

Seminararbeit

Naturkatastrophen

Leitfach: Geographie

Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Permafrostböden in den Alpen - am Beispiel der Zugspitze

Verfasser:

Tobias Eberle

Kursleiter:

OStR Franz Kümmerle

Abgabetermin:

6. November 2012

Bewertung	Note	Punkte	Gesamtpunkte
Schriftliche Arbeit			
Präsentation			

Gliederung	Seite
1 Einleitung	3
2 Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Permafrostböden in den Alpen – am Beispiel der Zugspitze	4
2.1 Permafrost	4
2.1.1 Definition	4
2.1.2 Aufbau des Permafrostbodens	5
2.1.2.1 Periglazialzonen der hohen Breiten	5
2.1.2.2 Periglaziale Höhenstufen der Gebirge	6
2.1.3 Verbreitung	6
2.1.3.1 Global	6
2.1.3.2 Alpin	8
2.1.3.3 Regional am Beispiel der Zugspitze	9
2.2 Klimawandel bezogen auf die Zugspitze	11
2.3 Einflussfaktoren auf den Permafrost	13
2.4 Erforschung des Permafrostes auf der Zugspitze	14
2.4.1 Feststellungsverfahren – eine Auswahl	15
2.4.1.1 Geländebeobachtungen	15
2.4.1.2 PACE: Permafrost and Climate in Europe	16
2.4.1.3 Messungen im Kammstollen	17
2.4.1.4 Forschungsbohrungen	18
2.4.1.4.1 Voruntersuchung	19
2.4.1.4.2 Projektierung	20
2.4.1.4.3 Ausstattung des Bohrlochs	20
2.4.1.4.4 Ergebnisse der Messungen	21
2.4.2 Folgerungen aus den Messergebnissen	23
2.5 Folgerungen aus den Forschungen	23
2.6 Gefährdungspotenzial auf der Zugspitze	25
2.7 Gefährdungen der Infrastruktur im Zugspitzgebiet bei Permafrostdegradierung	26
3 Fazit: Risikobewertung	30
4 Abbildungsverzeichnis	31
5 Literaturverzeichnis	32
6 Persönliche Erklärung	35

1 Einleitung

*„Aber man verlangt vom Forscher, dass er Beweise liefert,
wenn es sich zum Beispiel um die Entdeckung eines großen Berges handelt,
verlangt man, dass er große Steine mitbringt“*

Antoine de Saint-Exupéry (1900-1944)

Wissenschaftliche Aufzeichnungen über das Klima existieren seit etwa 150 Jahren. Dies ist nicht Selbstzweck, sondern geschieht genau aus dem Grund, um eine solide Grundlage für klimarelevante Aussagen zu treffen, wenn es sich um die „Entdeckung eines Berges“ handelt oder wenn es um einen stichhaltigen Beweis für die Existenz dieses „Berges“ geht. Der Berg ist in unserem Fall die Klimaerwärmung und deren Folgen und die „großen Steine, die er mitbringt“ sind jene dauerhaften Klimaaufzeichnungen, welche die greifbaren Belege für den Forscher darstellen. In diesen 150 Jahren haben sich die globalen Mittelwerte der bodennahen Lufttemperatur nachweislich von $-0,5^{\circ}\text{C}$ auf $+0,4^{\circ}\text{C}$ geändert. Dieser Trend der Erwärmung scheint sich auch im 21. Jahrhundert fortzusetzen, wobei lediglich die Höhe der Zunahme noch strittig ist. Geht man aber noch weiter in die Vergangenheit zurück und wertet verschiedene Quellen für Klimadaten aus wie zum Beispiel die Tagebücher von Johannes Kepler, die Aufzeichnungen zum Beginn der Kirschblüte in Japan, die ältesten Aufzeichnungen von Klimadaten des Claudius Ptolemäus oder wendet das System der Pollenanalyse an, so kann man feststellen, dass der Klimawandel nicht erst seit dem Auftreten des Menschen auf unsere Erde existiert, sondern offensichtlich ein Kennzeichen des Klimasystems selbst ist. In der heutigen Zeit ist man aber bemüht den Klimawandel durch die Messung verschiedener Parameter nicht nur nachzuweisen, sondern auch die Ursachen und Folgen der globalen Erwärmung und der regionalen Veränderungen zu erforschen. Dabei untersucht man zum Beispiel nicht nur die Schwankung des Meeresspiegels und die Zunahme extremer Wetterereignisse, auch dem Einfluss des Klimawandels auf Permafrostgebiete der Hochgebirge wird in jüngeren Forschungsvorhaben nachgegangen. Dieser Einfluss soll in der folgenden Arbeit am Beispiel der Zugspitze gezeigt werden. Deutschlands höchster Berg dient dabei als Musterbeispiel dafür, wie durch interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wissenschaft, Praxis und Verwaltung Grundlagenforschung betrieben und dadurch „eine

aussagekräftige Datenlage“¹ geschaffen wird um mögliche Auswirkungen auf das Zugspitzgebiet abschätzen zu können oder - wie Saint Exupéry sagen würde - um große Steine mitzubringen, um die Risikofaktoren und das Gefahrenpotential für das Zugspitzmassiv bzw. für alle in ihrem Einfluss stehenden Gebiete beurteilen zu können.

2 Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Permafrostböden in den Alpen – am Beispiel der Zugspitze

In der Schweiz wird der Einfluss des Klimawandels auf Permafrostböden schon seit den 1970er Jahren wissenschaftlich untersucht. Auch Frankreich, Italien und Österreich forschen schon länger auf diesem Gebiet, nur Deutschland hinkt hinter diesen Ländern hinterher. Ob in Deutschland überhaupt Permafrost vorhanden ist, war sehr ungewiss. Um diesen Notstand zu beseitigen, hat man Ende des letzten Jahrhunderts auf der Zugspitze, dem wahrscheinlichsten Ort für Permafrost, angefangen danach zu suchen.

2.1 Permafrost

2.1.1 Definition

Unter Permafrost versteht man nach H. M. French Lithosphärenmaterial (Festgestein oder Lockermaterial), das während mindestens zwei Wintern und einem dazwischenliegenden Sommer Temperaturen unter 0°C aufweist. Permafrost wird durch Zeit und Temperatur definiert und ist somit unabhängig von Material und Eigenschaften wie z.B. Eis- bzw. Wassergehalt und Mächtigkeit des Bodens. In der Definition von Permafrostböden, oft auch Dauerfrostböden genannt, sind Gletscher ausgenommen.²

Der Boden muss nicht zwingend Eis enthalten, ausschlaggebend ist die Temperatur. Für den Permafrost sind deshalb einerseits die Sommertemperaturen, andererseits - und fast wichtiger - die Schneeverhältnisse von Bedeutung. Wegen der isolierenden Wirkung der Schneedecke sind insbesondere der Zeitpunkt des ersten großen Schneefalls und die Schneemenge von Bedeutung. Permafrost ist in erster Linie ein Bodentemperaturphänomen. Bildlich gesprochen entsteht er dort, wo der winterliche Bodenfrost im Sommer nicht vollständig auftaut. Es bleibt eine Schicht im Untergrund, die durch das ganze Jahr negative Temperaturen aufweist.

¹ *PermaNETsynthesebericht (2011) S.4*

² *Vgl. PermaNETsynthesebericht (2011) S.4*

2.1.2 Aufbau des Permafrostbodens

Bei Permafrostgebieten muss nach Dr. Johannes Karte zwischen zwei verschiedenen Arten unterschieden werden:

2.1.2.1 Periglazialzonen der hohen Breiten

Für Permafrostvorkommen im Gebiet der hohen Breiten, das heißt ungefähr ab dem 50. Breitengrad, ergibt sich folgende Untergliederung des Bodens (s. Abb.1):

- Bei **kontinuierlichem Permafrost** sind mehr als 90% des Gebietes von Permafrost unterlagert. Er kann bis mehrere 100 m in die Tiefe reichen, so z.B. in Teilen Sibiriens.
- Bei **diskontinuierlichem Permafrost** sind 35 bis 90 % des Gebietes unterlagert. Der Permafrost reicht hier stellenweise nur wenige Meter in die Tiefe.
- Bei **sporadischem Permafrost** sind etwa 5 bis 35 % des Gebiets von Permafrost unterlagert.³

Ausschlaggebend für die auftretende Art von Permafrost sind die regionalen Jahresmitteltemperaturen. So kann kontinuierlicher Permafrostboden nur bei Jahresmitteltemperaturen unter -6°C , diskontinuierlicher zwischen -6°C und 0°C und sporadischer nur über -6°C bestehen.⁴

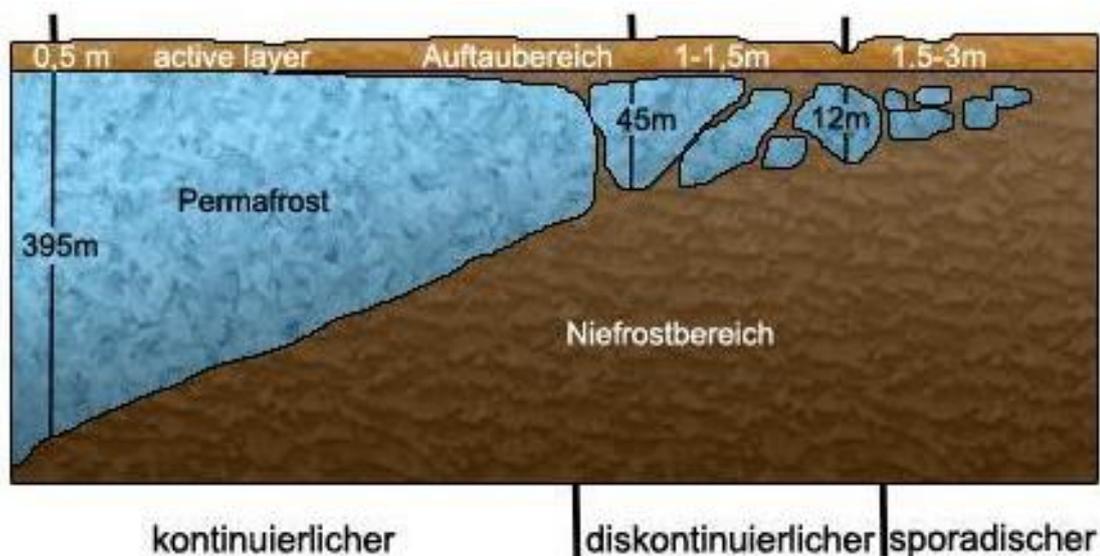


Abb. 1: Querschnitt des Permafrostbodens der nördlichen Breiten

³ Vgl. Nyenhuis, M.: S. 9

⁴ Vgl.: www.geo.fu-berlin.de/fb/e-learning/pg-net/themenbereiche/geomorphologie/periglazialmorphologie/Permafrost/index.html

2.1.2.2 Periglaziale Höhenstufen der Gebirge

Der Aufbau des Permafrostbodens im Hochgebirge bzw. in alpinen Gebirgsregionen mittlerer und niedriger Breiten unterscheidet sich auf Grund von Reliefgegebenheiten, variierender Schneebedeckung, unterschiedlicher Strahlungsbilanz und des Wärmeflusses wesentlich vom Musteraufbau in den nördlichen Breiten. Deswegen ist ein allgemeingültiger Aufbau nicht anzugeben.

