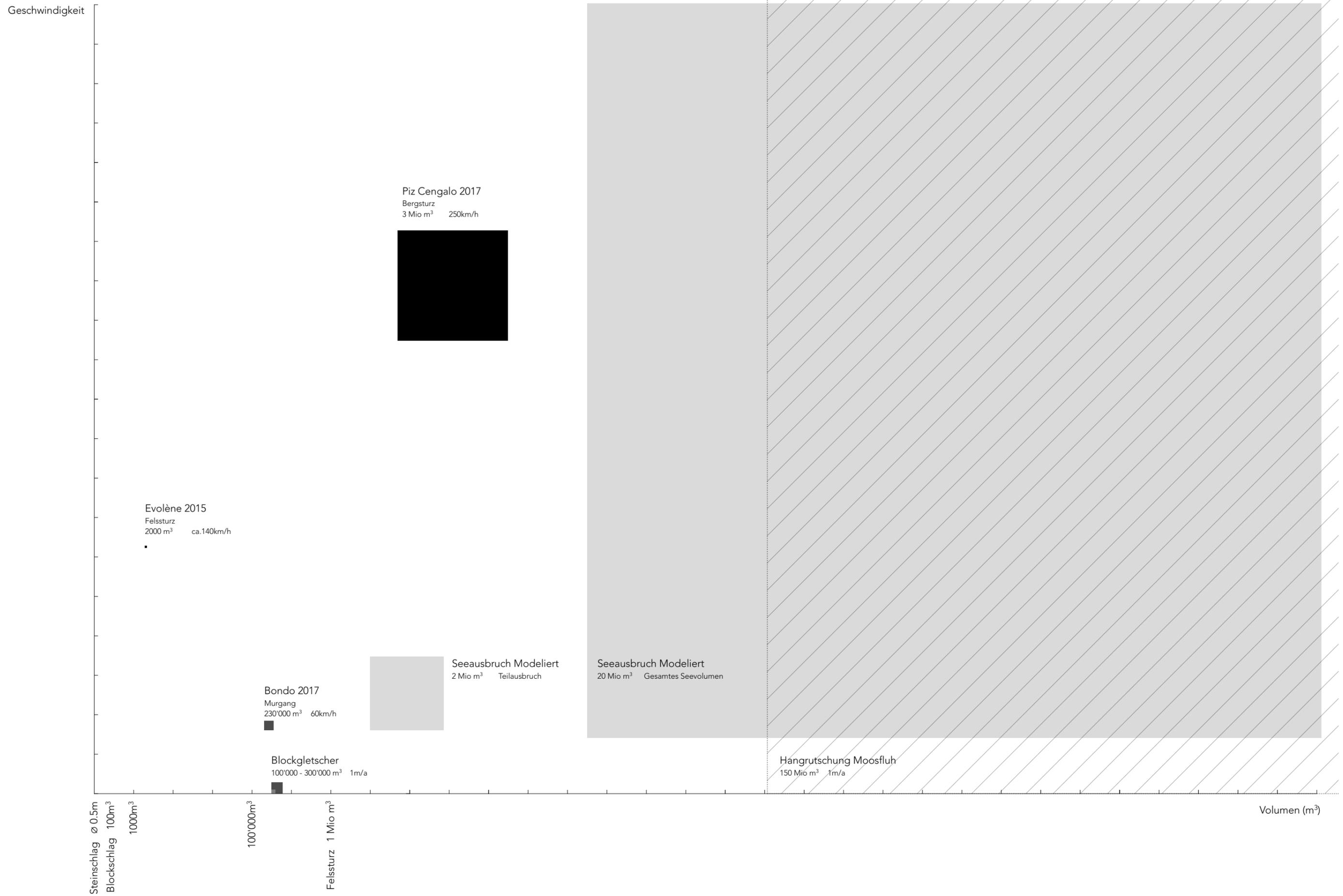
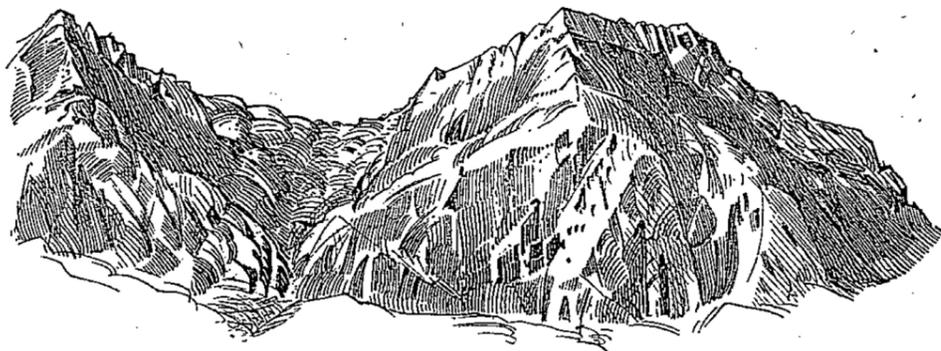
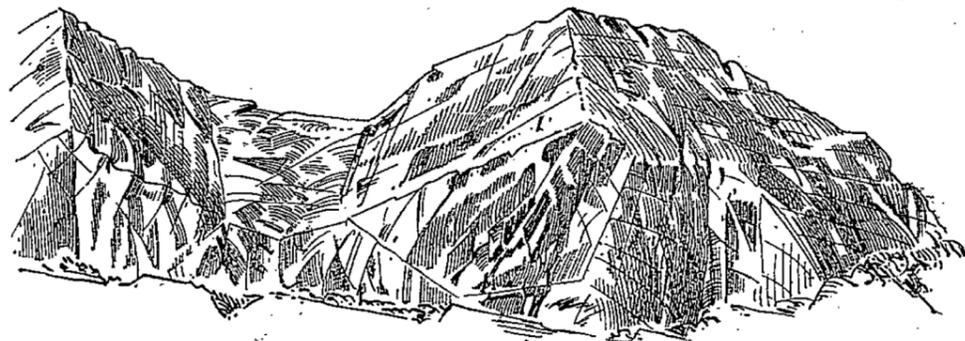
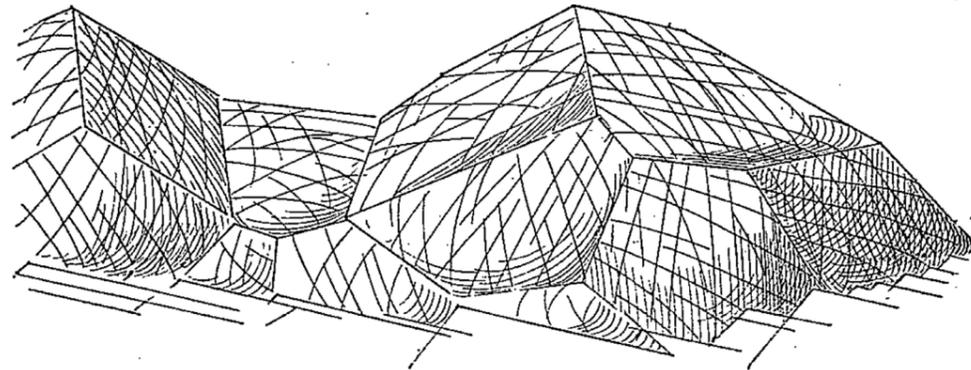


Abb.29 Größen und Geschwindigkeiten der Massenbewegungs-Phänomene

A



B



36 bis. — Modifications apportées à un sommet. (P. 76.)

Abb.30 Viollet-le-Duc, le Massif du Mont-Blanc

ren.<sup>33</sup> Das „Ausmass und die Geschwindigkeit dieser Vorgänge dürfte n weit jenseits historischer Erfahrungswerte liegen“.<sup>34</sup>

### Zusammenfassung

Durch die Veränderungen im Wasserhaushalt und das Schmelzen des Eises (Gletscher und Permafrost) werden die Berghänge zunehmend instabil und unberechenbar. Die bereits beschriebenen Phänomene wie Hanginstabilität, Blockgletscher, Solifluktion (Form der Bodenbewegung), Murgänge, Felsstürze, Steinschläge, Geschiebe, Sedimentation und Seeausbrüche weisen unterschiedliche Zeitlichkeiten und Grössen auf. Der gemeinsame Nenner ist die Verflachung der Landschaft durch die gesteigerte Entropie des Systems: die ‚Lage-Energie‘ der Gebirge baut sich ab, was fest war wird flüssig.

Zwar sind solche Phänomene alles andere als neu. Zahlreiche Orte wurden im Verlauf der Geschichte schwer oder völlig durch eben solche Ereignisse zerstört. Gerade im alpinen Raum herrscht eine eigene Kultur für den Umgang mit Sturzgefahren, sowohl im Verhalten wie man z *Berg geht*, wie auch in der Architektur der Schutzbauten. Jedoch dürfte die historische Dimension dieser Prozesse bald gesprengt werden<sup>35</sup>: immer häufigere, grössere und unberechenbarere Naturkatastrophen werden eintreten. Unser Bild der soliden Alpen gerät zunehmend ins Wanken. Auch diverse neue Gefahren durch Prozessketten kommen hinzu, insbesondere in Verbindung mit den neuen Seen. Auch die Wasserkraft ist mit der Verlandungs-Thematik direkt von den Veränderungen betroffen, könnte aber auch unter Umständen einen Beitrag zum Hochwasserschutz leisten. Der Mensch wird immer mehr unternehmen müssen, um in dieser neuen Landschaft bestehen zu können. Hier sind auch neue Ansätze für den Umgang mit diesen dynamischen Prozessen gefragt.

33 Siehe Haerberli und Maisch 2017, S105-106

34 Haerberli und Maisch 2017, S.107

35 Siehe Haerberli und Maisch 2017, S.107



Abb.31 Gletscherflöhe

# BIOSPHERE.

## Höhenwanderung

Mit der steigende Nullgradgrenze wandert auch die alpine Pflanzenwelt in die Höhe. An manchen Orten steigt die theoretische Baumgrenze um bis zu 300m an, so auch im Gebiet des Aletschgletschers<sup>36</sup>. Die Höhe und Zusammensetzung der Arten ist schon immer einer Fluktuation im Verhältnis zum Klima und Gletscherausdehnung unterworfen gewesen<sup>37</sup>. Durch den sehr raschen Gletscherrückzug des 22.Jh. wird ein grosser eisfreier Bereich freigelegt werden. Die aggressivsten Arten werden sich in diesem neuen Umfeld durchsetzen, andere werden verschwinden. Die Subalpine Vegetations-Stufe könnte langfristig vollständig verdrängt werden. Konkret heisst das, dass an die Höhe gut angepasste Spezialisten wie Lärchen, Arven und Bergkiefern durch Arten der darunterliegenden Montanen Stufe wie Tannen und Fichte verdrängt werden könnten. Ein Grund dafür ist, dass sich diese schneller ausbreiten können, während z.B. die Arve auf Vögel angewiesen ist, um seine Samen zu verbreiten<sup>38</sup>. Die Diversität im Wald wird abnehmen.

## Biodiversität

In den Gebieten der ehemaligen Gletschervorfelder kommt es jedoch zu einer verzögerten Entwicklung. Inmitten der Schuttmoränen und blankem Felswüsten müssen sich zuerst tragfähige Böden entwickeln,

<sup>36</sup> Höhenstufen, Bundesamt für Umwelt BAFU (Swisstopo)

<sup>37</sup> Burga, Conradin, Spät und nacheiszeitliche Einwanderung und Ausbreitung wichtiger Baumarten in der Schweiz, 2021, S.165

<sup>38</sup> <https://www.nzz.ch/wissenschaft/klima/klimawandel-in-den-alpen-fuer-die-arve-wird-es-eng-ld.1304067>