Der Permafrostboden der nördlichen Breiten besteht typischerweise aus drei Schichten, wobei die Oberflächenbedeckung als aktive Schicht (active layer) oder Auftauschicht, in höheren Breiten auch als Mollisol, bezeichnet wird, in dem die Temperaturen in saisonalem Wechsel sowohl positiv als auch negativ sein können. Die Mächtigkeit der aktiven Schicht variiert zwischen 0.5 und 8 m. An den active layer kann sich eine thermoaktive Schicht anschließen, die bis zu 20 m in die Tiefe reichen kann, die Permafrosttafel. Diese Schicht erfährt durch die Änderung der jahreszeitlichen Sonneneinstrahlung trotz ihrer Tiefe Temperatur- und Volumenschwankungen. Die nächste und letzte Schicht des Permafrostbodens ist der isotherme Permafrost, der keinerlei Temperaturschwankung unterliegt, da er von den Temperaturverhältnissen der Oberfläche nicht mehr erreichbar ist. Nach unten schließt sich der Niefrostbereich (=Talik) an, der niemals gefriert, da er in den Einflussbereich der Wärmeströmung aus dem Erdinneren kommt.⁵

2.1.3 Verbreitung

2.1.3.1 Global

Permafrost kommt sowohl in arktischen und antarktischen Regionen als auch weltweit in Hochgebirgen vor. „Daneben existieren bedeutende submarine Permafrostvorkommen auf dem sibirischen Kontinentalschelf oder in der Beaufortsee“.⁶ Global ist fast ein Viertel der Landfläche Permafrostgebiet, wobei der überwiegende Anteil - etwa 23 Mio. km² - in der Nordhemisphäre liegt (s. Abb. 2). Nach der ‚Canadian Encyclopedia‘ sind in Grönland etwa 99 %, in Alaska etwa 80 %, in Russland etwa 50 %, in Kanada zwischen 40 und 50 % und in China bis zu 20 % Permafrostböden anzutreffen. Die Eindringtiefen in den Untergrund sind global unterschiedlich. So kann in Sibirien der Permafrostboden bis in eine Tiefe von 1500m reichen, wohingegen er in Skandinavien nur 20m Mächtigkeit erreicht.

⁵ vgl. *PermaNET synthesebericht (2011)* S. 4

⁶ . Nyenhuis, M.: S. 8

Diese Unterschiede haben Ihren Ursprung in der letzten Eiszeit, der Weichseiszeit bzw. der Würmeiszeit, wie sie in Süddeutschland genannt wird, und der damit verbundenen Eisbedeckung: Damals lagen über Nordeuropa gewaltige Eisschilde, die den Untergrund vor tiefgreifender Auskühlung schützten. Sibirien dagegen war nur in geringem Maße vergletschert, wodurch der Boden durch die permanente Kaltluft aus dem Norden tiefgründig auskühlte. In der Antarktis hat Permafrost eine relativ geringe Ausdehnung, weil nur weniger als 1% des Festlandes (55 000 km²) eisfrei ist.

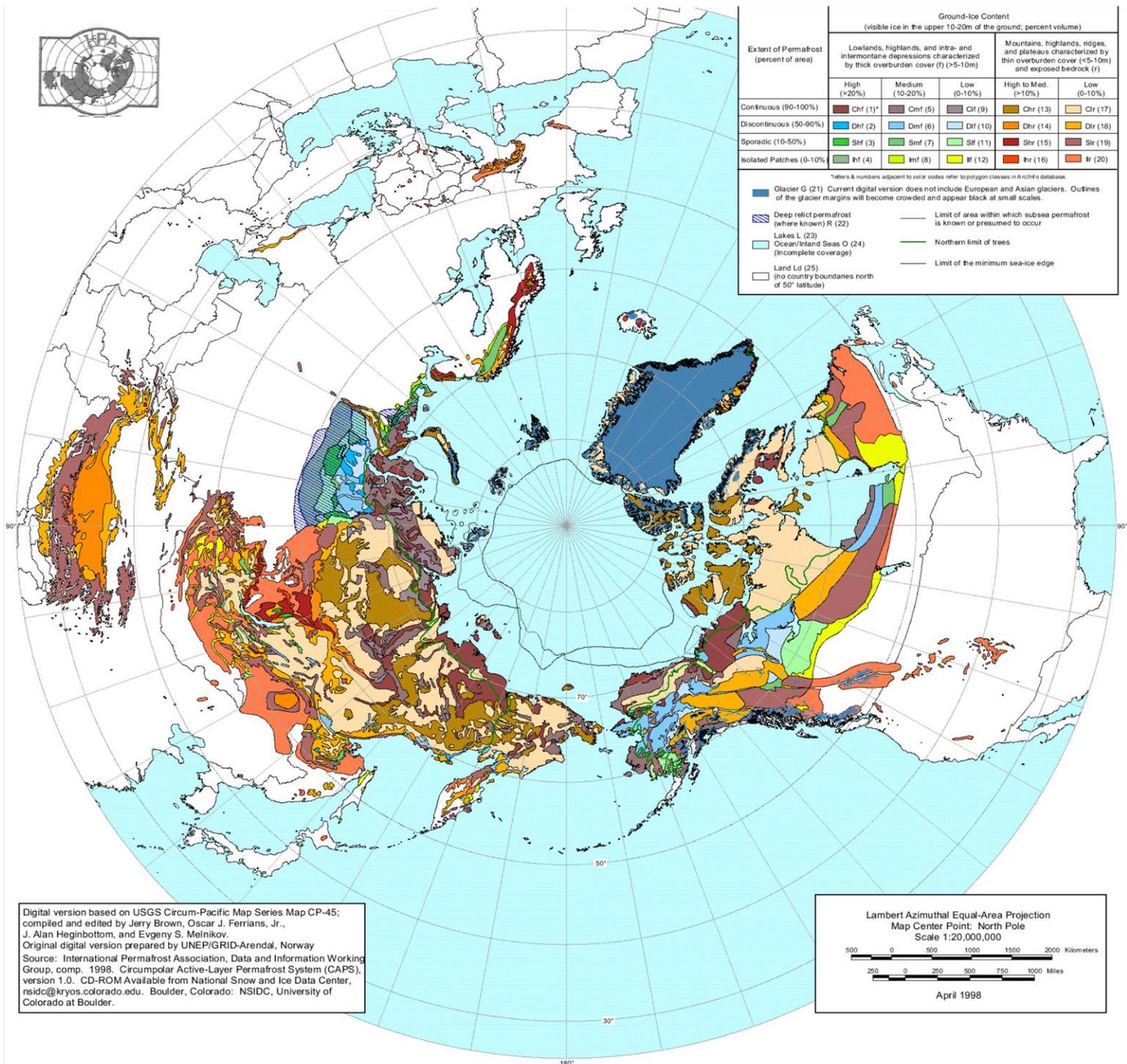


Abb. 2: Verbreitung des Permafrosts auf der nördlichen Halbkugel

In Abb. 2 ist die Verteilung des Permafrostes und des Bodeneises der Nordhalbkugel in einer polständigen Karte dargestellt. Darin werden die Permafrostarten (s. oben), die prozentuale Häufigkeit, die Verteilung im Flachland, Hochland und in Becken sowie im Gebirge, Bergland und auf Plateaus dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass flächenhafter Permafrost in Eurasien und Nordamerika im Wesentlichen nördlich von 50° n. Br. vorkommt. Südlich davon kommt Permafrost nur in Gebirgslandschaften und Hochländern vor.

2.1.3.2 Alpin

In Europa kommt Permafrost ausschließlich in Hochgebirgen vor. Permanent gefrorene Böden sind in den Alpen oberhalb von 2500 m ü. NN. sehr weit verbreitet (s. Abb.3). In Südtirol sind etwa 440 km² bzw. 6% der Landesfläche von Permafrost bedeckt, in Österreich ca. 2000 km², was 2,4% der Fläche entspricht, in der Schweiz 4 bis 6% der Landfläche. „Generell muss bereits oberhalb der Waldgrenze mit Permafrost gerechnet werden. [...] Aufgrund des maßgebenden Einflusses der direkten Strahlung auf die Permafrostverbreitung tritt Permafrost in nordexponierten Hängen in tieferen Höhenlagen auf als an südexponierten Hängen. In NE-, N-, NW- und W-Lagen muss ab ca. 2400 m ü. NN mit diskontinuierlichem und ab 2600 m ü. NN mit kontinuierlichem Permafrost gerechnet werden“.⁷ Auch unterhalb der Waldgrenze kann nach W. Haeberli Permafrost vorkommen, aber nur dann, wenn die Gebiete in extremer Schattenlage liegen. In diesem Fall kann die unterste Grenze für Permafrost auch bei 1000 m ü. NN liegen. Die untere Permafrostgrenze liegt im Durchschnitt beispielsweise in den skandinavischen Gebirgen bei etwa 1500 m, in den Alpen bei ca. 2500 m und in der Sierra Nevada (Spanien) bei über 3000 m.

Folgende Abbildung wurde von der Universität Zürich und dem Team von PermaNET (=Permafrost Long-term Monitoring Network) mit Hilfe von Jahresmitteltemperatur, der potenziellen Sonneneinstrahlung und des mittleren Jahresniederschlags erstellt und zeigt den Permafrost-Index im gesamten Alpenraum. Dieser Index stellt zwar keine Wahrscheinlichkeit dar, gibt aber eine modellierte Permafrostverbreitung in den Alpen an, sodass man sich einen ersten Eindruck von der möglichen Verteilung von Permafrost machen kann.

⁷ Noetzli, J., Gruber, S.: S.115

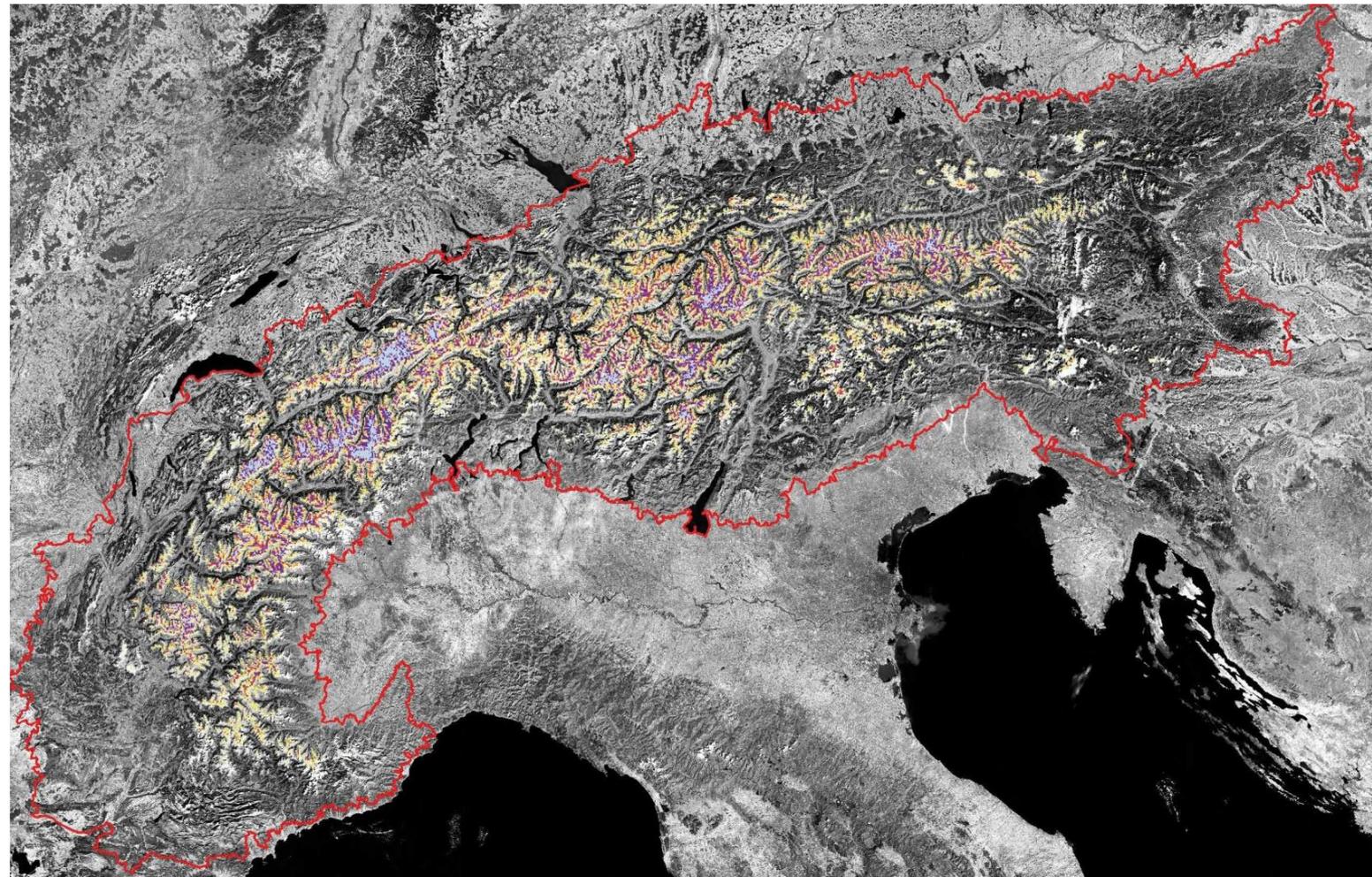


Abb. 3: Modellierte Permafrostverteilung in den Alpen

Legende: Blau=Gletscher; Violett bis gelb=hoher bis niedriger Permafrost-Index

2.1.3.3 Regional am Beispiel der Zugspitze

„In den Bayerischen Alpen sind etwa 66 km² möglicherweise von Permafrost beeinflusst....Die gletscherbedeckte Fläche wird auf vergleichsweise geringe 0,6 km² geschätzt“⁸. Laut einer Pressemitteilung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt vom 10. November 2011 ist aber Permafrost in den Bayerischen Alpen stärker verbreitet als bisher angenommen. Mittlere Permafrost-Wahrscheinlichkeit findet man z.B. auch an der Nordseite der Westlichen Karwendelspitze. Neben dem Watzmann und dem Allgäuer Hauptkamm findet man vor allem im Zugspitzmassiv mit hoher Wahrscheinlichkeit einen immer gefrorenen Boden. Das Zugspitzmassiv ist der einzige Punkt in Deutschland, an dem mit

⁸ PermaNET-BY (2011): S. 16

vertretbarem Aufwand die Auswirkungen des Klimawandels auf den Permafrostboden untersucht werden können.⁹

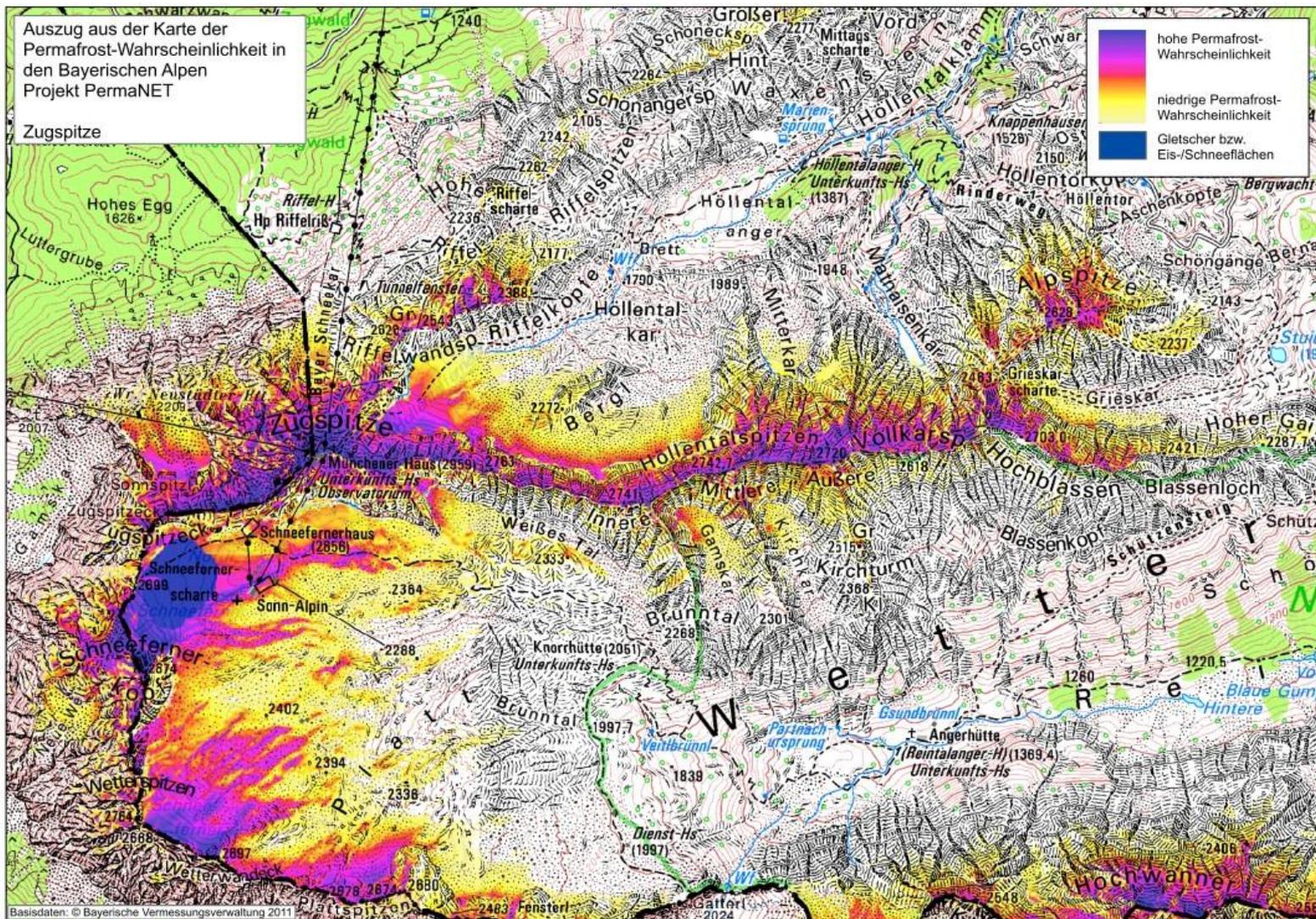


Abb. 4: modellierte Permafrostverbreitung auf der Zugspitze

Wie aus der Karte zu ersehen ist, findet man Permafrost mit hoher Wahrscheinlichkeit einerseits entlang des Grates vom Zugspitzeck über den Zugspitzgipfel entlang des Jubiläumsgates bis zum Hochblassen, andererseits vom Zugspitzeck über den Schneefernerkopf nach Süden zu den Wettersteinspitzen – dort aber nur nordseitig - und dann nur noch vereinzelt nach Osten hin bis zum Hochwanner. „Durch die wahrscheinlich den Felsgrat von der Nordflanke her durchdringende Abkühlung [ist] das Vorhandensein von Permafrost im gesamten gipfelnahen Felsgrat wahrscheinlich.[...]“¹⁰ Im Bereich der

⁹ Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007): S.2

¹⁰ Gude, M. S. 5

S-exponierten Wand kommt der Permafrost nur fleckhaft vor, wobei er „stark mit Relief- und Schneebedingungen variiert. Permafrost tritt hier offensichtlich nur auf, wo hohe winterliche Schneedecken in Depressionen für lang anhaltende Schneelage im Sommer sorgen.“¹¹ Die Schneelage im Sommer verhindert nämlich durch die Albedo die Erwärmung des Bodens. Große Flächen des Zugspitzplattes haben nur eine geringe Permafrostwahrscheinlichkeit. Auch in Gipfelnähe auf der Zugspitze ist die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen von Permafrost relativ hoch.