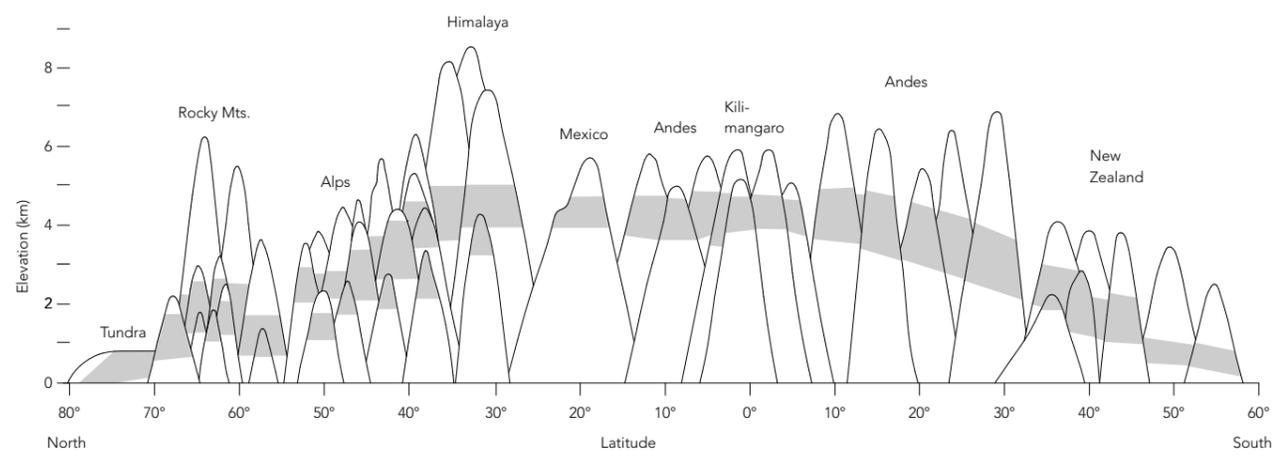


Abb.32 Höhe Alpiner Pflanzen

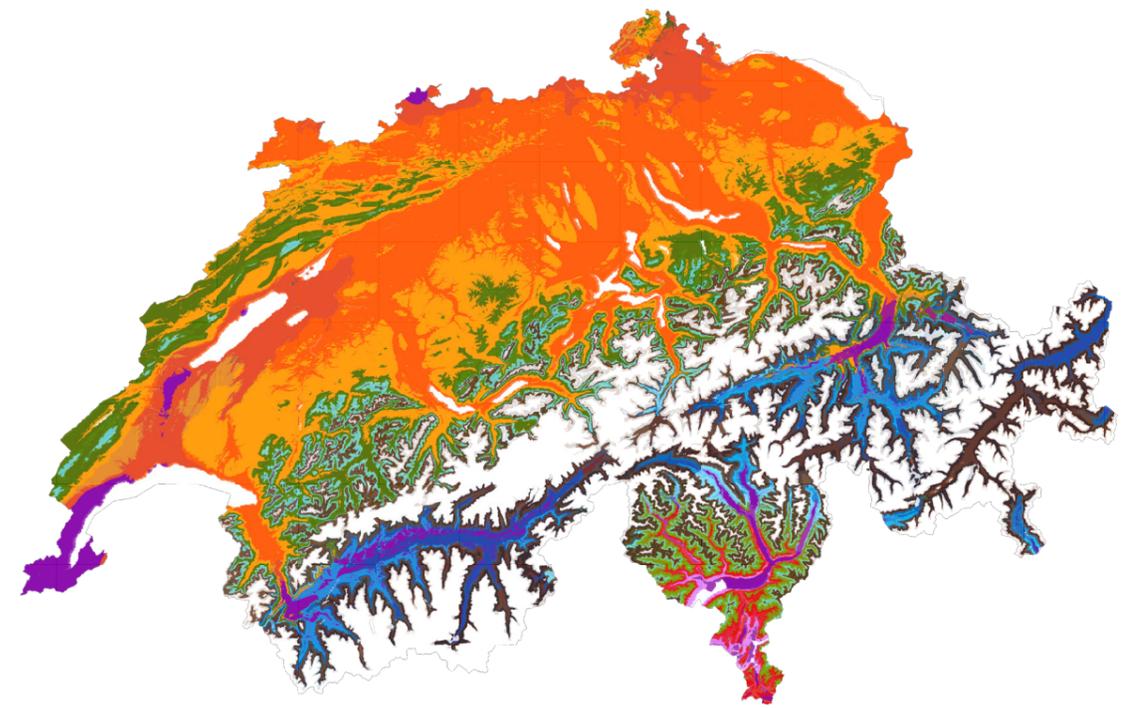


Abb.33 Höhenstufen Vegetation 2022

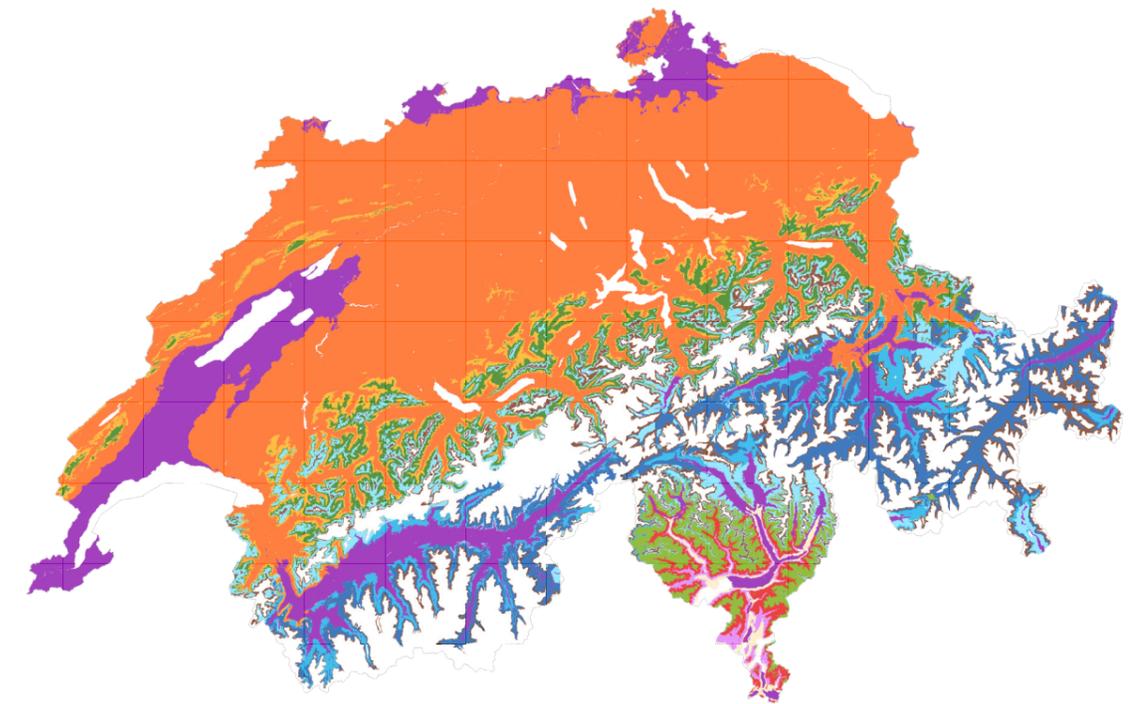




Abb.35 Ein Gewinner des Klimawandels: *Oxyria digyna*

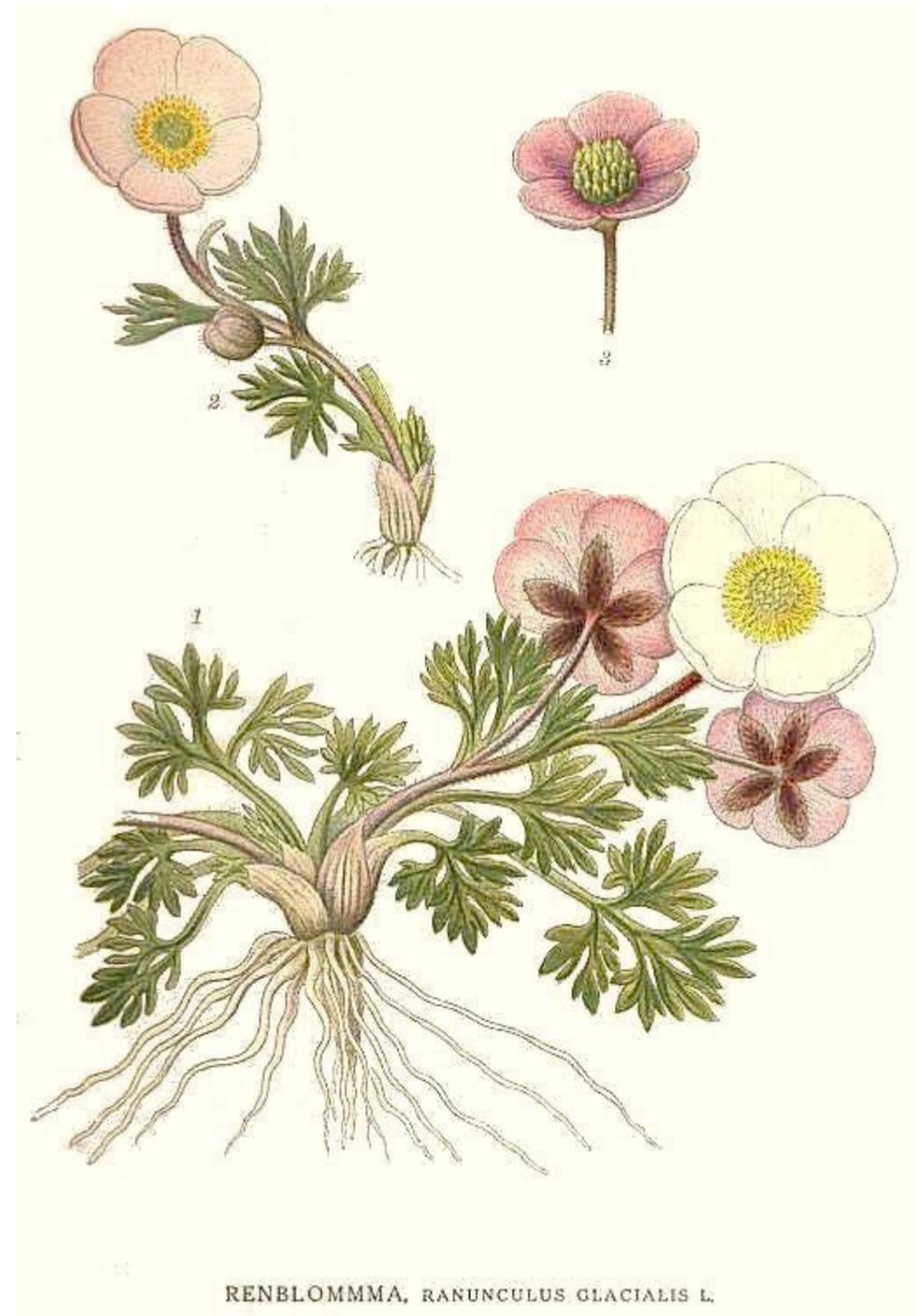


Abb.36 Ein Verlierer des Klimawandels: *Ranunculus glacialis*

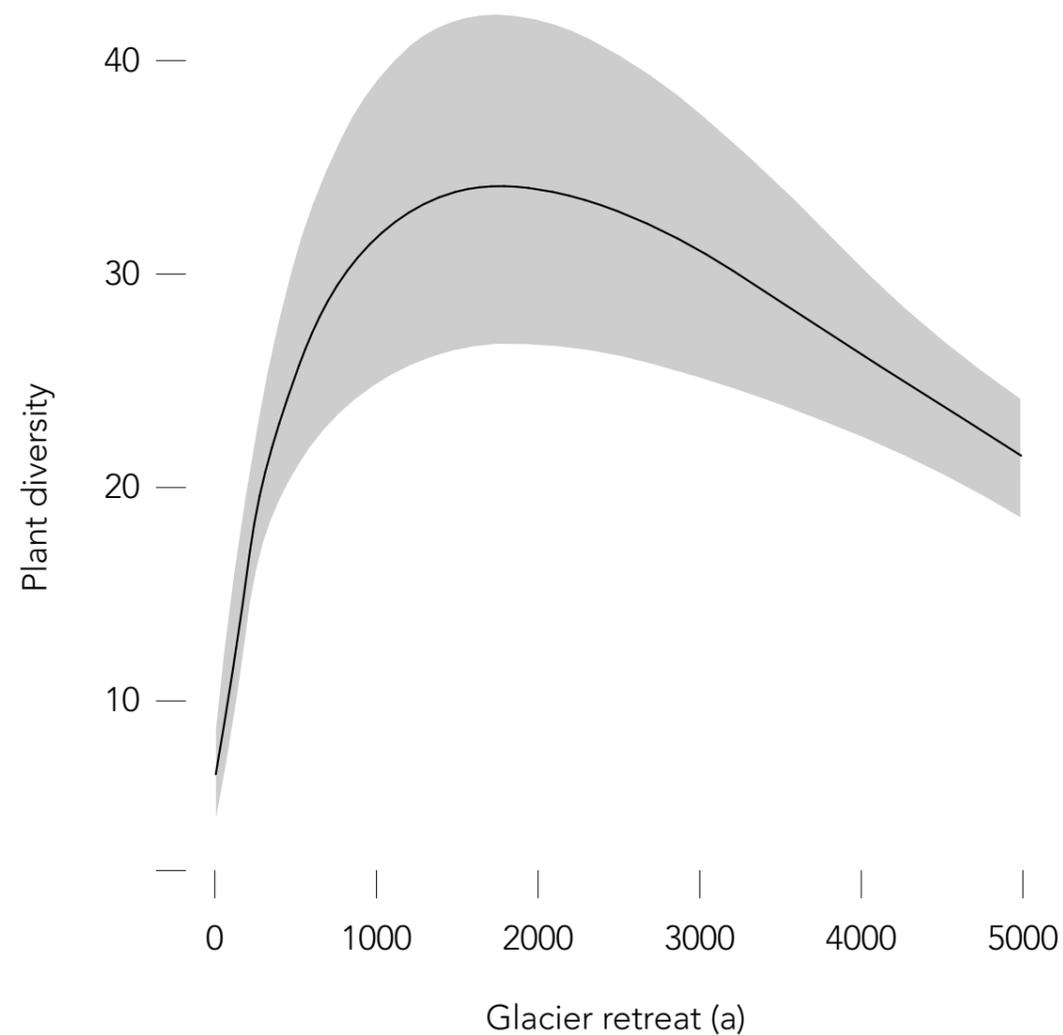


Abb.37 Entwicklung der Artenvielfalt nach dem Gletscherrückzug

damit grössere Pflanzen und Bäume sich ansiedeln können. Dieser Prozess verläuft nur sehr langsam im Verhältnis zur Geschwindigkeit des Gletscherrückzugs.

Die ersten Pflanzen, die sich in dieser kargen Umgebung etablieren sind Flechten. Danach kommen die Pionierpflanzen. Der zurückgezogene Gletscher bietet diesen resistenten Arten viel neuen Lebensraum. Kurzfristig wird sich die Artenvielfalt in Gletschervorfeldern deshalb massiv erhöhen. Diese Tendenz kann sich nicht längerfristig halten. Da diese Prozesse sehr schnell ablaufen, können sich oft keine stabilen Populationen bilden und es herrscht ein erhöhter Konkurrenzkampf. Aggressivere Arten setzen sich durch. Andere Pflanzen wie der Gletscher Hahnenfuss sind direkt vom Gletscher abhängig und werden mit ihnen aussterben<sup>39</sup>. Langfristig nimmt die Biodiversität aufgrund des Gletscherrückzugs ab. Eine Studie, welche 117 alpine Pflanzenarten untersucht hat, hat ergeben, dass etwa 22% mit den Gletschern verschwinden werden.<sup>40</sup>

### Schutzwald

Die steigende Vegetation wird in vielerlei Hinsicht zur Stabilisierung der stark erodierenden und von Massenbewegung betroffenen Hänge beitragen. Die Bewaldung von instabilen Hängen ist eines der besten Mittel um diese zu festigen und besiedelte Gebiete zu schützen. Zurzeit laufen diverse Versuche um herauszufinden, welche Arten sich mit dem neuen Klima am besten dafür eignen werden<sup>41</sup>. Die Bildung eines solchen Schutzwalds hängt nicht nur von den klimatischen Bedingungen, sondern auch von der Bildung tragfähiger Böden ab, was mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern wird<sup>42</sup>. Dabei werden kleinste Sedi-

39 [https://www.alpenverein.de/natur-klima/zusammenhang-von-alpenflora-und-gletschern\\_aid\\_36320.html](https://www.alpenverein.de/natur-klima/zusammenhang-von-alpenflora-und-gletschern_aid_36320.html)  
 40 Siehe Losapio et al, The Consequences of Glacier Retreat Are Uneven Between Plant Species, 2021, S.5  
 41 <https://www.slf.ch/de/ueber-das-slf/versuchsanlagen-und-labors/forschungsflaechen-gebirgsoekosysteme/versuchsaufforstung-stillberg.html>  
 42 Siehe Haeberli und Maisch, 2017, S.105