2.2 Klimawandel bezogen auf die Zugspitze

In der Diskussion über mögliche Auswirkungen des Klimawandels in den Alpen werden neben dem Abschmelzen der Gletscher und dem Anstieg der Niederschlagsintensität in neuerer Zeit oft die Folgen des Auftauens von Permafrost erwähnt. Im Vergleich zum Rückgang der Gletscher ist das Auftauen von Permafrost im Landschaftsbild nicht direkt sichtbar und damit eine meist unterschätzte Gefahr.¹² Darum sind die Untersuchung der Permafrostverbreitung und die Beurteilung der Folgen des Klimawandels auf den Permafrost und auf die damit zusammenhängenden Prozesse mit großen Unsicherheiten verbunden. Die Wissenslücke in diesem Themenbereich führt oftmals zu Spekulationen. Was aber als sicher gilt, ist die sehr sensible Reaktion von Regionen in größeren Höhen auf Klimaschwankungen. Auch der Permafrostbereich auf der Zugspitze (s. Abb. 4) liegt „an oder nahe der Nullgradgrenze und reagiert daher sehr sensibel auf atmosphärische Erwärmung“.¹³ Was sind die wissenschaftlichen Fakten in Bezug auf den Klimawandel? Nach den Daten des Deutschen Wetterdienstes haben sich die Lufttemperaturen auf der Zugspitze in den letzten Jahrzehnten tendenziell erhöht (s. Abb. 5). Besonders auffällig ist die stark gestiegene Durchschnittstemperatur im Jahre 2011 von $-2,74^{\circ}\text{C}$, was die höchste Jahresmitteltemperatur der letzten 110 Jahre ist. Wenn man neuere Daten z.B. der letzten beiden Jahre betrachtet, so war der August 2011 deutlich zu warm. Es lag die Monatsmitteltemperatur um 2,7 Kelvin über dem Mittelwert von $2,2^{\circ}\text{C}$ und die Sonnenscheindauer brachte mit 239 Stunden einen Überschuss von 61 Stunden gegenüber dem langjährigen Mittelwert. Der Monat August 2012 war auf der Zugspitze auch deutlich zu warm, lag bei der Niederschlagsmenge weit über dem Normalbereich und erreichte bei der Sonnenscheindauer immerhin 39 Überstunden. Die

¹¹ Gude, M. S. 3

¹² Vgl. <http://raonline.ch/pages/edu/cli/perma01d02.html>

¹³ PermaNET Synthesebericht (2011) S. 18

gemessene Monatsmitteltemperatur lag mit $5,7^{\circ}\text{C}$ $3,5$ Kelvin über dem Mittelwert von $2,2^{\circ}\text{C}$. Die Maximaltemperatur von $16,7^{\circ}\text{C}$ am 19. August war die höchste jemals gemessene Augusttemperatur auf der Zugspitze. Die Sonnenscheindauer übertraf mit 218 Stunden im August 2012 das langjährige Mittel und erreichte 122%.¹⁴ Allgemein lässt sich für die Zugspitze nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes feststellen:

- ✓ Seit 1900 steigt die Jahresmitteltemperatur
- ✓ Eis- und Frosttage gehen zurück
- ✓ Die Anzahl der Tage unter -25°C geht tendenziell zurück
- ✓ Die Anzahl der Tage mit über 10°C steigt unverhältnismäßig stark
- ✓ Die Anzahl der Sommertage (mehr als 25°C) steigt tendenziell
- ✓ Der Anstieg der Wintertemperatur ist stärker als der der Sommertemperatur
- ✓ Statt Schneefall gibt es mehr Regen
- ✓ Die Schneeschmelze tritt früher ein

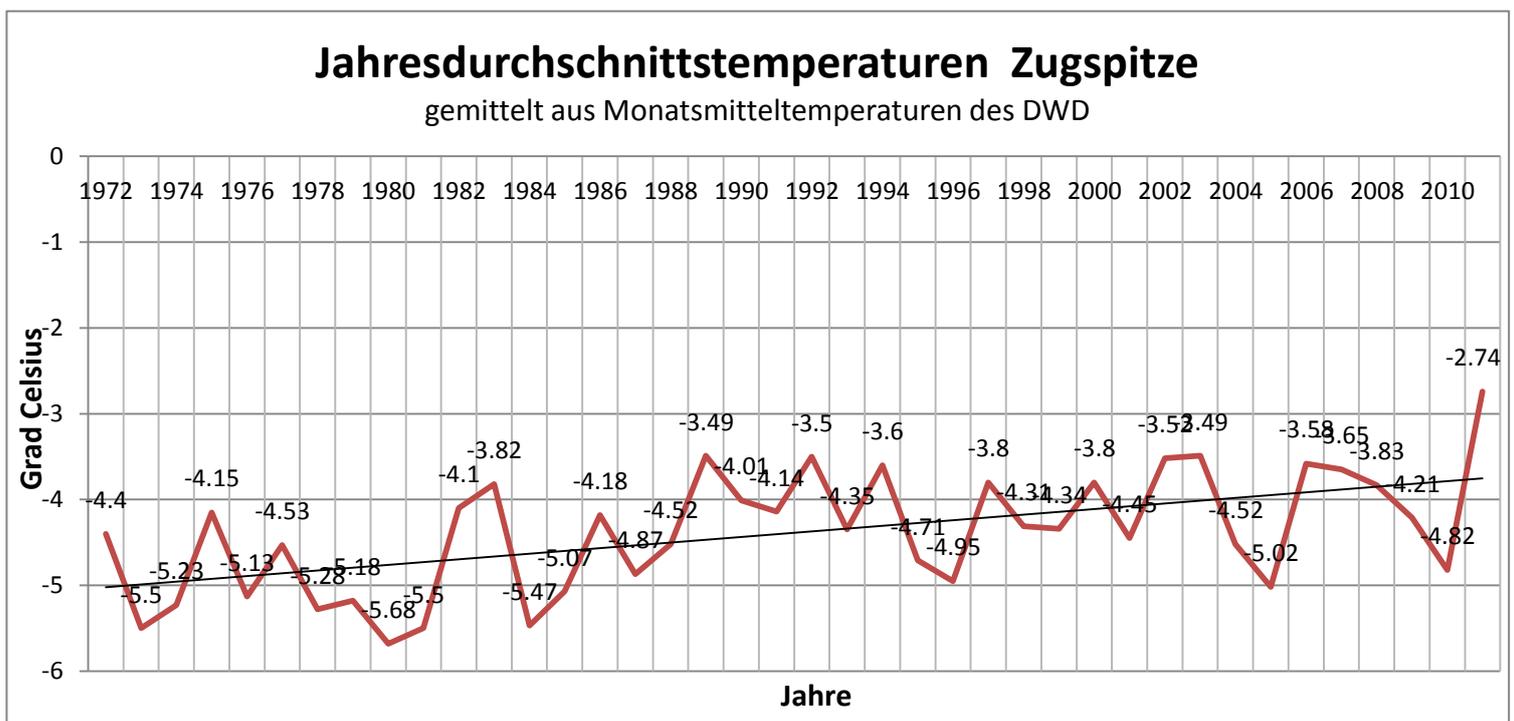


Abb. 5: Jahresdurchschnittstemperaturen Zugspitze

¹⁴Vgl. <http://www.schneefernerhaus.de/wetterdaten/monatsrueckblicke.html> (Sept.2012)

2.3 Einflussfaktoren auf den Permafrost

Wie in Abb. 1 zu sehen, liegt der Permafrost unter einer zum Teil mächtigen Auftauschicht, die einem saisonalen Wechsel der Temperaturen unterworfen ist. „Aufgrund seiner Lage unter dieser Auftauschicht ist Permafrost an der Bodenoberfläche direkt weder sicht- noch messbar und existiert verborgen in Felswänden, ganzen Gipfelregionen oder Schutthalden“. ¹⁵ Besonders in Bergregionen sind die Einflussfaktoren auf den Permafrost sehr komplex und in ihrer Gesamtheit schwer zu erfassen, da die Topographie auf kleinstem Raum sehr heterogen ist. Im folgenden Flussdiagramm (Abb. 6) sind die Einflussgrößen auf die Energiebilanz in Permafrostgebieten dargestellt:

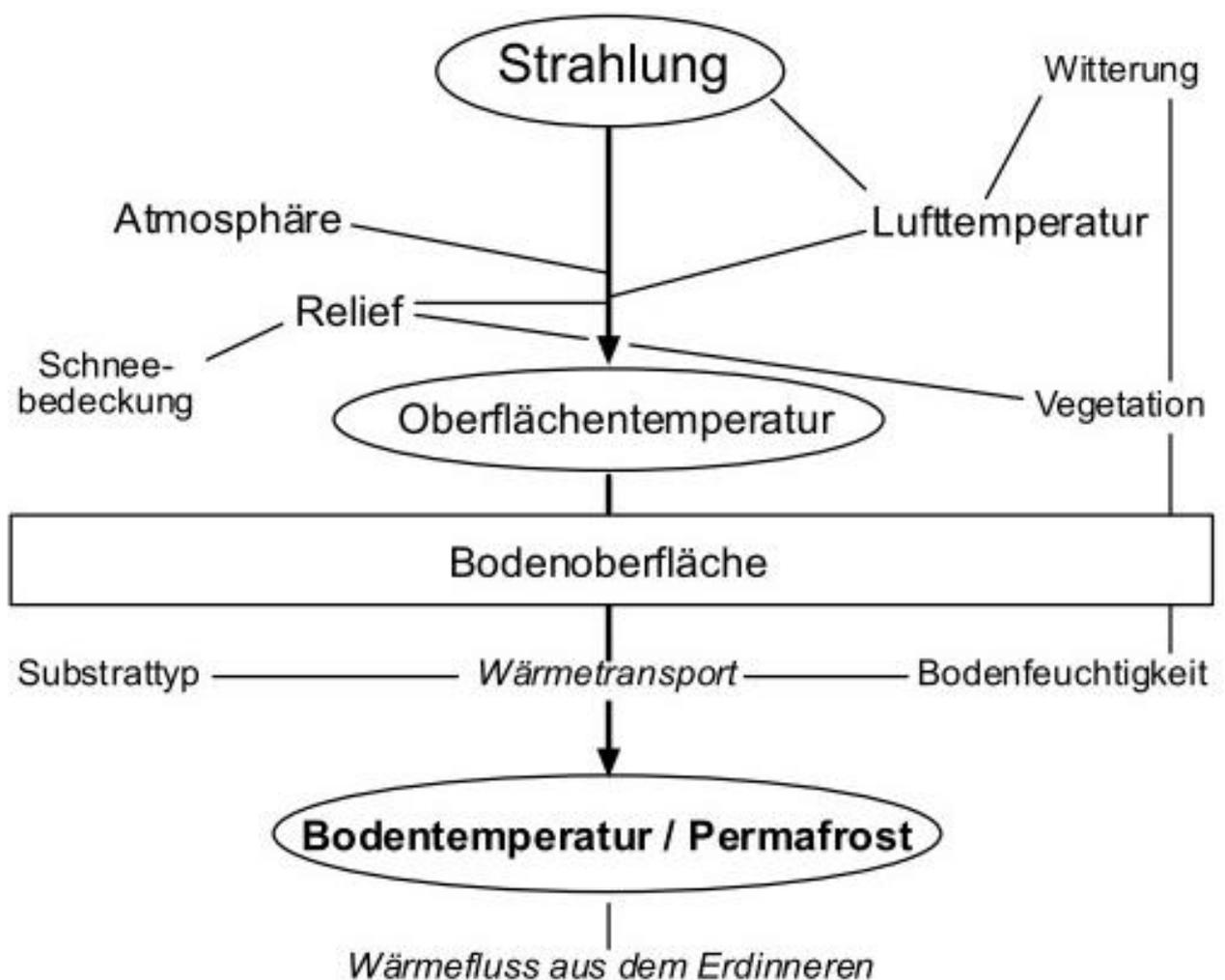


Abb. 6: Einflussfaktoren auf Permafrostböden

Nach dem Diagramm sind die Haupteinflussgrößen für die Energiebilanz und in Folge dessen für den Wärmefluss in den Untergrund die direkte und diffuse kurzwellige und langwellige

¹⁵ Nötzli J., Gruber S. (2005) S. 111

Solarstrahlung, die Oberflächentemperatur (abhängig von Relief und Zustand der Atmosphäre) und die Beschaffenheit der Bodenoberfläche (Schneebedeckung, Material, Bodenfeuchtigkeit, Vegetation, Orientierung). Nicht nur im ebenen Gelände sondern auch im Gebirge ist die auf eine Fläche eingestrahelte Energie z. B. sehr stark von ihrer Ausrichtung, der Neigung und der Abschattung abhängig. Die Schneedecke kann je nach dem Zeitpunkt des Schneefalls wärmeisolierend bei frühem oder kälteisolierend bei spätem Zeitpunkt wirken und außerdem durch die Albedo (die Reflexion der kurzwelligeren Sonnenstrahlung liegt bei 70 bis 90 %) Einfluss auf die Bodentemperatur nehmen. Auch die Bodenart beeinflusst den Wärmetransport über die Wärmeleitfähigkeit. Aus den genannten Gründen „ist es eine komplizierte Aufgabe, die Existenz oder Absenz von Permafrost an einem Ort – oder sogar flächenhaft – genau abzuschätzen“.¹⁶

2.4 Erforschung des Permafrosts auf der Zugspitze

Im Gegensatz zur Erforschung der Gletscherwelt der Alpen ist die wissenschaftliche Untersuchung des alpinen Permafrosts ein noch sehr junger Forschungsansatz. Erst in den 1970er Jahren ist die alpine Permafrostforschung in das Blickfeld der Wissenschaft getreten und erst seit den 1980er Jahren gibt es aussagekräftige Messreihen. Wilfried Haeblerli stellte 1975 Faustregeln zur Erfassung der Permafrostverbreitung in den Alpen auf, die dazu führten, dass man verschiedene Wahrscheinlichkeitsstufen des Permafrostvorkommens in einem Gebiet angeben konnte. In der Folgezeit wurden mit Hilfe der Computertechnik und einer verstärkten empirischen Forschung die mathematischen Modelle zur Abschätzung der Verbreitung des alpinen Permafrosts verfeinert, was dazu führte, dass heute Karten der modellierten Permafrostverteilung in den Alpen (s. Abb. 3 und 4) mit einer Modellgenauigkeit von 100 bis 200 m¹⁷ vorliegen. „Die Permafrost-Karte ist das Ergebnis eines alpenweiten EU-Großprojekts "PermaNET – ein Permafrost-Langzeit-Monitoring Netzwerk", an dem Bayern neben Italien, Österreich, Frankreich und der Schweiz beteiligt war“.¹⁸ Da die Modelle unter stationären Bedingungen erstellt werden, können „keine zeitlich abhängigen dynamischen Reaktionen des Permafrosts“¹⁹ wie zum Beispiel die Reaktion des Permafrosts auf Klimaänderungen und das damit verbundene Gefahrenpotential darin erkannt werden. Dies kann nur durch Feldforschung bzw. Detailuntersuchungen vor Ort

¹⁶ Nötzli J., Gruber S. (2005) S. 114

¹⁷ <http://www.geo.unizh.ch/~hoelzle/E&M/e&mhtml/pfmodell.html>

¹⁸ Bayerisches Landesamt für Umwelt, Pressemitteilung Nr. 42 / 2011

¹⁹ <http://www.geo.unizh.ch/~hoelzle/E&M/e&mhtml/pfmodell.htm>

festgestellt werden. Die Zugspitze ist der einzige Ort in den deutschen Alpen, an dem Messungen zur Erforschung des Permafrostes seit mehr als 10 Jahren stattfinden. Aktuelle Forschungsschwerpunkte sind „(a) die Detektion und Kartierung des Permafrostes sowie die Quantifizierung von Bodeneis in den verschiedenen Landformen, (b) die langzeitliche Beobachtung (Monitoring) des Eisgehaltes, (c) Kinematik von kriechenden Permafrosthängen, (d) Monitoring von Felsinstabilitäten sowie (e) die Modellierung der Permafrostentwicklung unter verschiedenen Klimaszenarien“.²⁰

2.4.1 Feststellungsverfahren – eine Auswahl

Da Permafrost – wie oben erwähnt – an der Oberfläche weder sicht- noch messbar, aber in letzter Zeit von großem wissenschaftlichen Interesse ist, wendet man auf der Zugspitze - und nicht nur da - verschiedene Methoden an um zu einer gesicherten Aussage über die Punkte (a) bis (e) von oben zu kommen und wenn möglich daraus Schlüsse zu ziehen.

2.4.1.1 Geländebeobachtungen

Nach M. Krautblatter²¹ stieß man während des Baus der Zahnradbahn bei der Durchtunnelung zum Schneefernerhaus (dort lag die Endstation der Zahnradbahn) zwischen 1928 und 1930 immer wieder auf Permafrost. Zwischen der Kammstation der alten Tiroler Zugspitzbahn und dem Schneefernerhaus wurde ein Fußgängerstollen angelegt, der heute nicht mehr öffentlich zugänglich ist. Dieser Stollen ist auf einer größeren Strecke ständig vereist (s. unten). Auch beim Bau der Eibseeseilbahn zwischen 1961 und 1963 stieß man im Gipfelbereich auf Permafrost. Beim Bau eines 975 Meter langen Tunnelabzweigs zum Zugspitzplatt („Rosi-Tunnel“) kam es wegen Wassereintruchs, der den schmelzenden Permafrost als Ursache hatte, immer wieder zu Unterbrechungen. Aus dem gleichen Grund kam es auf dem Platt häufig zu Felssackungen. In 2900 m Höhe zwischen Zugspitzgipfel und Zugspitzeck stürzte am Grat eine 30 m tiefe, vorher eisgefüllte Höhle ein, da die Klimaveränderung zu einem Ausschmelzen des Permafrostes führte. Ein weiterer Beweis für vorhandenen Permafrost ist vorhandenes Sommereis im Bereich des Gipfelgrates besonders in nordseitigen Lagen. Anfang der 1990er Jahre wurden bei Ausschachtungsarbeiten beim Gipfelgebäude eisgefüllte Felsspalten entdeckt.

²⁰ Krautblatter M., Hauck C. (2012) S. 62

²¹ Krautblatter, M., et al. (2010), S.2

2.4.1.2 PACE: Permafrost and Climate in Europe

Eine Geländebeobachtung kann zwar zu einer subjektiven Einschätzung der lokalen Situation beitragen, zu einer wissenschaftlichen Aussage führen aber nur exakte Messungen. Diese wurden an der Zugspitze im Rahmen des EU-Projektes Pace von 1999 bis 2001 unter der Federführung des Instituts für Geographie der Friedrich-Schiller-Universität Jena durchgeführt.