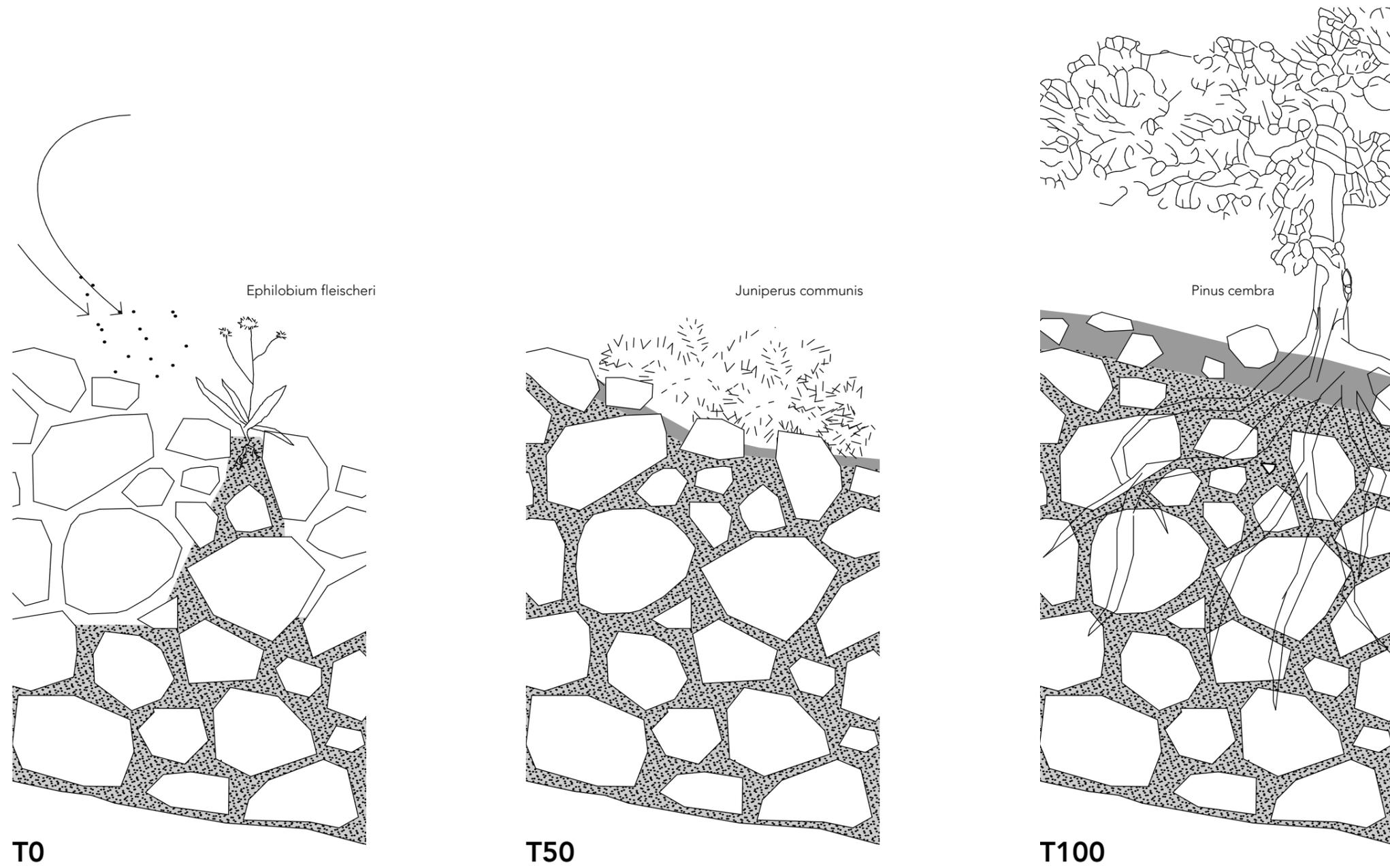


Abb.38 Die Bildung alpiner Böden in Moränen-Schutthalden

mente (oft durch den Wind) in die Spalten der Schutthalden getragen. So bilden sich zuunterst die ersten Sediment-Schichten und entwickeln sich dann langsam durch die Geröllhalden nach oben (Abb.38). Dadurch erklärt sich die langsame Natur dieser Prozesse. Nachdem sich erste Pionierpflanzen etabliert haben, kommt dann auch verwesendes Pflanzenmaterial hinzu, welches dünne Humusschichten bildet. Eine 30cm dicke Humusschicht braucht je nachdem Jahrtausende für seine Entstehung<sup>43</sup>.

Bis sich eine stabile Vegetation und Wald nach dem Gletscherrückzug gebildet hat, ist mit einer erhöhten Erosion und Gefahrenlage durch Sturzereignisse und Prozessketten zu rechnen. Die verzögerte Entwicklung der Vegetation bedeutet, dass der Mensch in der Zwischenzeit proaktiv den Naturgefahren mit baulichen Massnahmen entgegen muss. Die Alternative ist, sich ganz aus den Gefahrenzonen zurück zu ziehen und ganze Siedlungen aufzugeben.



Abb.39 Forschungen zum Schutzwald am Stillberg mit Lärchen, Arven und Bergkiefern



Abb.40 Pionierwald im ehemaligem Vorfeld des Oberaletschgletshers

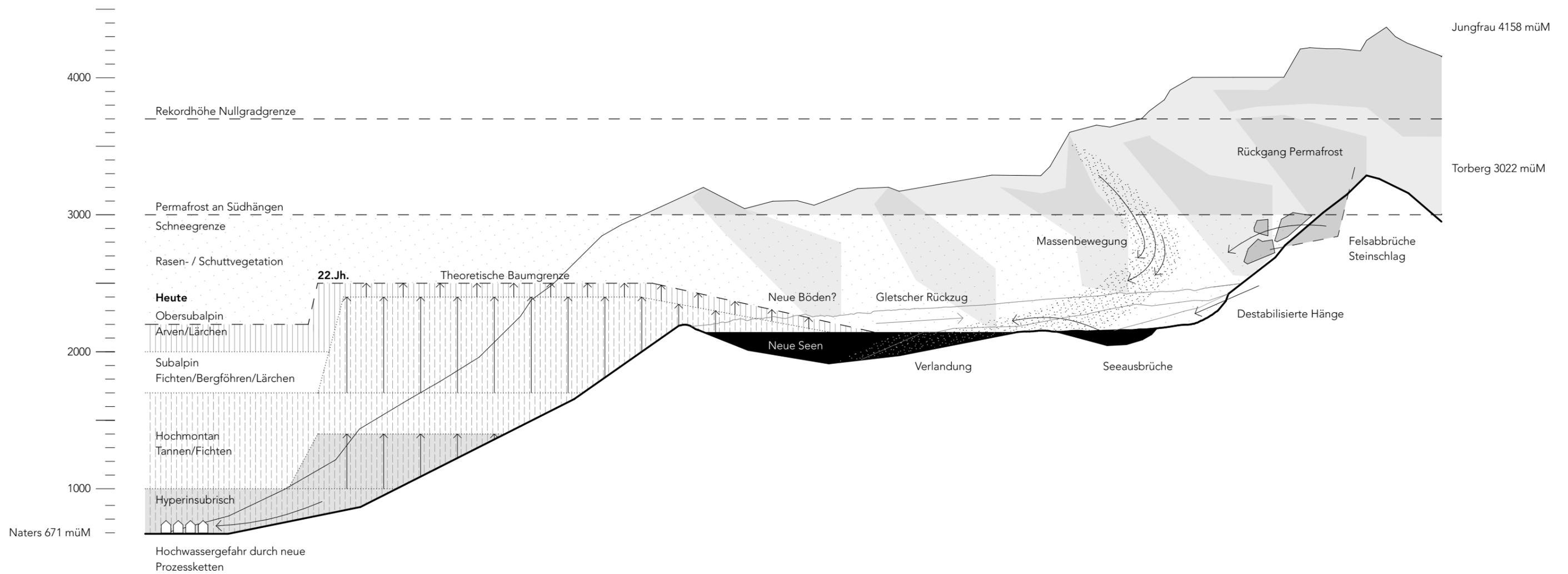


Abb.41 Übersicht über die Dynamik der neuen alpinen Landschaft im Gebiet Aletsch

# RESÜMEE.

## **Entropia: Verflüssigt, Verflacht, Verzögert**

Durch den Klimawandel werden verschiedene Prozesse beschleunigt, welche schon immer Teil der alpinen Lebenswelt waren. Mit dem Begriff Entropia wird versucht, einen gemeinsamen Nenner für all diese Phänomene zu finden. Durch die Verflüssigung des Wasserhaushalts, ausgelöst durch die steigenden Temperaturen, verschiebt sich der saisonale Abfluss und es wird weniger Wasser in den Bergen gespeichert. Durch den markanten Volumenverlust des Grossen Aletschgletschers werden die umliegenden Hänge zunehmend instabil. Auch der Permafrost schmilzt. Die Folgen sind eine Zunahme zahlreicher Massenbewegungsprozesse. Die Lageenergie der Berge baut sich schneller ab, die Alpen verflachen und vergrauen. In Kombination mit dem Phänomen der neuen Seen entstehen neue Gefahren durch Prozessketten, welche das historische Ausmass übersteigen werden<sup>44</sup>. Diese Prozesse dürfen sich nicht selbst überlassen werden, da ganze Stadtteile von Brig/Naters gefährdet sind. Zeitlich verzögert wird sich eine neue, aber weniger diverse Vegetation und Wald einrichten, was wieder mehr Stabilität und Sicherheit in das System bringen wird.

## **Folgen für die Wasserkraft**

Das Leben in Entropia wird anspruchsvoll werden. Durch das Aufzeigen der verschiedenen Zeitlichkeiten der involvierten Prozesse sieht man, dass schon ab den ersten freigelegten Seen eine erhöhte Gefahrenlage entsteht. Gleichzeitig fällt viel Schmelzwasser an, welches für die



Abb.42 Unser Bild der Alpen wird sich ändern

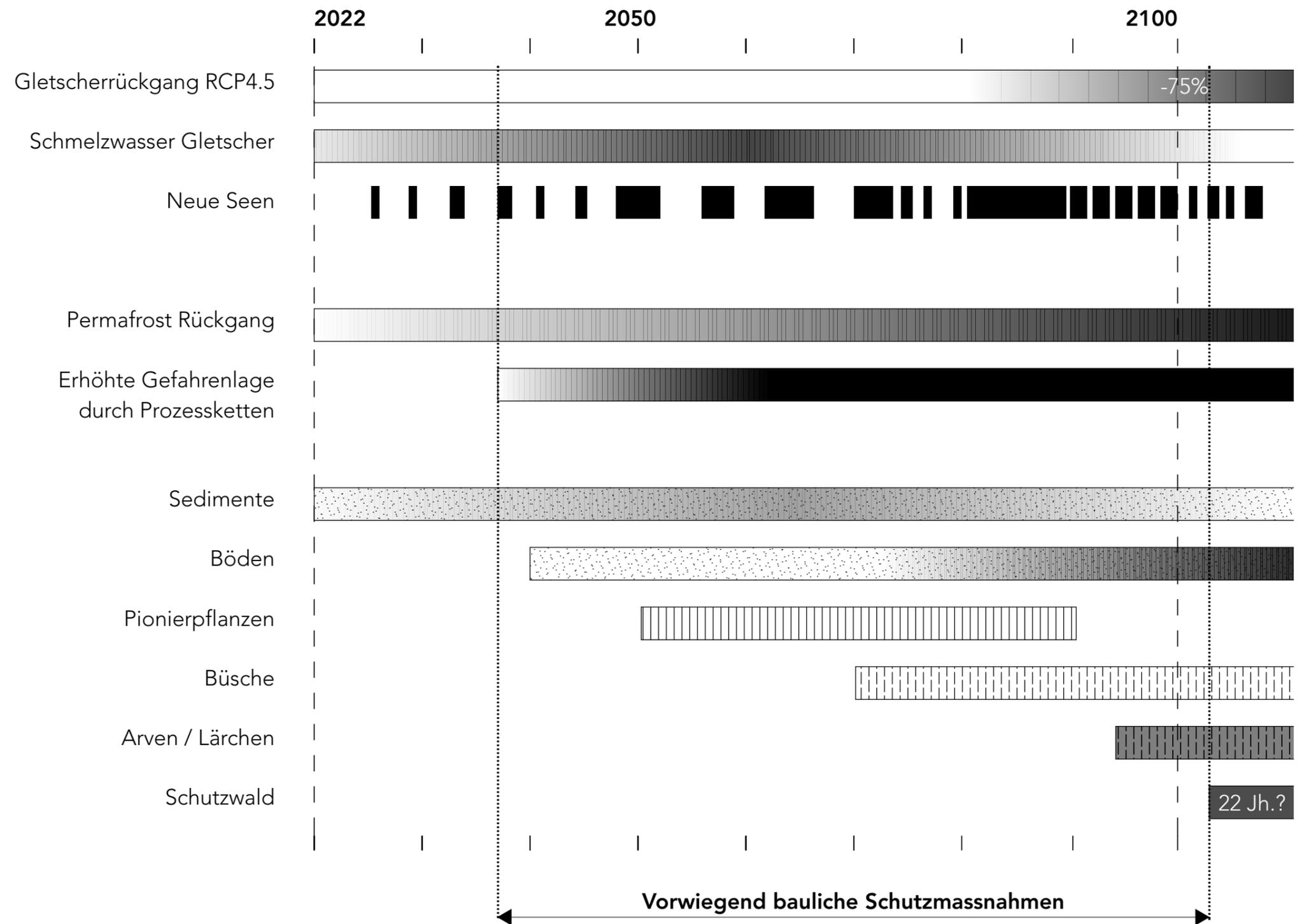


Abb.43 Die Zeitlichkeiten der neuen Landschaft

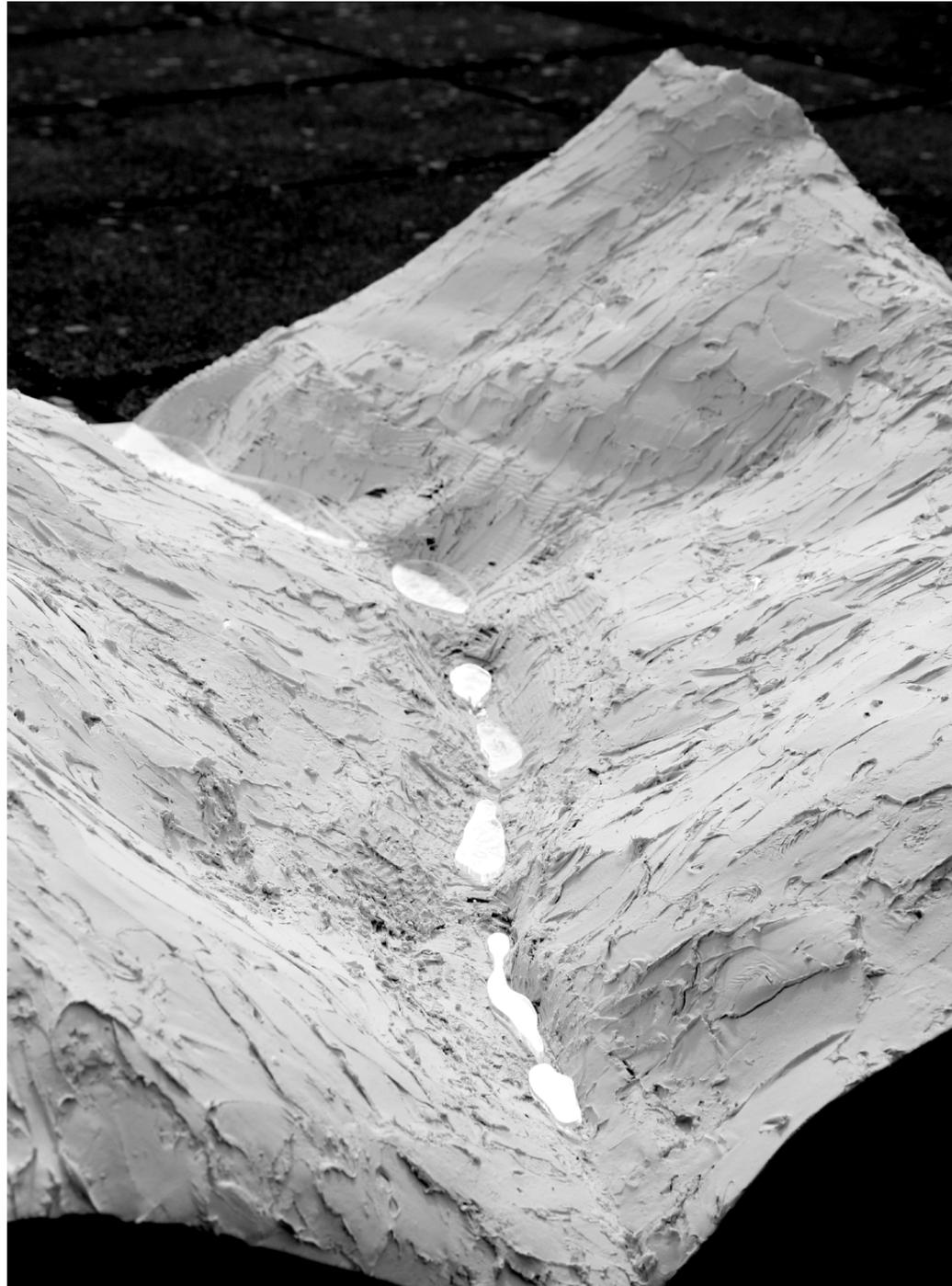


Abb.44 Modelfoto

Wasserkraft optimal genutzt werden könnte. Bis ein schützender Wald wächst, müssen nach dem Gletscherschwund bauliche Schutzmassnahmen realisiert werden, um diese besonders heikle Zeitspanne (Vegetation-Gap) als ‚Übergangsjekte‘ zu überbrücken. Solche Übergangsjekte könnten mit der Wasserkraft zusammen gedacht werden in einer Art zeitlich gedachten Multifunktionalität<sup>45</sup>.

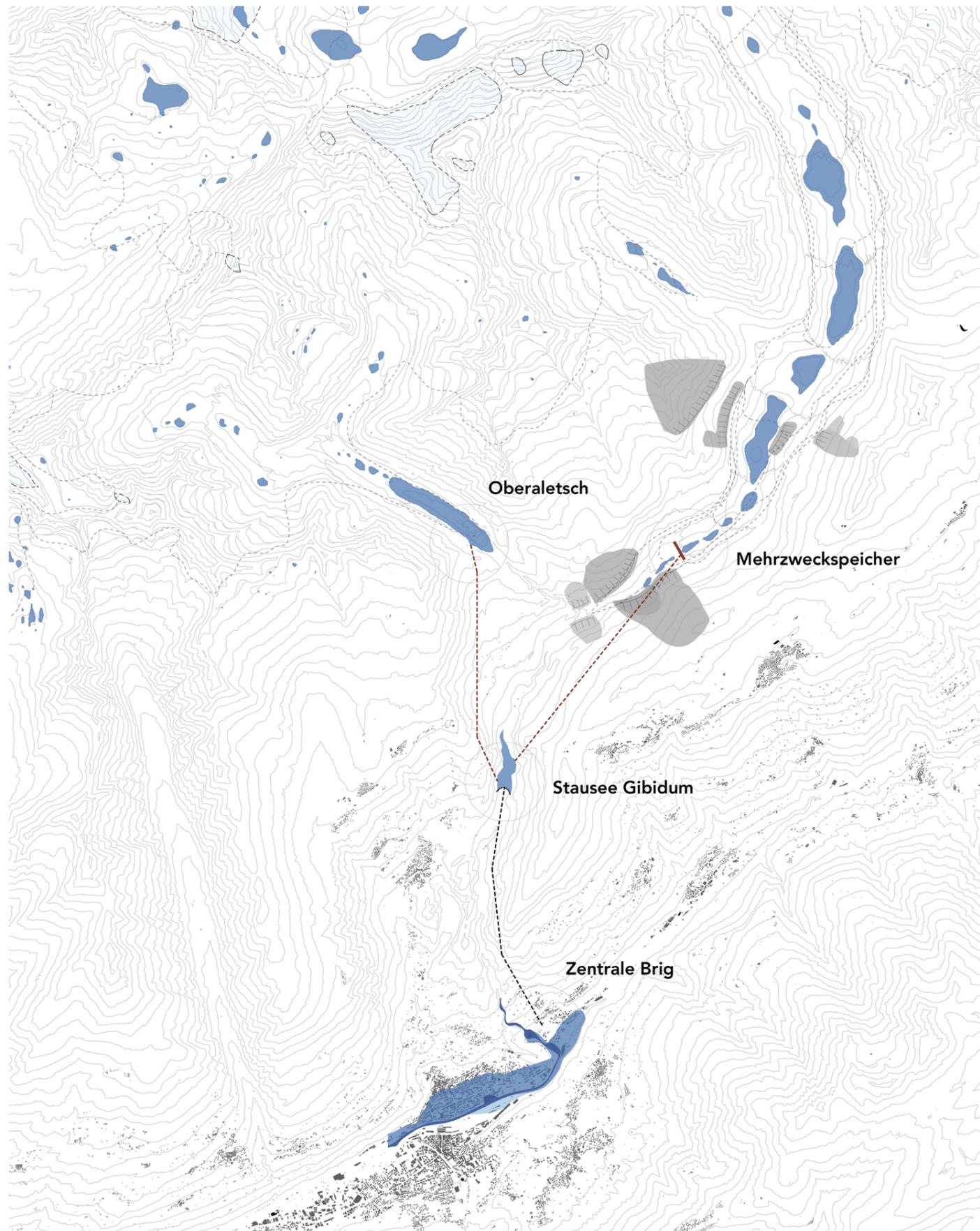
### **Dauerhaftigkeit**

Talsperren gehören zu den grössten und aus materieller Sicht wohl dauerhaftesten Konstruktionen unserer Zeit. Diese übermässig langlebigen Bauwerke, mit ihrer meist inhärenten Monofunktionalität, müssen angesichts der neuen Realitäten der dynamischen Landschaft zumindest hinterfragt werden. Aspekte der Stromproduktion, Hochwasserschutz und Verlandung sollten mit anderen Funktionen wie dem Tourismus zusammen und zeitlich gedacht werden. Solche Planungsprozesse müssen aufgrund ihres Konfliktpotentials schon heute angestossen werden. Schliesslich gilt es auch, die Unberührtheit der neuen Natur in den Gletschervorfelder als kostbares Gut zu schützen und bewusst zu handhaben. Auch das Ende solcher Bauwerke ist dabei in der Planung mit zu berücksichtigen, da gängige Talsperren aus ökonomischer Sicht als zu dauerhaft gelten, um je abgebrochen zu werden.

Wie müsste also eine Infrastruktur oder ein System aussehen, welches aus lokalem Material gefertigt und zeitlich den Veränderungen der Landschaft und den Bedürfnissen angepasst, aber auch ganz aufgegeben werden kann?

## THESEN.

- Angesichts der dynamisierten Landschaft braucht es bauliche Schutzmassnahmen, bis sich die Hanginstabilität durch die steigende Vegetation entschärft hat.
- Solche Massnahmen sind zusammen mit der Wasserkraft und anderen Funktionen als zeitlich gedachte Mehrzweckprojekte zu realisieren.
- Die materielle Dauerhaftigkeit und Monofunktionalität konventioneller Wasserkraft-Infrastrukturen ist in Frage zu stellen.



# INTERVENTION.

## Mehrzweckspeicher als Übergangsjekt

T0-T50

- Von dem erhöhten Schmelzwasser mittelfristig profitieren
- Verlandung des Gibidum-Stausees bremsen

T50-T100

- Retentionsvolumen für Hochwasserszenarios bereitstellen.
- Weitere Nutzungen? (Tourismus, SAC, Naturschutzzentrum etc.)