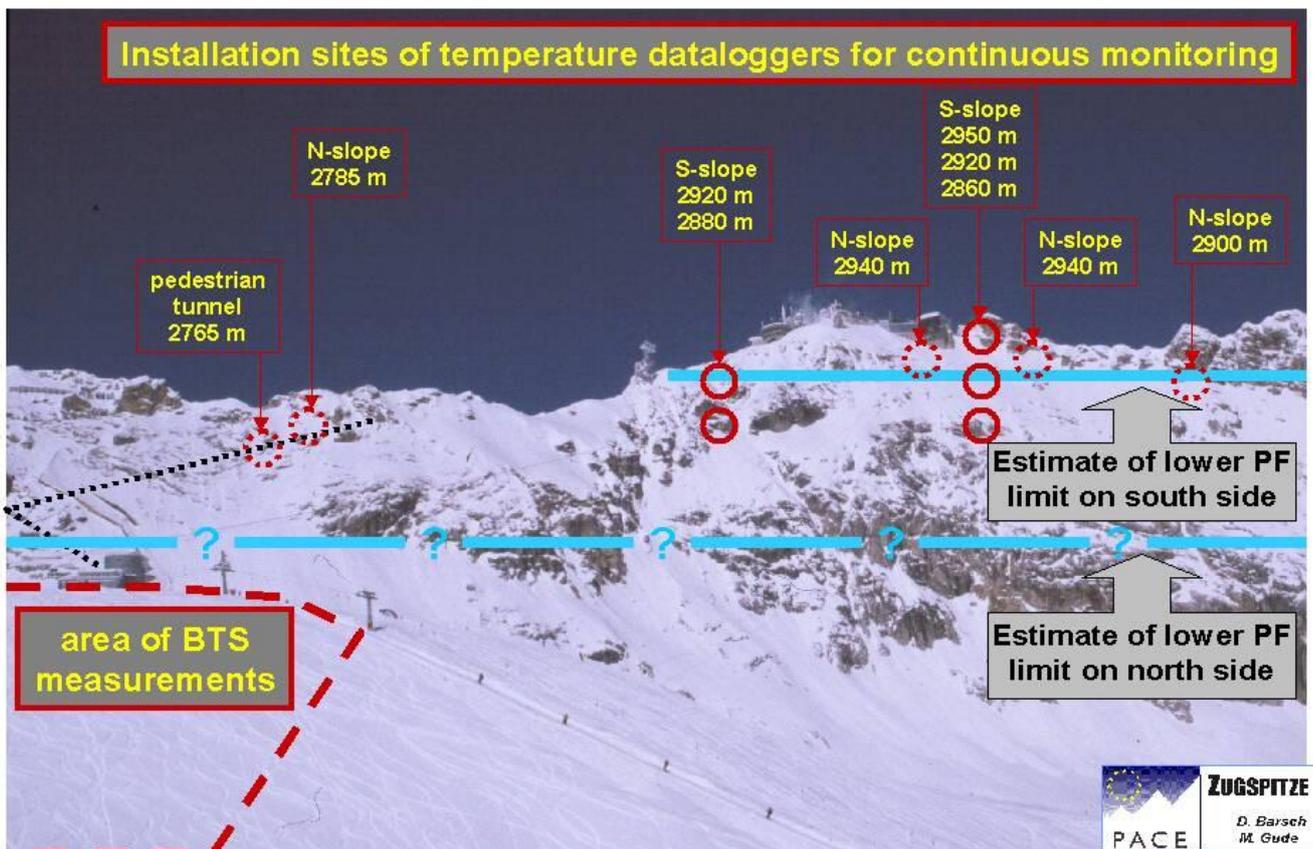


Abb. 7: Orte von Temperatur-Dataloggern beim PACE-Projekt

Im Bereich des Gipfelgrates wurden in den Hängen auf der Nord- und Südseite (N-slope, S-slope) mit Hilfe von Temperatur-Dataloggern kontinuierlich und mit Handmesssonden sporadisch Basistemperaturen des Schnees (BTS), Felstemperaturen in Spalten von 0,5 bis 1 m Tiefe und im Fußgängerstollen zwischen der Kammstation der Tiroler Zugspitzbahn und dem Schneefernerhaus (pedestrian tunnel) gemessen und zusammen mit meteorologischen Messreihen ausgewertet.

Das zweite Messgebiet lag auf dem Zugspitzplatt (area of BTS measurements), wo Messungen der Schneebasistemperatur (an der Grenzschicht zwischen Schneedecke und Boden), die als Gradmesser für das Vorkommen von Permafrost gilt, durchgeführt wurden. Die gesammelten Daten wurden in Zusammenarbeit der Universität und der ETH Zürich mit

Hilfe der mathematischen Modelle PERMAKART und PERMAMAP ausgewertet, wobei ein Höhenmodell und die potentielle Energieeinstrahlung des Zugspitzgebietes zu Grunde gelegt waren. Folgende Aussagen ergaben sich aus den Daten:

Im Bereich des Gipfelgrates werden die Modellergebnisse (s. Abb. 4) bestätigt, dass „der Permafrost im Bereich der S-exponierten Wand nur sporadisch vorkommt und stark mit Relief- und Schneebedingungen variiert. Dieser Grenzsaum reagiert sensibel auf Klimaschwankungen“.²² Die untere Grenze dieses Saums stellt die obere blaue Linie in Abb. 7 dar. Die untere blaue Linie in Abb. 7 ist die mit großen Unsicherheiten behaftete untere Grenze des Permafrostes auf der Nordseite der Zugspitze (s. 2.1.3.2).

Auf dem Zugspitzplatt findet man Permafrost in sporadischer Verbreitung, was der Darstellung in Abb. 4 widerspricht. Einschränkend muss aber gesagt werden, dass dieser Permafrost aus der Vergangenheit (Eiszeit) stammt und mit den heutigen klimatischen Bedingungen nicht erklärbar ist.

2.4.1.3 Messungen im Kammstollen

In dem oben erwähnten 300 m langen Kammstollen in der Nähe der Zugspitznordwand wurden und werden geophysikalische Messungen durchgeführt. In diesem Stollen von 1928 wird in 2800 m Höhe mit Hilfe der elektrischen Resistivitäts-Tomographie (ERT=elektrische Widerstands-Tomographie), Refraktionsseismik-Tomographie (Messung und Interpretation der Laufzeiten von seismischen Wellen, die an Trennschichten im Untergrund gebrochen werden) und Temperaturmessungen der Zustand des Permafrostes auf 280 m überwacht. Dabei werden mit Hilfe von 140 Elektroden (s. Abb. 8), die im Gang verteilt sind, sehr viele Messwerte gewonnen, die mit Hilfe eines speziellen Verfahrens (Inversionsverfahren) ausgewertet werden. Dadurch wird „eine zweidimensionale Tomographie des gefrorenen Felsens erstellt, die bis an die 30 m vom Gang entfernte Außenwand reicht“.²³ Auf Grund dieser Messungen ergab sich, dass im Messbereich eine „Permafrostlinse mit ca. 50 m Durchmesser und Temperaturen im Kernbereich von -0,5 bis 1,5°C“²⁴ vorhanden sind. Dieser begrenzte Permafrostbereich liegt an einer steilen im Winter schneefreien Stelle der Nordwand, wodurch die im Fels vorhandene Wärme nach außen abgegeben wird.

²² Gude, M.; Barsch, D. (2005)

²³ Krautblatter M., Hauck C. (2012) S. 61

²⁴ Krautblatter M., Hauck C. (2012) S. 62



Abb. 8: Messstrecken im Kammstollen

Außerdem ergab sich etwas überraschend, dass an den schneebedeckten Stellen der Nordwand der Permafrost fast nicht mehr existiert. Auch die festgestellte Permafrostlinie ist nur noch der Rest des früher auf mehrere 100 m stark vereisten Ganges.²⁵

2.4.1.4 Forschungsbohrungen

Die bisher geschilderten Methoden zum Nachweis von Permafrost und dessen Veränderung reichen aber häufig nicht aus um die Verbreitung des Permafrostes im Untergrund nachzuweisen. Genauere Auskünfte kann man nur durch ein Eindringen in den Untergrund erhalten sei es ungewollt durch Abbruchflächen bei Fels- und Bergstürzen, Bewegung der Geländeoberfläche oder ganz bewusst durch Anlegen eines Bohrloches. In der Schweiz sind netzwerkartig ca. 30 Bohrlöcher bis in eine Tiefe von 100 m angelegt worden um Permafrost im Rahmen eines nationalen Permafrostmonitoring Programms (Permos) zu erforschen. In den Italienischen Alpen wurden 34 Bohrlöcher angelegt. Auf Deutschlands höchstem Berg sollte im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt (finanziert vom Bayerischen Umweltministerium) ebenfalls eine Forschungsbohrung niedergebracht werden. Der Standort auf der Zugspitze wurde nach Angaben von Dr. von Poschinger (Leiter der Bohrung) auch

²⁵ Vgl. Krautblatter M., Hauck C. (2012) S. 61

deswegen gewählt, da die Bayerische Zugspitzbahn für den Transport der schweren Geräte einen Standortvorteil gegenüber dem Allgäuer Hauptkamm oder dem Watzmannstock darstellte.

2.4.1.4.1 Voruntersuchung

Zunächst ging es darum den optimalen Standort für die Forschungsbohrung zu finden. Dazu wurden Dr. Nötzli, Dr. Gruber und Dr. Haeberli vom Geographischen Institut der Universität Zürich mit der Erstellung eines 3D-Modells der thermischen Bedingungen im Bereich des Gipfelgrates der Zugspitze beauftragt. Nach deren Berechnungen tritt Permafrost hauptsächlich auf der Nordseite des Grates nördlich des Gipfels der Zugspitze auf. Durch den Wärmefluss von der Süd- zur Nordseite wird die Verbreitung des Permafrostes stark beeinflusst (s. Abb. 9) und dadurch ändern sich die Temperaturen im Wesentlichen in horizontaler Richtung und nicht wie im Flachland in vertikaler. Als Ergebnis der Voruntersuchung für den Ort der Bohrung ergab sich: „Eine sinnvolle und fachgerechte Beobachtung von dauerhaften Veränderungen im Permafrost ist nur über ein Bohrloch im Gipfelbereich möglich“.²⁶