T100

- Möglichkeit haben, die Infrastruktur zu verlassen / aufzugeben

0 1 2 km

Abb.45 Situation Kraftwerkgruppe

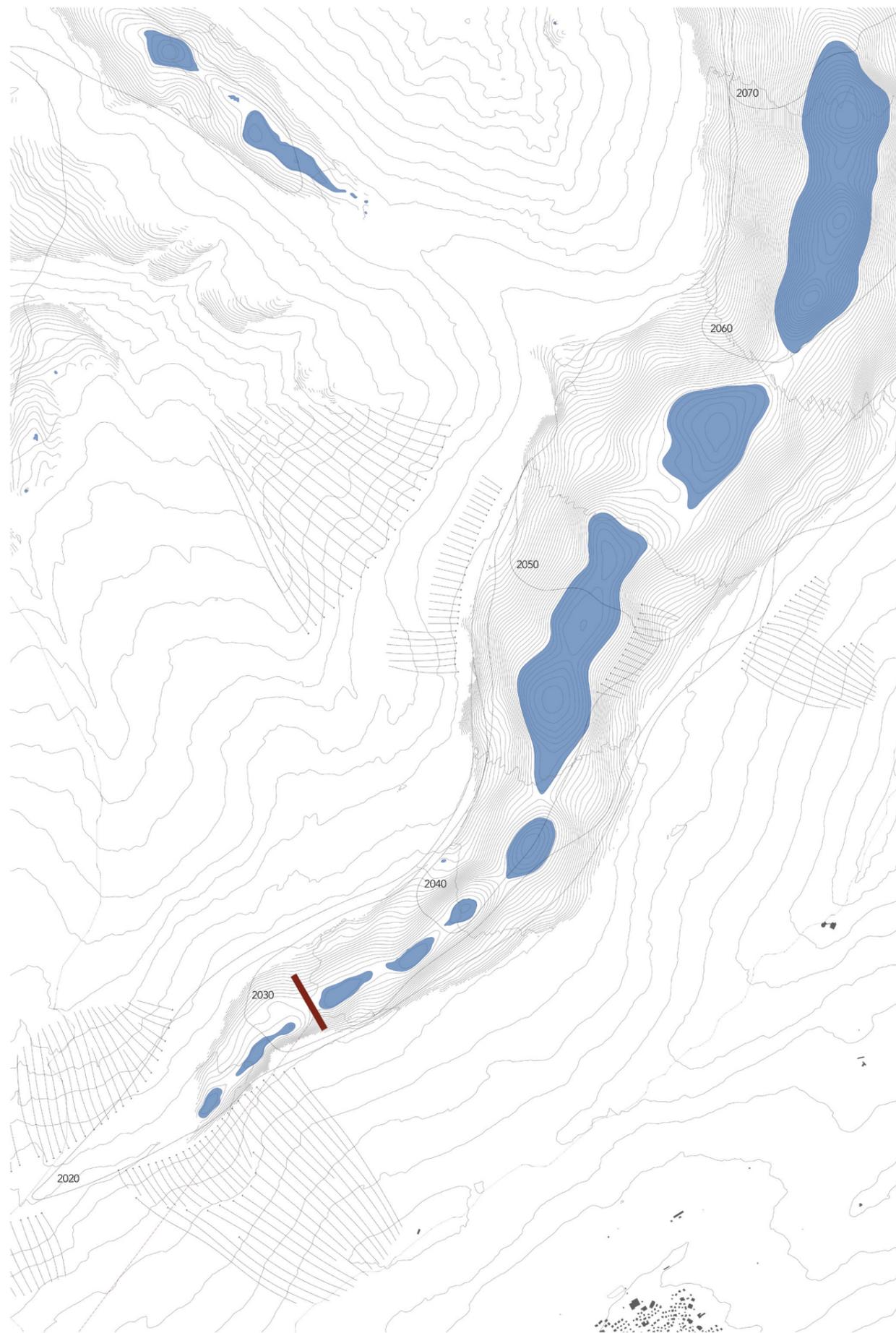


Abb.46 Intervention

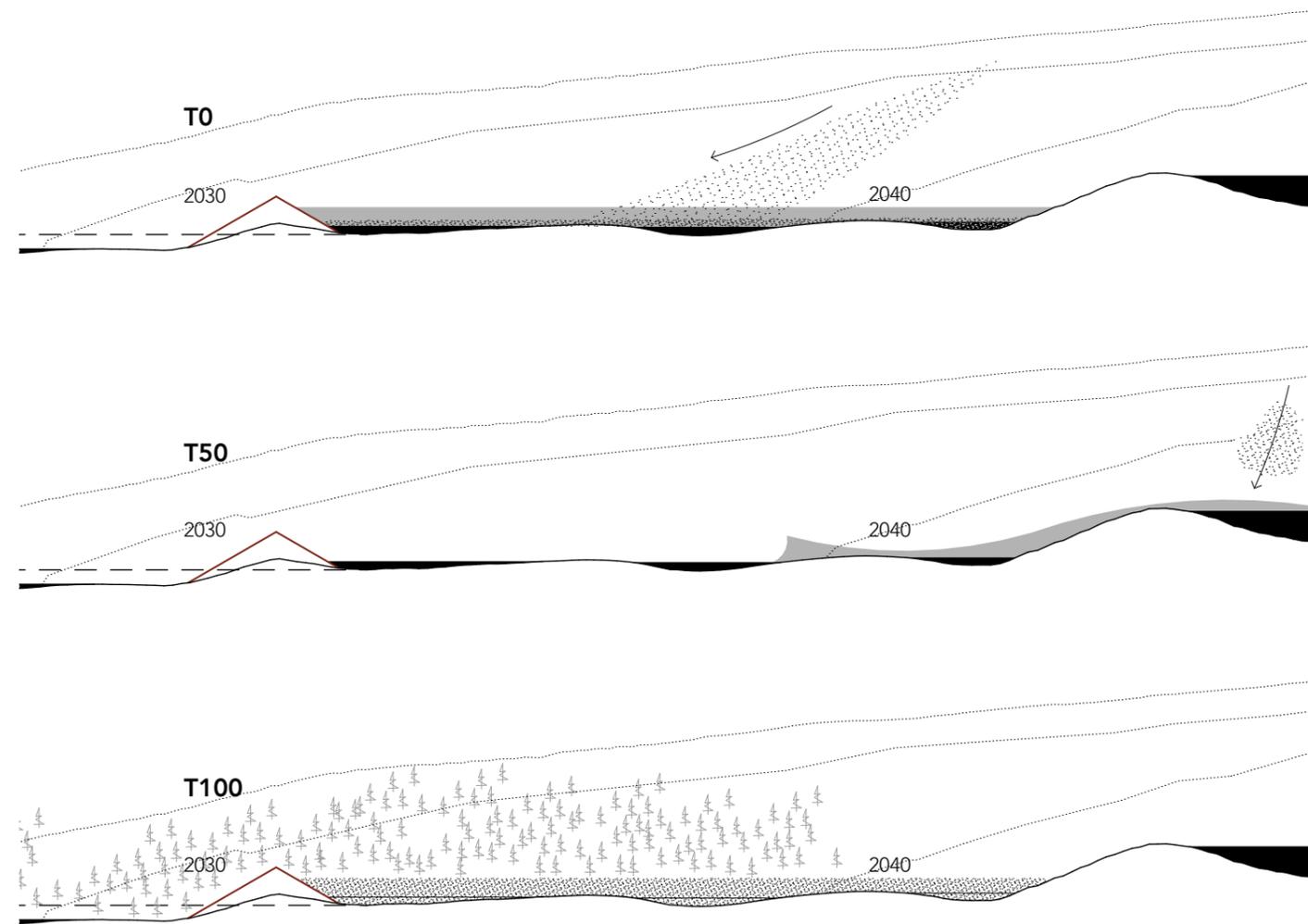
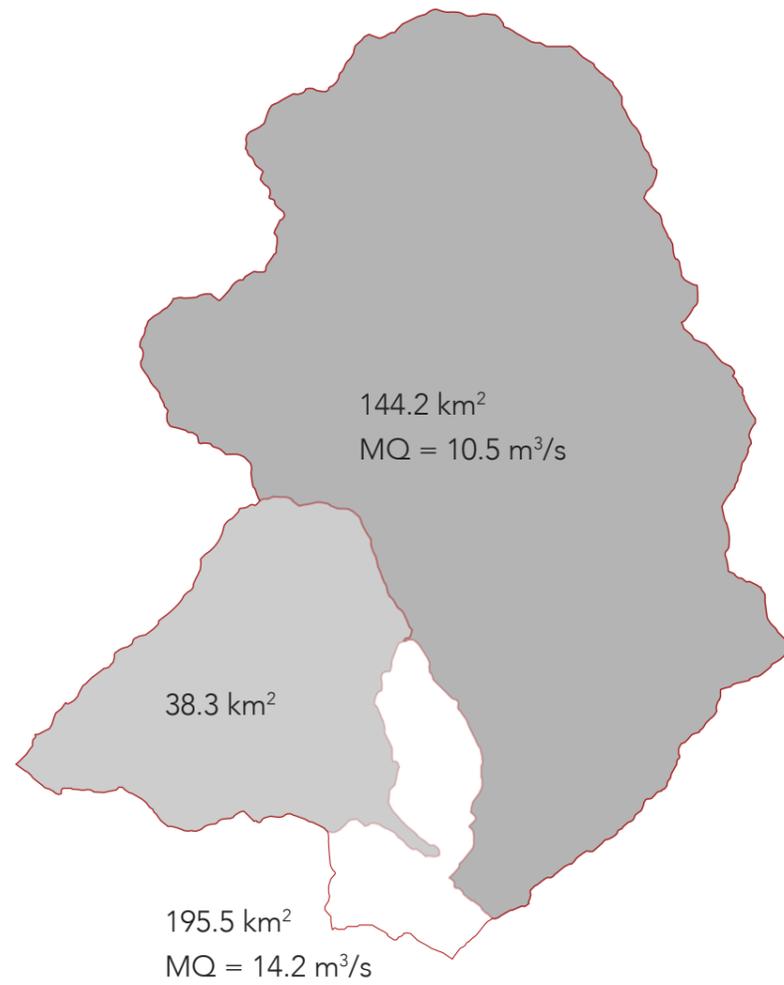


Abb.47 Mehrzweckprojekt über die Zeit



### Berechnung der Installierten Leistung

$$L \text{ [kw]} = g \times n \times MQ \times dH$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$n = 0.9$$

$$MQ = 10.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$dH = 205\text{m}$$

$$L \text{ [kw]} = 19'004.4 \text{ kW} \quad = \mathbf{19.0 \text{ MW}}$$

### Leistung

$$P \text{ [kwh]} = L \times t$$

$$P \text{ [kwh]} = 19'004.4 \text{ kW} \times 8760\text{h} = 166'478'544 \text{ kWh} = \mathbf{166 \text{ GWh}}$$

**41'620 4-Personen-Haushalte** (4000 kWh / HH)

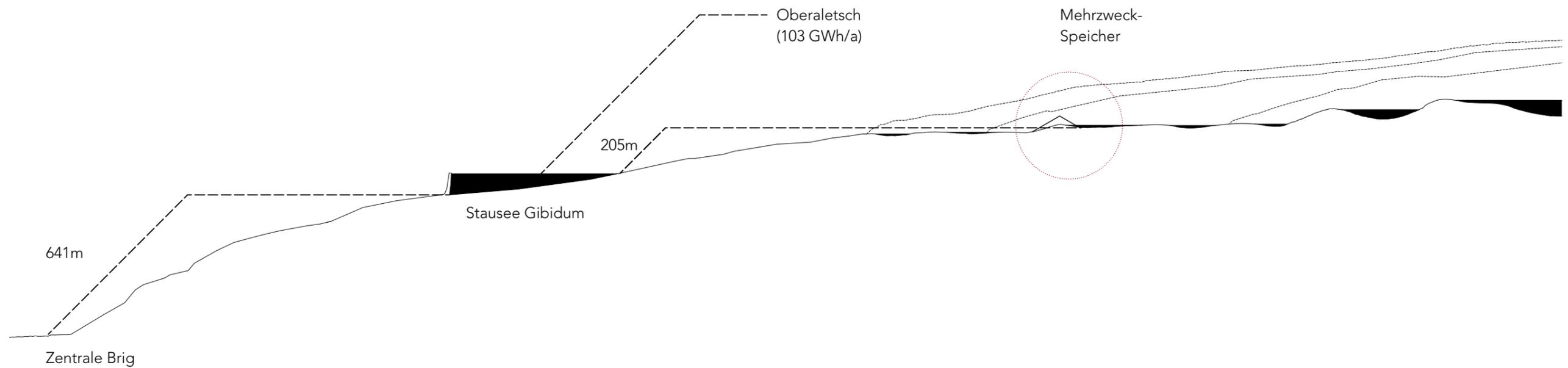


Abb.48 Schemas Berechnungen

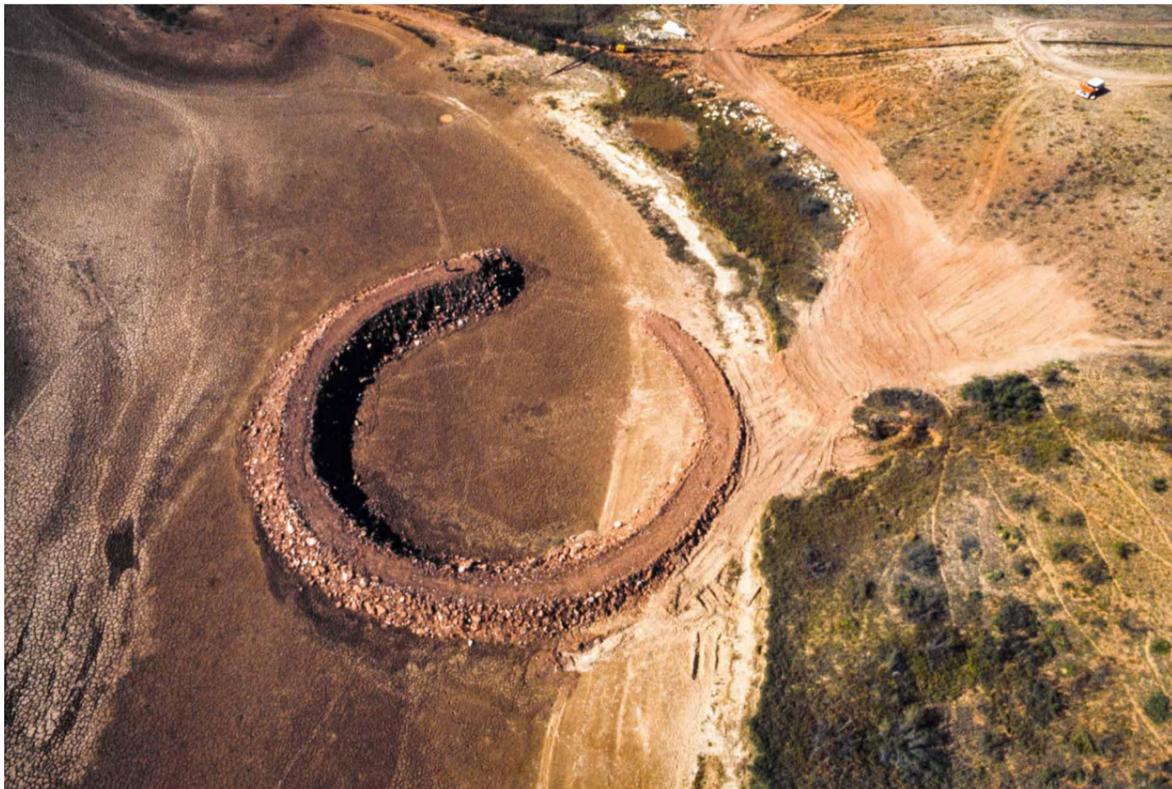


Abb.49 Robert Smithson, AmarilloRamp

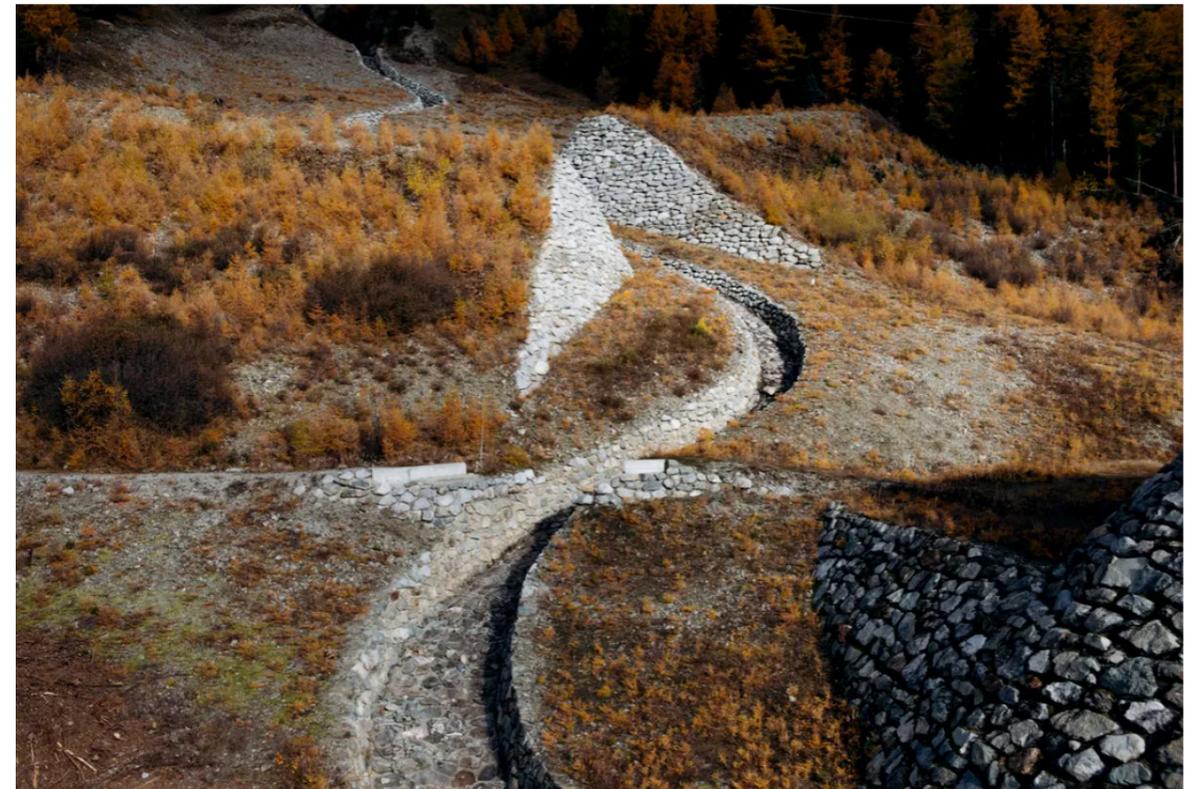
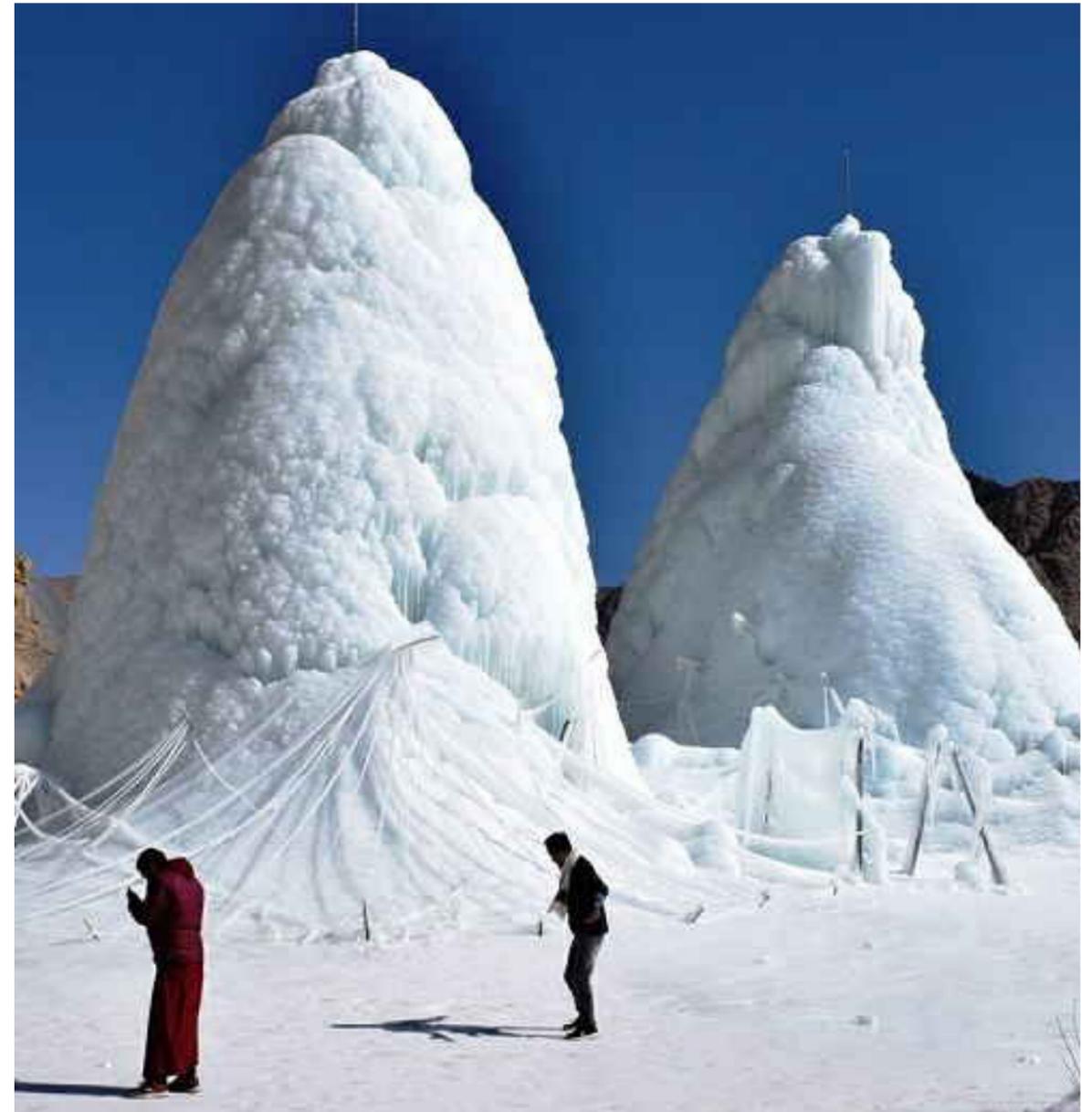