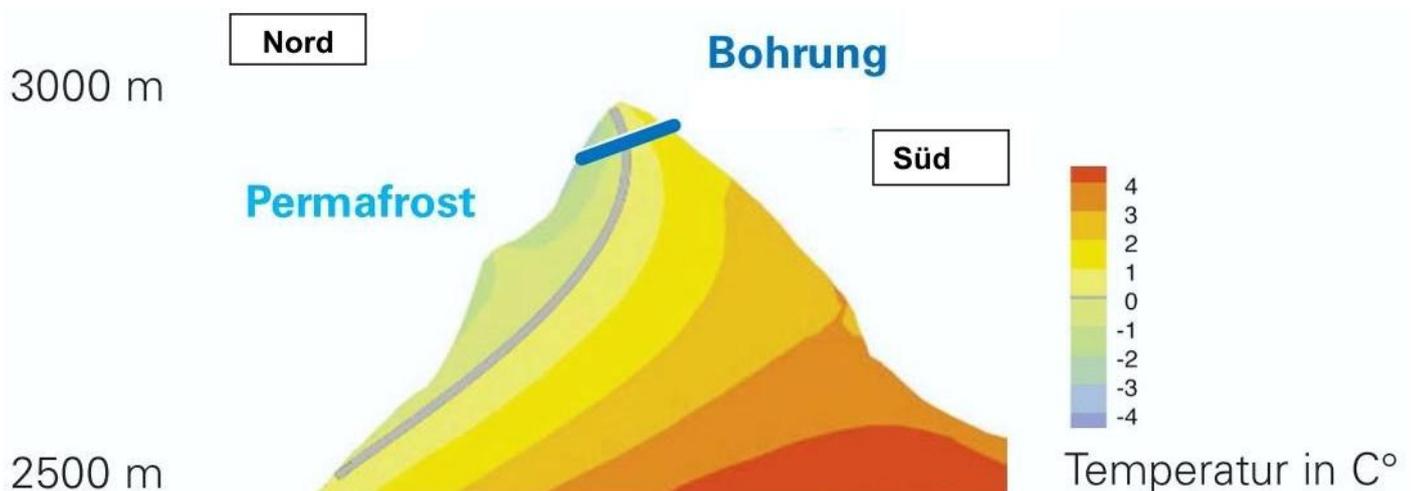


Abb. 9: Temperaturverteilung auf der Zugspitze und Verlauf der vorgeschlagenen Bohrung

²⁶ Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007) S. 3

2.4.1.4.2 Projektierung

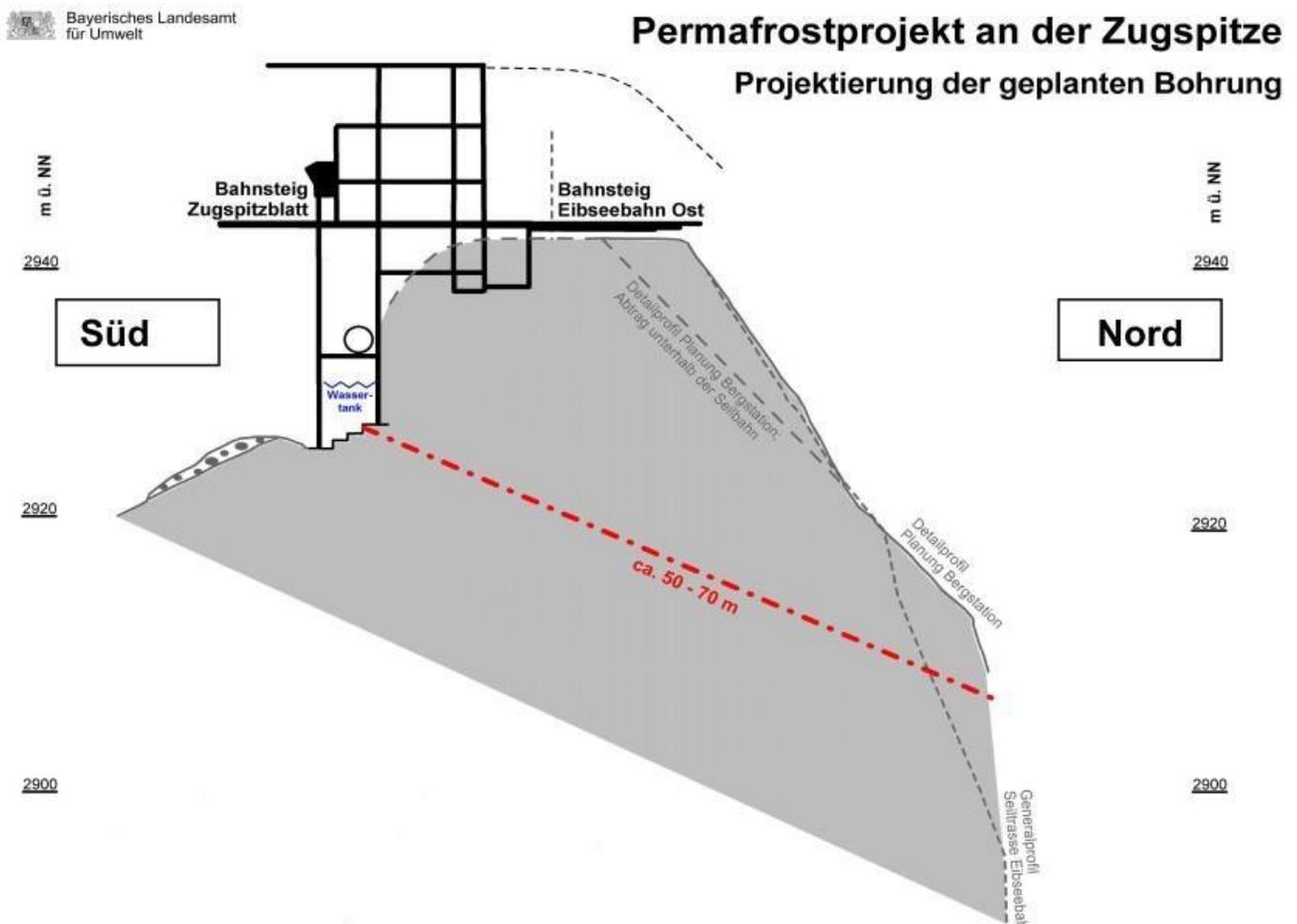


Abb. 10: Projektierter Verlauf der Bohrung

Bei einer Länge von 50 bis 60 m soll die Bohrung in der Nähe der Gipfelbebauung von Süden nach Norden und mit einer Neigung von 20° gegen die Horizontale den Kamm durchstoßen. Nordseitig wird das Bohrloch verschlossen. Baubeginn sollte der August 2007 sein.

2.4.1.4.3 Ausstattung des Bohrlochs

In dem Bohrloch von 120 mm Durchmesser wird eine Kamera die Gebirgsstruktur aufzeichnen. Außerdem wird über ein Extensiometer die Deformation innerhalb des Gebirges gemessen. Die Innentemperaturen werden einerseits mit Hilfe von 25 elektronischen Temperatursensoren andererseits über ein Glasfaserkabel mit Hilfe von Licht gemessen, was unter diesen Bedingungen eine Weltneuheit darstellt. Die Daten werden jeweils nach einer Stunde ausgelesen und gespeichert und können dann bequem mit Hilfe des Mobilfunks abgerufen werden.

Genau gesagt sind im August 2007 zwei Bohrlöcher in 2922 m ü. NN von Süden her angelegt worden: Die Bohrung Ost mit 58 m Länge und einer Neigung von 25° und die Bohrung

West mit 44 m Länge und einer Neigung von 20°. Nur die Bohrung West durchstößt den Gipfelgrat. Die folgenden Angaben beziehen sich auf das Bohrloch West.²⁷

2.4.1.4.4 Ergebnisse der Messungen

Die Messungen begannen im November 2007 und sollen bis 2021 durchgeführt werden um längerfristig Beobachtungen anstellen zu können. In der ersten aber sehr kurzen Beobachtungsphase vom 1. November 2007 bis 29. Oktober 2008 erstreckte sich der Permafrostbereich zwischen 8,6 m im Südbereich und 2 m im Nordbereich der Bohrachse von 44 m Länge. Bei 8,6 m vor dem südlichen Ende schwankten die Temperaturen zwischen -0,7°C im November und -1,8°C im Juni/Juli. Diese Messergebnisse bestätigen zwei schon bekannte Fakten z.B. aus der Schweiz:

- Durch verzögerte Wärmeleitungsvorgänge im Untergrund (im Bereich der Permafrosttafel, (s. 2.1.2.2) erreicht die Temperatur ihre Extremwerte mit einer Verzögerung von bis zu ca. einem halben Jahr gegenüber der Oberflächentemperatur.

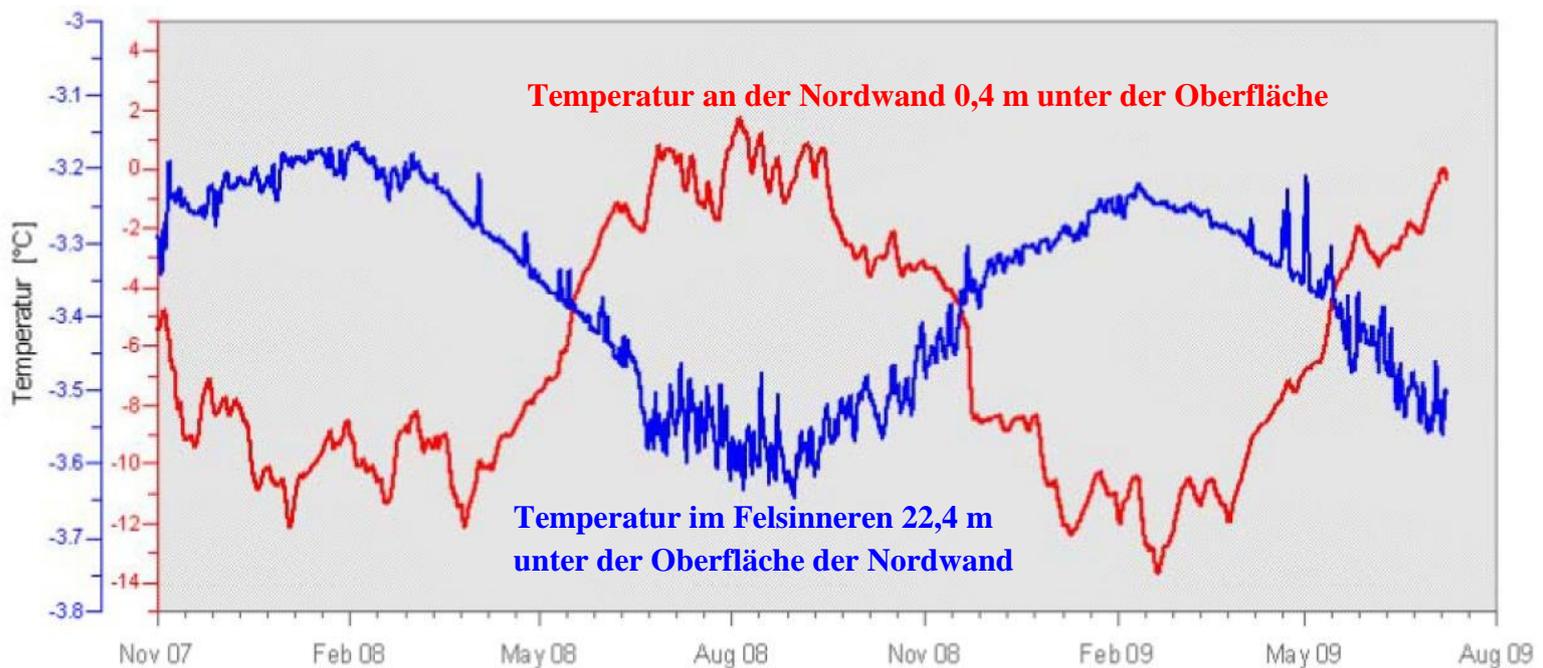


Abb. 11: Jahresverlauf der Temperaturen im Felsinneren und an der Felsoberfläche

- Je näher der Messort am kontinuierlichen Permafrost liegt desto geringer ist die Temperaturänderung bis sie praktisch nicht mehr vorhanden ist. (s. Abb. 12)