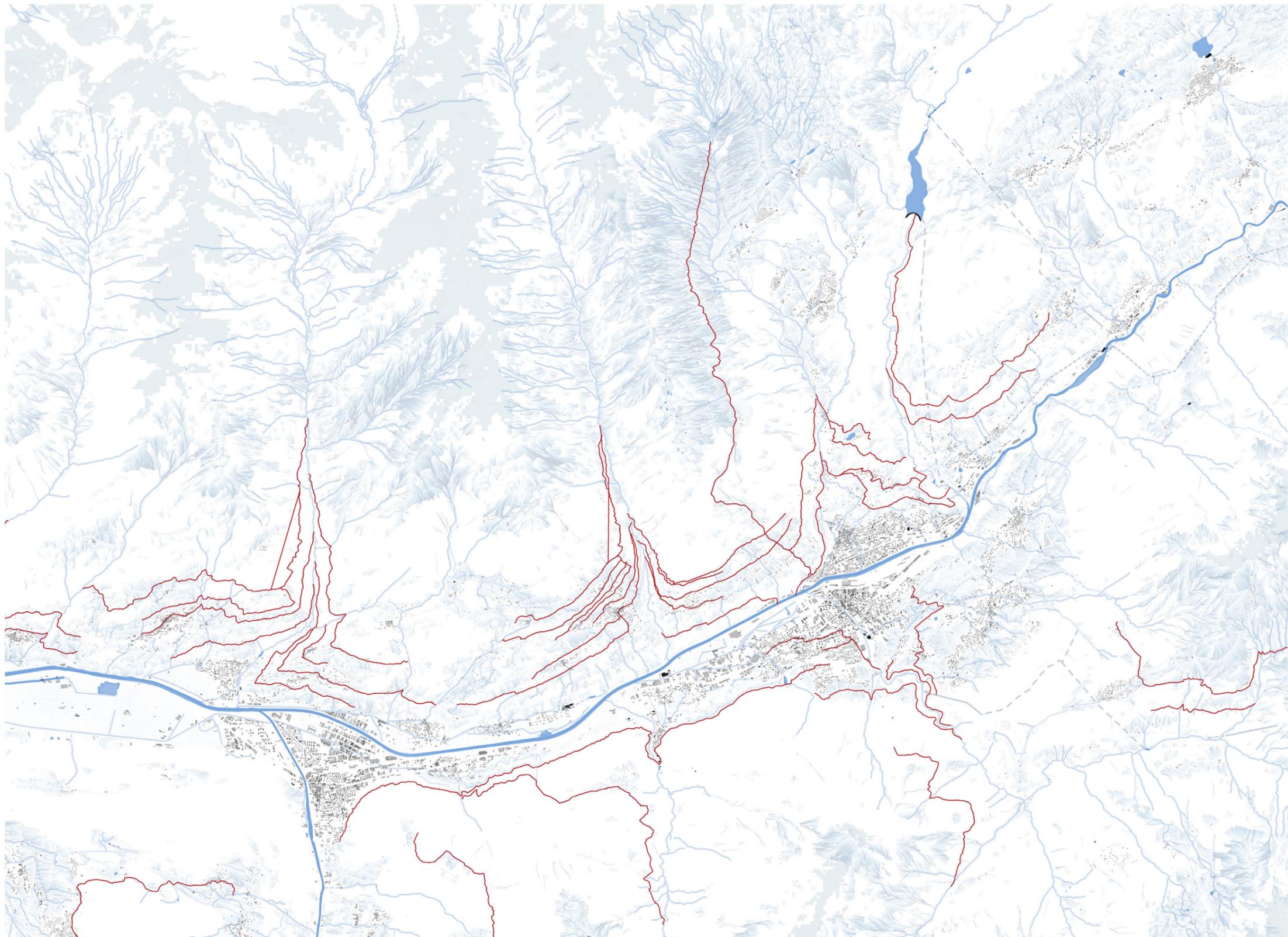
Abb.50 Schutzbauten und Geschieberückhaltebecken in Pontresina



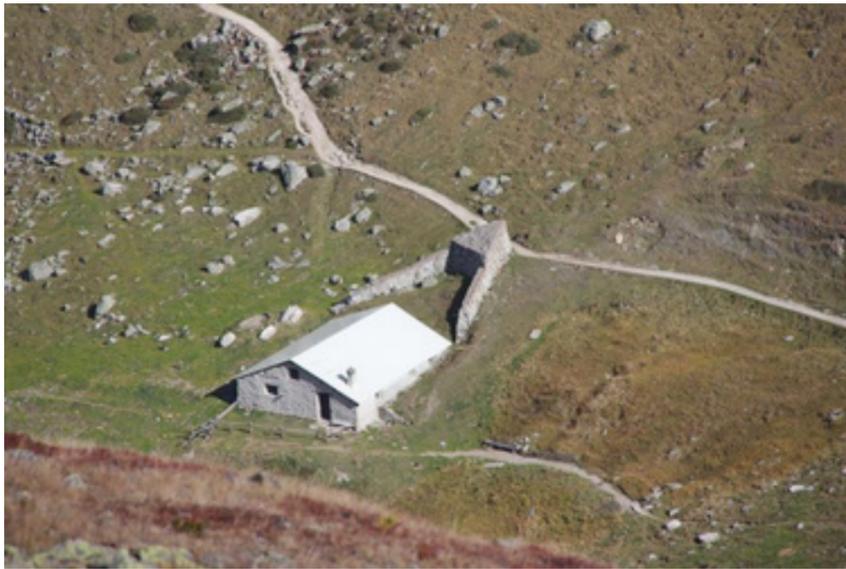
## ANHANG.



Eis-Stupas im Himalaya als künstliche Gletscher



Suonen oberhalb von Brig und Visp



Lawinenkeil



Schutzbau Rino Tami, Gotthard



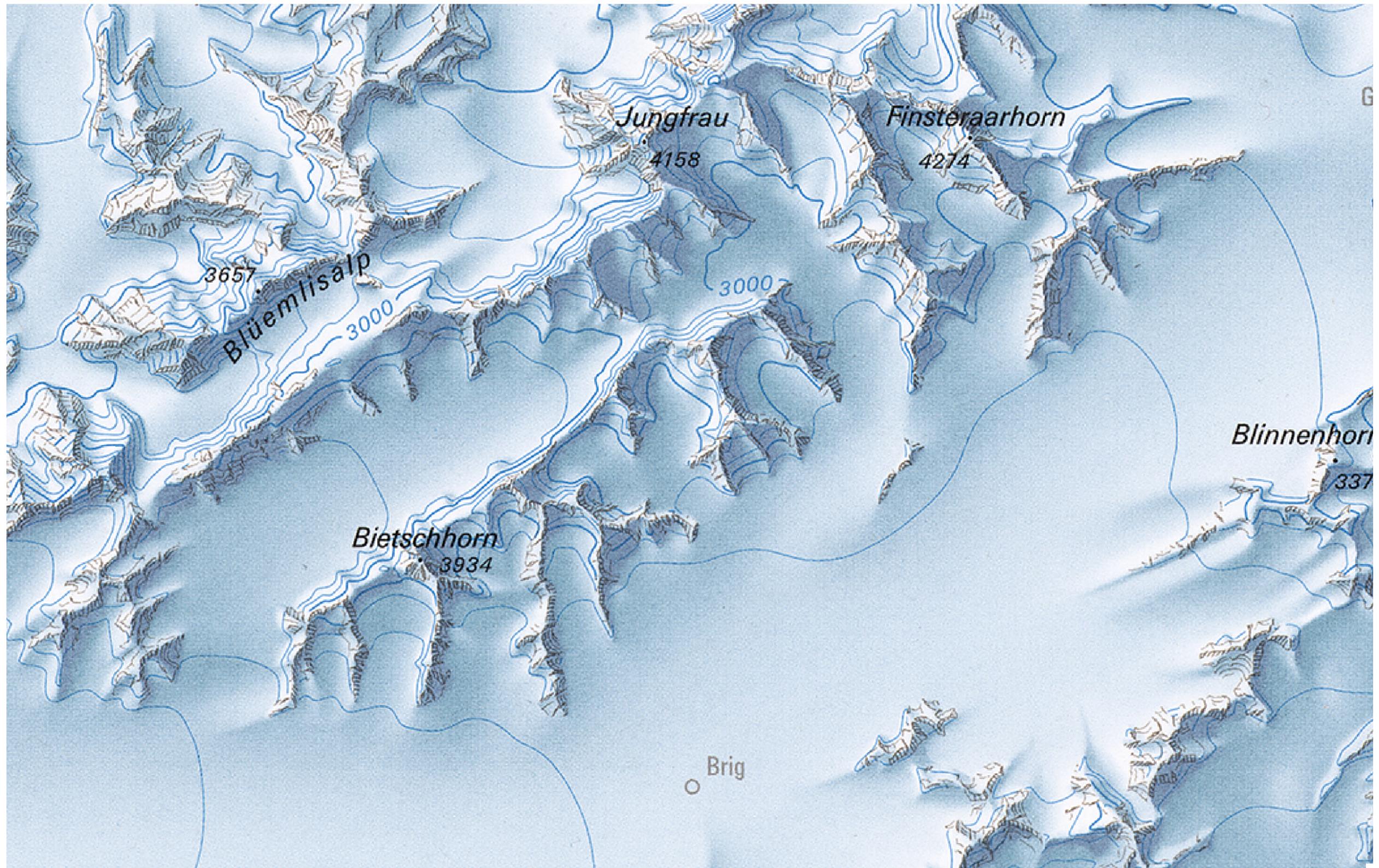
Schutzbau in den Alpen (Matthieu Gafsou, Atlas of Places)



Der Eissturz von Philipp Jakob Loutherbourg



Mercatorplan Nordpol



Der Aletsch während der letzten grossen Eiszeit

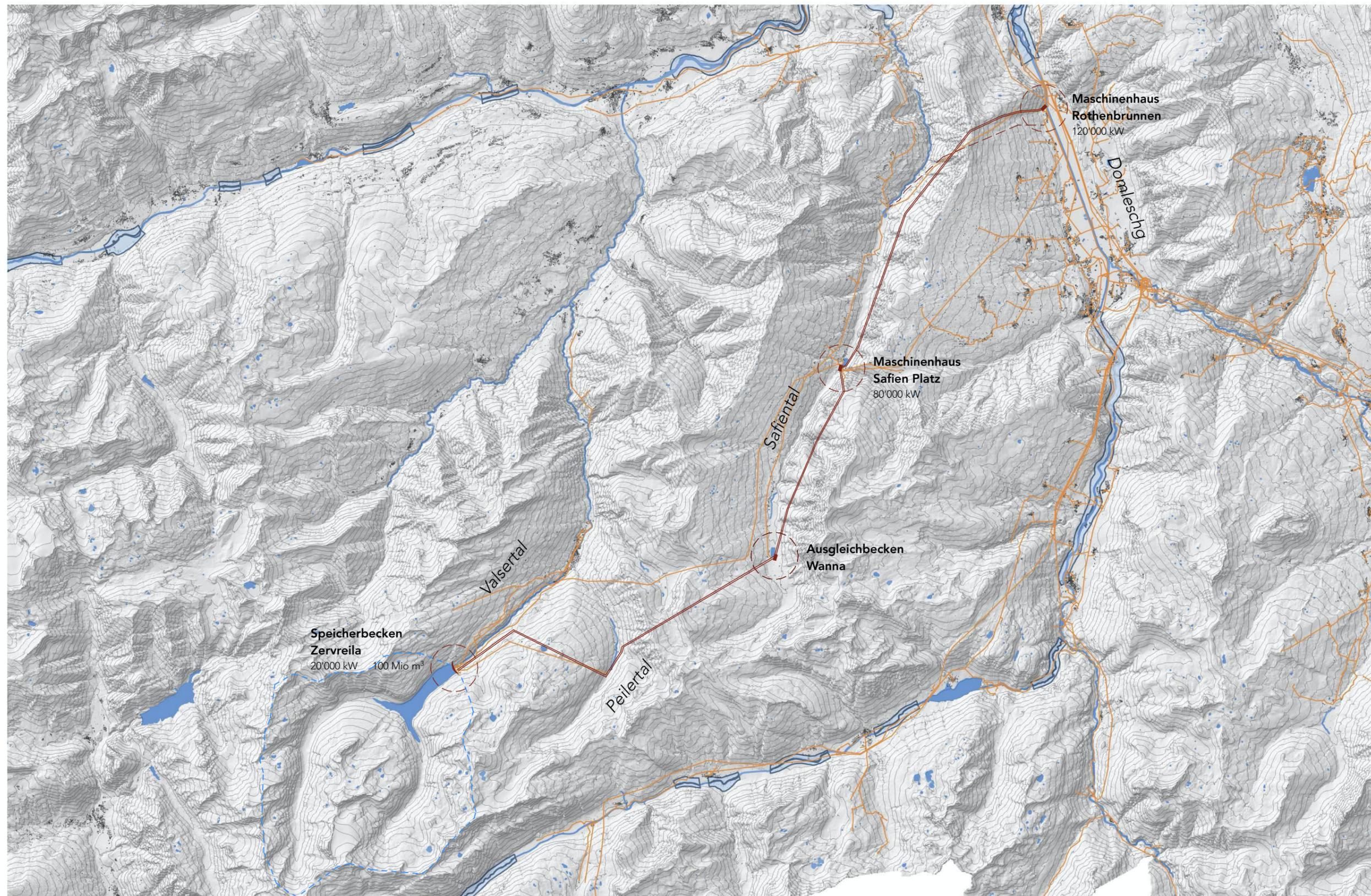


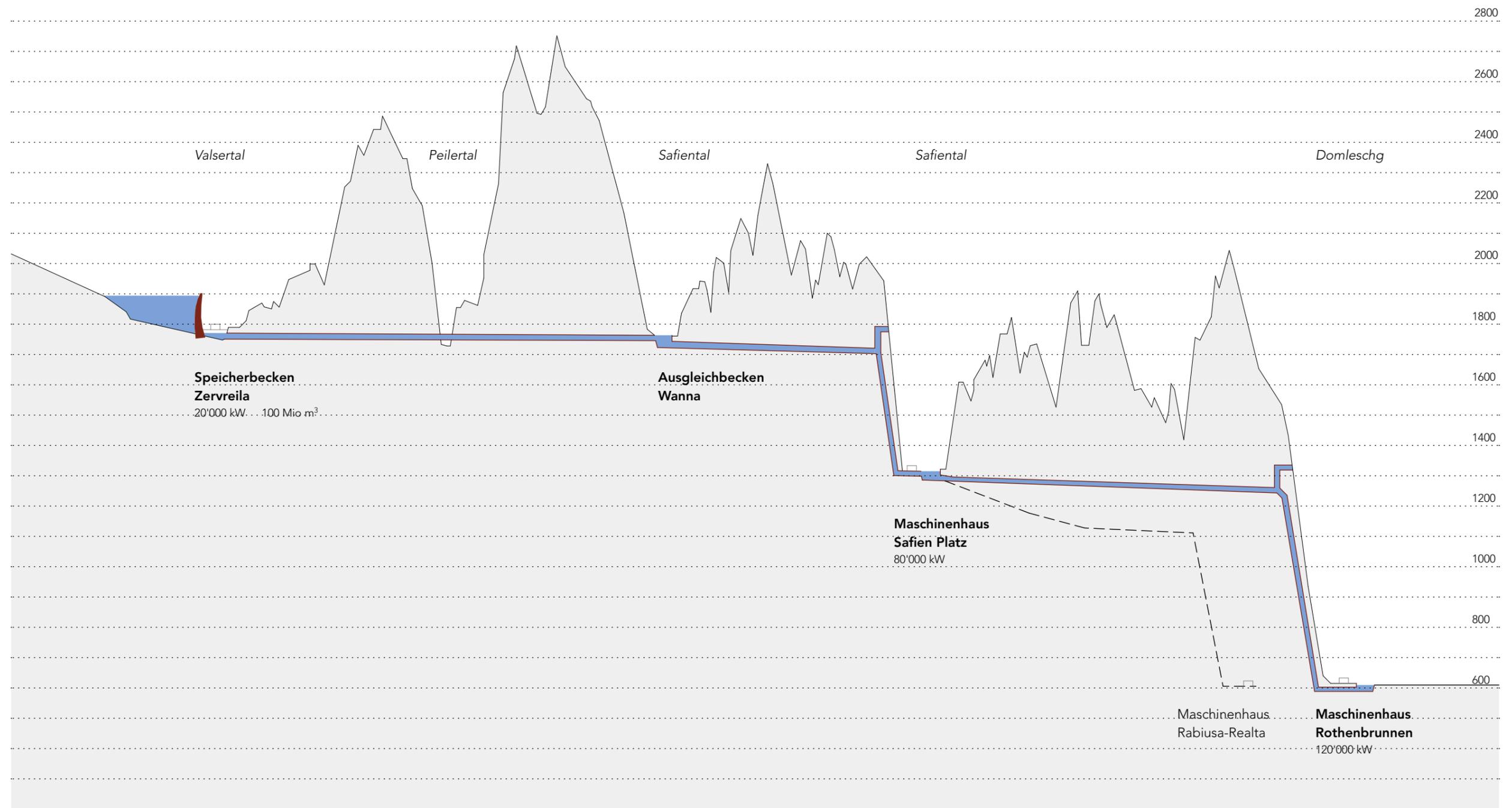
The earth's surface and the figments of the mind have a way of disintegrating into discrete regions of art. Various agents, both fictional and real, somehow trade places with each other- one cannot avoid muddy thinking when it comes to earth projects, or what I will call " „abstract geology." One's mind and the earth are in a constant state of erosion, mental rivers wear away abstract banks, brain waves undermine cliffs of thought, ideas decompose into stones of unknowing, and conceptual crystallizations shovels, awkward looking excavating devices, break apart into deposits of gritty reason. Vast moving faculties occur in this geological miasma, and they move in the most physical way. This movement seems motionless, yet it crushes the landscape of logic under glacial reveries. This slow flowage makes one conscious of the turbidity of thinking. Slump, debris slides, avalanches all take place within the cracking limits of the brain. The entire body is pulled into the cerebral sediment, where particles and fragments make themselves known as solid consciousness. A bleached and fractured world surrounds the artist. To organize this mess of corrosion into patterns,; grids, and subdivisions is an esthetic process that has scarcely been touched.

A Sedimentation of the Mind: Earth Projects, Robert Smithson 1968

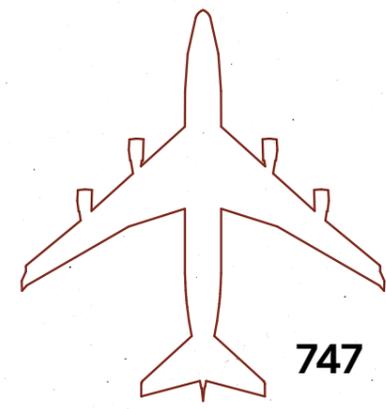
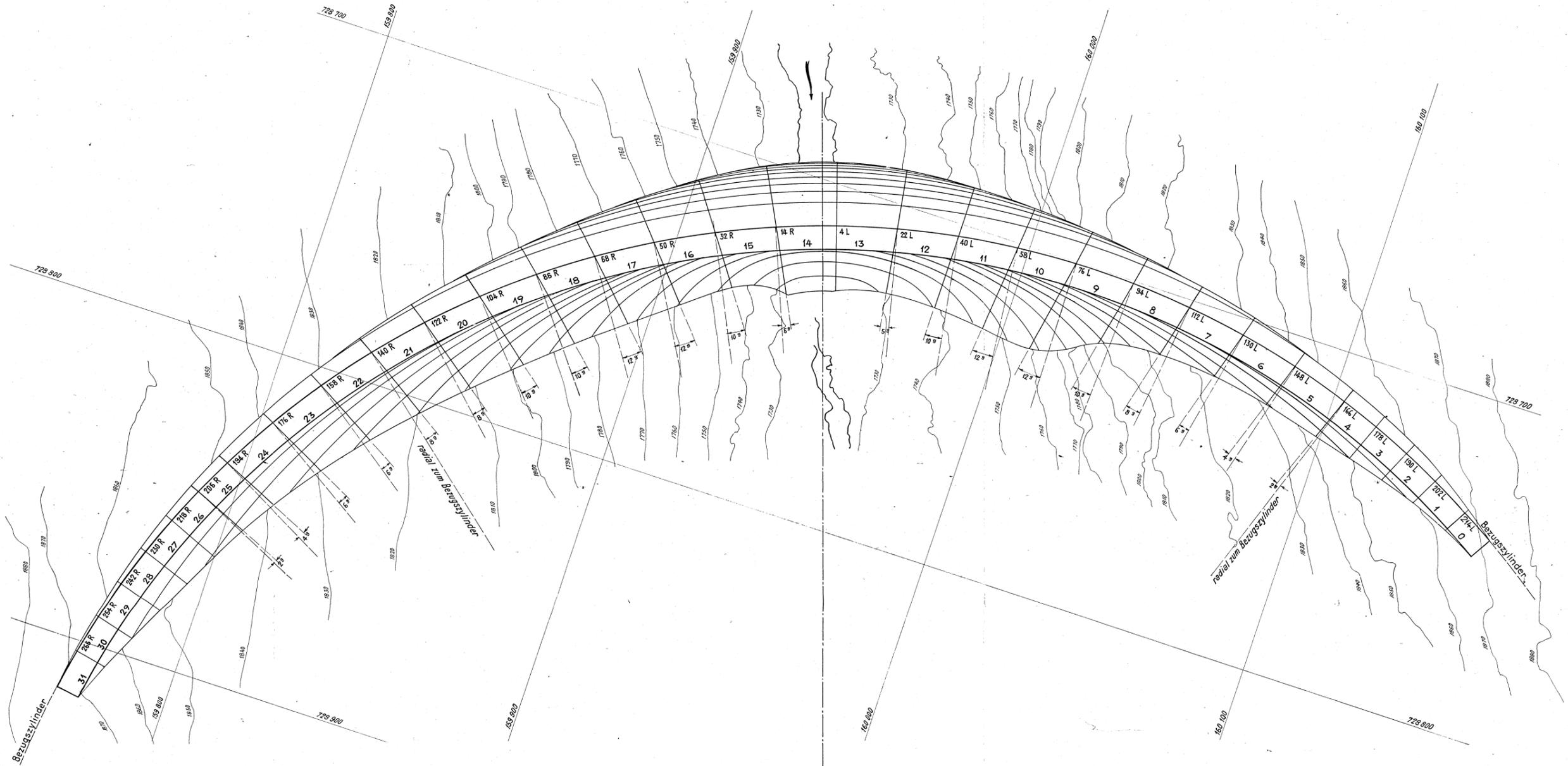


Robert Smithson, Asphalt Rundown



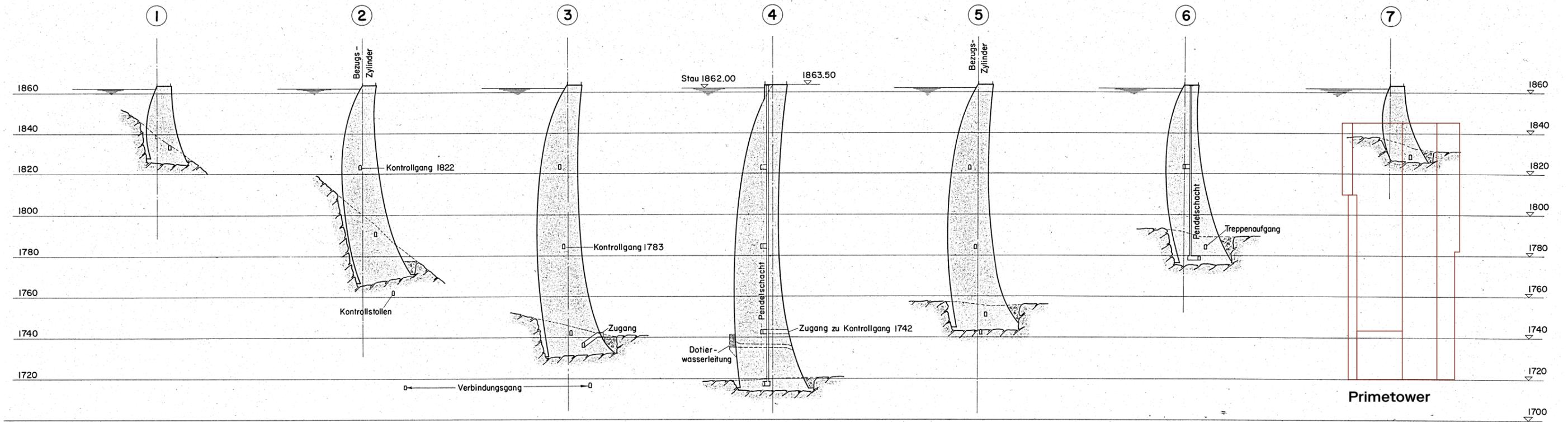


Semester-Einstieg: Schnitt durch Kraftwerkgruppe Zervreila

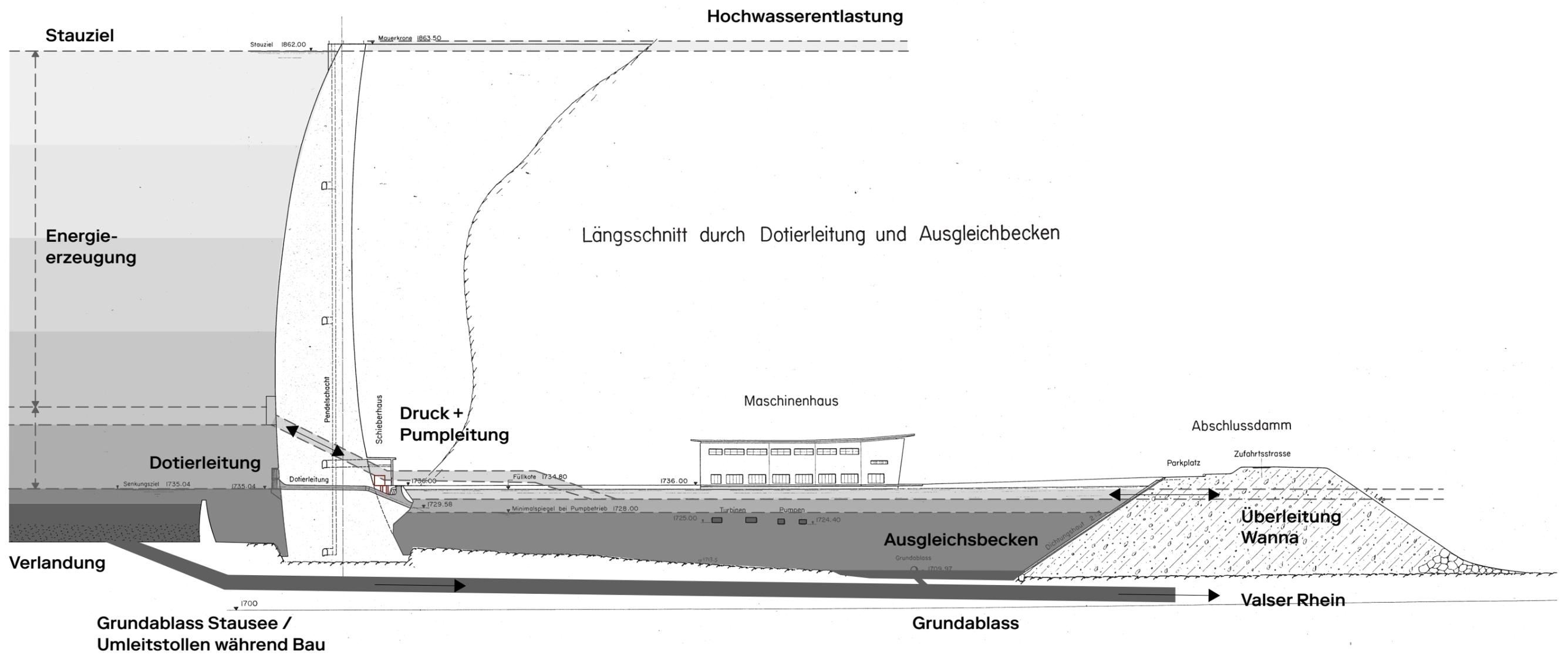


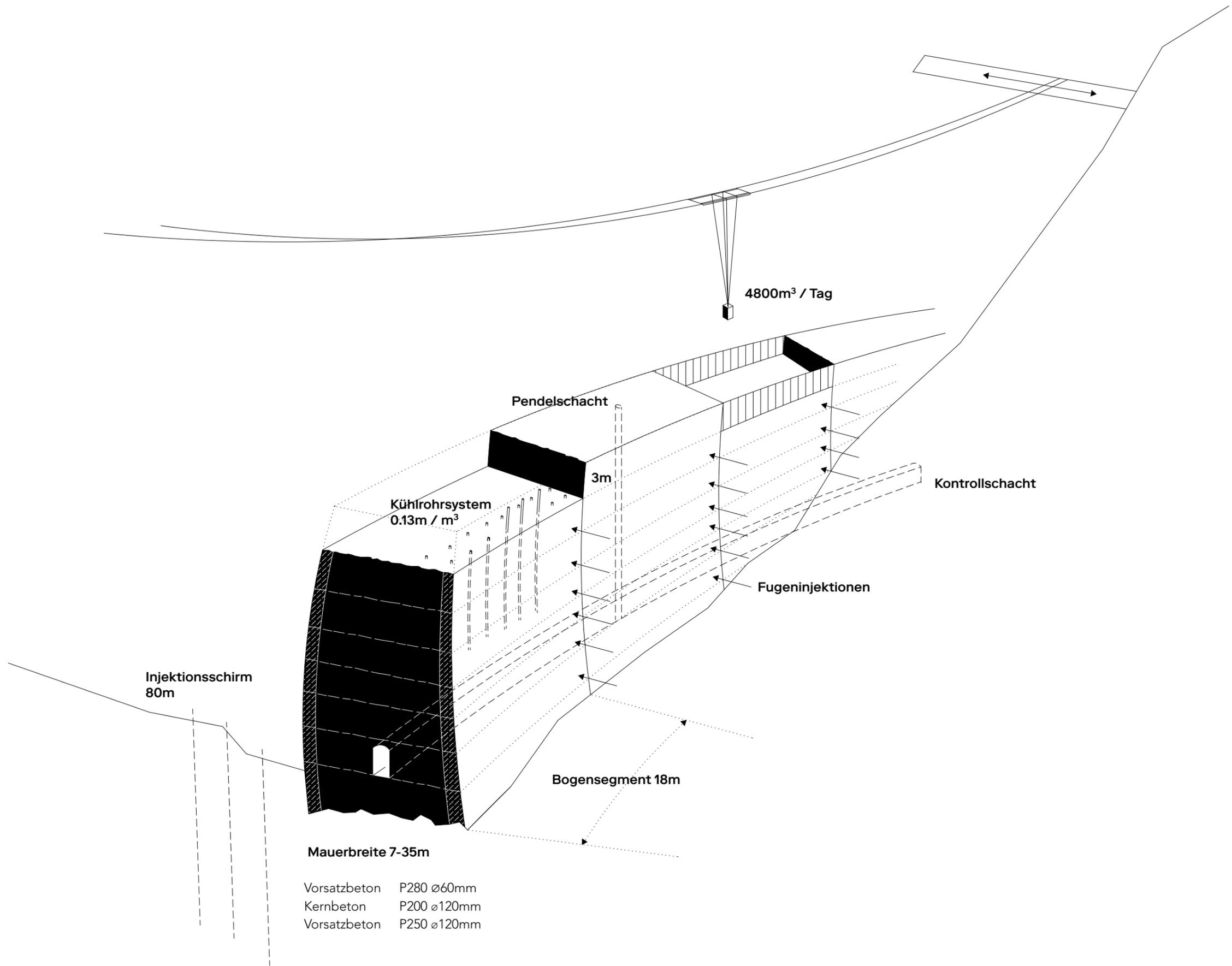
Semester-Einstieg: Grundriss Staumauer Zervreila

Mittelpunkt  
728 955/160 020



Semester-Einstieg: Schnittabfolge durch Staumauer Zervreila





# QUELLEN.

Burga 1998

Burga Conradin, Perret Roger, Vegetation und Klima der Schweiz sei dem jüngeren Eiszeitalter, Thun (1998)

Burga 2021

Burga Conradin, Spät- und nacheiszeitliche Einwanderung und Ausbreitung wichtiger Baumarten in der Schweiz, In: Kissling, Thomas. Fest, Flüssig, Biotisch : Alpine Landschaften im Wandel. Zürich: Lars Müller Publishers GmbH, (2021) Weingartner 2021 Weingartner, Rolf: Die alpine Wasserlandschaft im Wandel. In: Kissling, Thomas. Fest, Flüssig, Biotisch : Alpine Landschaften im Wandel. Zürich: Lars Müller Publishers GmbH, 2021. Print.

CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich

Etzelmüller et al 2020

Etzelmüller et al, Twenty years of European mountain permafrost dynamics—the PACE legacy, Environ. Res. Lett.2020

Farinotti 2016

Farinotti, Daniel et al: From dwindling ice to headwater lakes: could dams replace glaciers in the European Alps? Environ. Res. Lett. 11 054022, 2016

Gruber und Haeberli 2007

Gruber, S; Haeberli, W (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. Journal of Geophysical Research, 112:F02S18.

Günzel und Haeberli 2020

Günzel, F. & W. Haeberli (2020): Einfluss der Permafrostdegradation auf Hangstabilität. In: Lozn J. L., S.-W. Breckle, H. Grahl, et al. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel. S. 310-316.

Haeberli und Egli 2007

Haeberli W, Egli M, Klimafolgen im Hochgebirge, tec21, (2007)

Haeberli und Maisch, 2017

Haeberli, W und Maisch, Max: Klimawandel im Hochgebirge, 2017

Haeberli und Schleiss, et al 2012

Haeberli, Wilfried; Schleiss, Anton; et al: Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft. Wasser Energie Luft, 104(2):93-102. (2012)

Haeberli 2020

Haeberli, W: Gefahren und Potenziale neuer Seen im Hochgebirge, Energie und Umwelt 1/2020, 2020

Haeberli 2020

Haeberli, W: (Ver-) Schwindendes Eis im Hochgebirge - was nun? Regio Basiliensis 61/2 2020

Jouvet G, Huss M 2019

Jouvet, Guillaume und Huss, Matthias: Future retreat of Great Aletsch Glacier. Journal of Glaciology 65, (2019)

Körner 2021

Körner Christian, Alpine Plant Life, 2021

Losapio et al 2021

Losapio G, Cerabolini BEL, Maffioletti C, Tampucci D, Gobbi M and Caccianiga M TheConsequences of Glacier Retreat Are Uneven Between Plant Species. 2021

Schleiss und De Cesare 2010

Schliess, Anton und De Cesare, Giovanni et al: Verlandung der Stauseen gefährdet die nachhaltige Nutzung der Wasserkraft, Wasser Energie Luft, 102 (2010)

# ABBILDUNGEN.

Abb.01

Verfasser (basierend auf Swisstopo)

Abb.02

Verfasser (basierend auf Swisstopo)

Abb.03

Alpes, Matthieu Gafsou, Atlas of Places (23.03.2022)

[www.atlasofplaces.com/atlas-of-places-images/\\_scaled/ATLAS-OF-PLACES-MATT-HIEU-GAFSOU-ALPES-IMG-18.jpg](http://www.atlasofplaces.com/atlas-of-places-images/_scaled/ATLAS-OF-PLACES-MATT-HIEU-GAFSOU-ALPES-IMG-18.jpg)

Abb.04

ETHBildarchiv (11.03.2022)

[https://www.e-pics.ethz.ch/index/ETHBIB.Bildarchiv.ID/images/ETHBIB.Bildarchiv\\_1122079.jpg](https://www.e-pics.ethz.ch/index/ETHBIB.Bildarchiv.ID/images/ETHBIB.Bildarchiv_1122079.jpg)

Abb.05

NCCS (13.03.2022)

[https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/zahlen-und-fakten/temperatur.spa.maps\\_tas\\_En.app/index\\_tas.html](https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/zahlen-und-fakten/temperatur.spa.maps_tas_En.app/index_tas.html)

Abb.06

Verfasser (basierend auf Farinotti 2016)

Abb.07

Jouvet, Guillaume und Huss, Matthias: Future retreat of Great Aletsch Glacier. Journal of Glaciology 65, (2019)

Abb.08

Verfasser (basiert auf Hydromaps.ch)

Abb.09

Swisseduc.ch (13.03.2022)

[https://www.swisseduc.ch/glaciers/alps/grosser\\_aletschgletscher/icons-ice-cave-2010/ice\\_cave\\_end.jpg](https://www.swisseduc.ch/glaciers/alps/grosser_aletschgletscher/icons-ice-cave-2010/ice_cave_end.jpg)

Abb.10

Verfasser (basiert auf Swisstop und Grab M. et al, Ice thickness distribution of all Swiss glaciers based on extended ground-penetrating radar data and geological modeling, 2021)

Abb.11

Verfasser (basiert auf Hydromaps.ch)

Abb.12

Verfasser (basiert auf Grab M. et al 2021)

Abb.13

ETHBildarchiv (11.03.2022)

[www.e-pics.ethz.ch/index/ETHBIB.Bildarchiv.ID/images/ETHBIB.Bildarchiv\\_1996.jpg](http://www.e-pics.ethz.ch/index/ETHBIB.Bildarchiv.ID/images/ETHBIB.Bildarchiv_1996.jpg)

Abb.14

Verfasser (basiert auf Kos, et al, Contemporary glacier retreat triggers a rapid landslide response, Great Aletsch Glacier, Switzerland, Geophys. Res. Lett., 43, 12,466

Abb.15

Quelle

Abb.16

Verfasser (basiert auf Etzelmüller et al 2020)

Abb.17

Dan Holdsworth, Atlas of Places (19.03.2022)

[www.atlasofplaces.com/atlas-of-places-images/\\_scaled/ATLAS-OF-PLACES-DAN-HOLDSWORTH-FORMS-FTP-IMG-1.jpg](http://www.atlasofplaces.com/atlas-of-places-images/_scaled/ATLAS-OF-PLACES-DAN-HOLDSWORTH-FORMS-FTP-IMG-1.jpg)

Abb.18

Verfasser (basiert auf Haeberli und Maisch 2017)

Abb.19

Verfasser (basiert auf Alpenverein.ch, Haeberli 1975)

[https://www.alpenverein.de/natur-klima/naturschutzverband/die-alpen/alpiner-permafrost-klimazeiger-und-klebstoff-der-alpen\\_aid\\_28517.html](https://www.alpenverein.de/natur-klima/naturschutzverband/die-alpen/alpiner-permafrost-klimazeiger-und-klebstoff-der-alpen_aid_28517.html)

Abb.20

Haeberli, W: (Ver-) Schwindendes Eis im Hochgebirge - was nun? Regio Basiliensis 61/2 2020

Abb.21

Verfasser (basiert auf Günzel und Haeberli 2020)

Abb.22  
Verfasser

Abb.23  
Verfasser

Abb.24  
Swisstopo.ch (19.03.2022)  
<https://print.geo.admin.ch/print/20220319145108919.pdf.printout>

Abb.25  
Verfasser (basiert auf Issuu.com)  
[https://issuu.com/zekmagazin/docs/zek\\_hydro\\_03\\_2020/s/10702490](https://issuu.com/zekmagazin/docs/zek_hydro_03_2020/s/10702490)

Abb.26 und Abb.27  
Verfasser (basiert auf NELAK (2013) Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge –Chancen und Risiken. . Forschungsbericht NFP 61. Haeberli, W., Bütler, M., Huggel, C., Müller, H. & Schleiss, A. (Hrsg.). Zürich, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, S.142-143)

Abb.28  
Swisseduc.ch (10.04.2022)  
[https://www.swisseduc.ch/glaciers/alps/unterer-grindelwaldgletscher/moraenens-turz\\_2009/icons/sturz\\_5.jpg](https://www.swisseduc.ch/glaciers/alps/unterer-grindelwaldgletscher/moraenens-turz_2009/icons/sturz_5.jpg)

Abb.29  
Verfasser

Abb.30  
Atlas of Places (19.03.2022)  
[www.atlasofplaces.com/atlas-of-places-images/ATLAS-OF-PLACES-VIOLETTE-LE-DUC-LE-MASSIF-DU-MONT-BLANC-GPH-5.jpg](http://www.atlasofplaces.com/atlas-of-places-images/ATLAS-OF-PLACES-VIOLETTE-LE-DUC-LE-MASSIF-DU-MONT-BLANC-GPH-5.jpg)

Abb.31  
(25.03.2022) [www.baysf.de/fileadmin/user\\_upload/200130\\_PM\\_Echte\\_Wintersportler.JPG](http://www.baysf.de/fileadmin/user_upload/200130_PM_Echte_Wintersportler.JPG)

Abb.32  
Verfasser (Nach Körner 2021)

Abb.33  
Swisstopo (25.03.2022)  
<https://map.geo.admin.ch/https://print.geo.admin.ch/print/20220325104415443.pdf.printout>

Abb.34  
Swisstopo (25.03.2022)  
[file:///Users/michaelnelson/Downloads/map.geo.admin.ch\\_20220325104327719.pdf](file:///Users/michaelnelson/Downloads/map.geo.admin.ch_20220325104327719.pdf)

Abb.35  
Wikimedia (19.03.2022)  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/360\\_Oxyria\\_digyna.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/360_Oxyria_digyna.jpg)

Abb.36  
Wikimedia (25.03.2022)  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/166\\_Ranunculus\\_glacialis.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/166_Ranunculus_glacialis.jpg)

Abb.37  
Verfasser (basiert auf Losapio et al 2021)

Abb.38  
Verfasser (basiert auf Körner 2021)

Abb.39  
WSL (04.04.2022)  
[https://www.wsl-junior.ch/fileadmin/user\\_upload/WSL-Junior/Naturgefahren/Schutzwald/wsl\\_forschung\\_stillberg\\_2008\\_gr.jpg](https://www.wsl-junior.ch/fileadmin/user_upload/WSL-Junior/Naturgefahren/Schutzwald/wsl_forschung_stillberg_2008_gr.jpg)

Abb.40  
ETH Bibliothek (14.03.2022)  
<https://ba.e-pics.ethz.ch/catalog/ETHBIB.Bildarchiv/r/1250422/viewmode=infoview>

Abb.41  
Verfasser

Abb.42  
Matthieu Gafsou, Atlas of Places (19.03.2022)  
[www.atlasofplaces.com/atlas-of-places-images/\\_scaled/ATLAS-OF-PLACES-MATT-HIEU-GAFSOU-ALPES-IMG-11.jpg](http://www.atlasofplaces.com/atlas-of-places-images/_scaled/ATLAS-OF-PLACES-MATT-HIEU-GAFSOU-ALPES-IMG-11.jpg)

Abb.43  
Verfasser

Abb.44  
Verfasser

Abb.45  
Verfasser

Abb.46  
Verfasser

Abb.47  
Verfasser

Abb.48  
Verfasser

Abb.49  
Holt Smithson Foundation (29.03.2022)  
[https://holtsmithsonfoundation.org/sites/default/files/styles/fullscreen\\_2048\\_x\\_y\\_/public/2020-02/Smithson-AmarilloRamp-03.jpg?itok=JlOhlcBZ](https://holtsmithsonfoundation.org/sites/default/files/styles/fullscreen_2048_x_y_/public/2020-02/Smithson-AmarilloRamp-03.jpg?itok=JlOhlcBZ)

Abb.50  
NZZ (29.03.2022)  
<https://www.nzz.ch/schweiz/klimawandel-wie-das-engadin-mit-der-zeitbombe-permafrost-umgeht-ld.1519980>