²⁷Vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007) S. 3

Bei einer Entfernung von 2 m vom nördlichen Ende des Bohrloches liegen die Temperaturen zwischen -9°C im März/April und $-1,8^{\circ}\text{C}$ im September. Auch hier tritt eine kleine zeitliche Verzögerung der Extremwerte der Temperatur ein. Da aber der Messpunkt nicht so tief im Bohrloch liegt, ist die Verzögerung nicht so deutlich. Durch die fehlende direkte Sonneneinstrahlung und die fehlende Schneeeauflage außen am steilen Fels sind die Temperaturen nordseitig wesentlich tiefer als auf der Südseite, was auch dazu führt, dass die Permafrostgrenze nordseitig näher an der Oberfläche liegt (s. 2.3).

In der Zwischenzeit liegen Temperaturdaten von 2007 bis 2012 vor (s. Abb. 12). Leider konnten keine exakten Werte der Temperaturen verwendet werden, da diese nicht verfügbar waren. Die im Diagramm verwendeten Daten stammen aus einer relativ ungenauen Graphik des Bayerischen Landesamts für Umwelt, wodurch Fehler in der Übertragung entstanden sein können. Trotzdem lässt sich hier neben den schon erwähnten Punkten eines deutlich erkennen: Der Permafrostbereich hat sich gegenüber der ersten Beobachtungsphase deutlich verkleinert, nämlich von ca. 35,5 m auf ca. 28 m (s. Abb. 12).

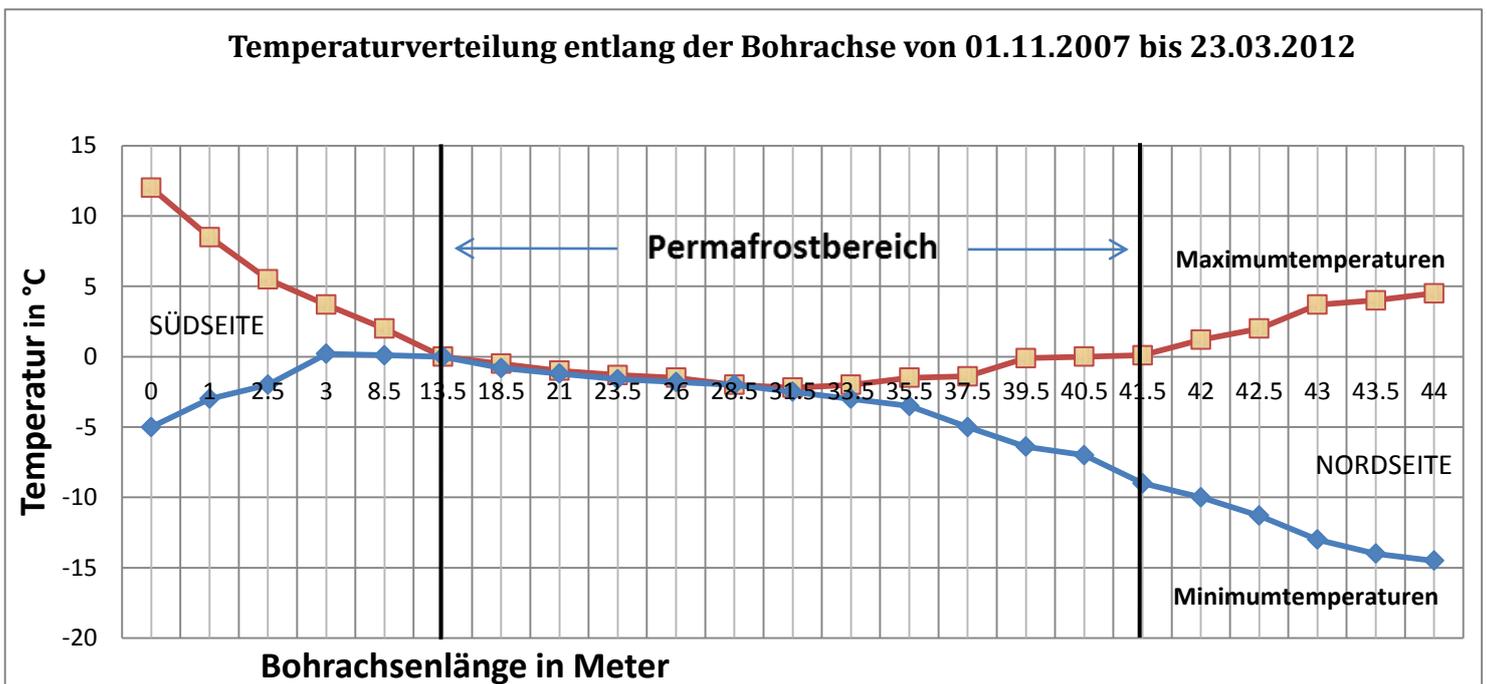


Abb. 12: Temperaturen entlang der Bohrachse

2.4.2 Folgerungen aus den Messergebnissen

Fasst man die Ergebnisse aller Feststellungsverfahren für Permafrost auf der Zugspitze zusammen, so lässt sich sagen²⁸:

- Kontinuierlicher Permafrost kommt nur am Gipfelgrat vor
- Auf der Südseite des Grates kommt Permafrost erst in einer Tiefe von ca. 15 m vor
- An besonders begünstigten Stellen kann Permafrost südseitig lokal vorkommen wie z.B. auf dem Zugspitzplatt
- An der Nordseite beginnt der Permafrost schon in relativ geringer Tiefe
- Der active layer (Auftauschicht) ist nur auf der Nordseite zu beobachten
- Die Nullgrad-Isotherme, die gleichzeitig die Permafrostgrenze darstellt, verläuft im Felsinneren steil in Richtung Zugspitzgipfel (s. Abb. 9), da sich die Untergrundtemperaturen nur leicht mit der Tiefe verändern, wesentlich stärker aber mit der Lage zwischen Nord- und Südseite des Grates.
- Die sich ändernde Auftautiefe von 3,5 m auf 2,8 m und die Verkleinerung des Permafrostbereiches im Inneren des Gipfelbereichs von ca. 35 m auf ca. 28 m ist ein deutlicher Hinweis auf das sensitive Verhalten des Permafrostes auf Klimaveränderungen

2.5 Folgerungen aus den Forschungen

Der Permafrostbereich auf der Zugspitze reagiert wie oben erwähnt sehr sensitiv, also sehr feinfühlig, auf klimatische Veränderungen, da er nahe an der Nullgradgrenze und in sehr steilem Felsgelände anzutreffen ist. In Deutschland stieg seit 1901 die Jahresmitteltemperatur um ca. 1,0°C, in den Alpen um ca. 1,5°C. Nach Expertenmeinung wird bis zum Jahr 2100 die weltweite Erwärmung der Erdoberfläche 2 – 5°C betragen, wobei sich die Alpen wahrscheinlich deutlich stärker erwärmen werden. Jedoch ist zu beachten, dass diese Erwärmung nicht gleichmäßig vor sich geht, sondern „stärkere und häufigere Extremwerte hervorbringen und sich unterschiedlich auf Tag-/Nacht- sowie Sommer-/Wintertemperaturen auswirken“²⁹ wird. Was die Extremwerte betrifft, so haben der Jahrhundertsommer 2003 oder der sehr heiße Sommer im Jahr 2006 schon deutliche Spuren in Permafrostgebieten hinterlassen. Zum Beispiel lag die Felstemperatur 2006 in der Eiger-Nordwand auf

²⁸ Vgl. PermaNET-By (2011) S. 6f

²⁹ Nötzli J., Gruber S. (2005) S. 118

2800 m ü. NN höher als in früheren Jahren und die Auftauschicht am Corvatsch in der Schweiz bei St. Moritz erreichte mit einer Tiefe von über 3,5 m die größte Tiefe seit Beginn der Messung im Jahre 1987. Die extremste Folgewirkung des Temperaturanstiegs in den Alpen zeigte sich jedoch am Schilthorn bei Interlaken in der Schweiz, wo die Auftauschicht am 23.11.2003 fast 9 m erreichte und damit doppelt so mächtig war wie in den Jahren seit Beginn der Messung 1998.³⁰ Diese und andere Ereignisse und vor allem Messdaten aus den Bohrlöchern in den Alpen weisen darauf hin, dass die Untergrundtemperaturen ansteigen. Dies zeigt sich auch wie oben ausgeführt (s. 2.4.2) auf der Zugspitze. Einschränkend muss gesagt werden, dass die Beobachtung auf der Zugspitze noch nicht so lange dauert, dass man gesicherte Erkenntnisse daraus ziehen könnte. Die wenigen Messwerte scheinen aber die Ergebnisse aus der Schweiz, Österreich und Italien zu bestätigen.

Zur Erklärung des vorhandenen Permafrostes auf der Zugspitze und um zukünftige Entwicklungen im Permafrostbereich abschätzen zu können, müssen auch hier 3-dimensionale Rechenmodelle erstellt werden. Für den Bereich der Zugspitze wurde vom Geographischen Institut der Universität Zürich 2011 durch J. Nötzli, S. Gruber und L. Böckli ein 3-D-Modell angefertigt (s. Abb.13).

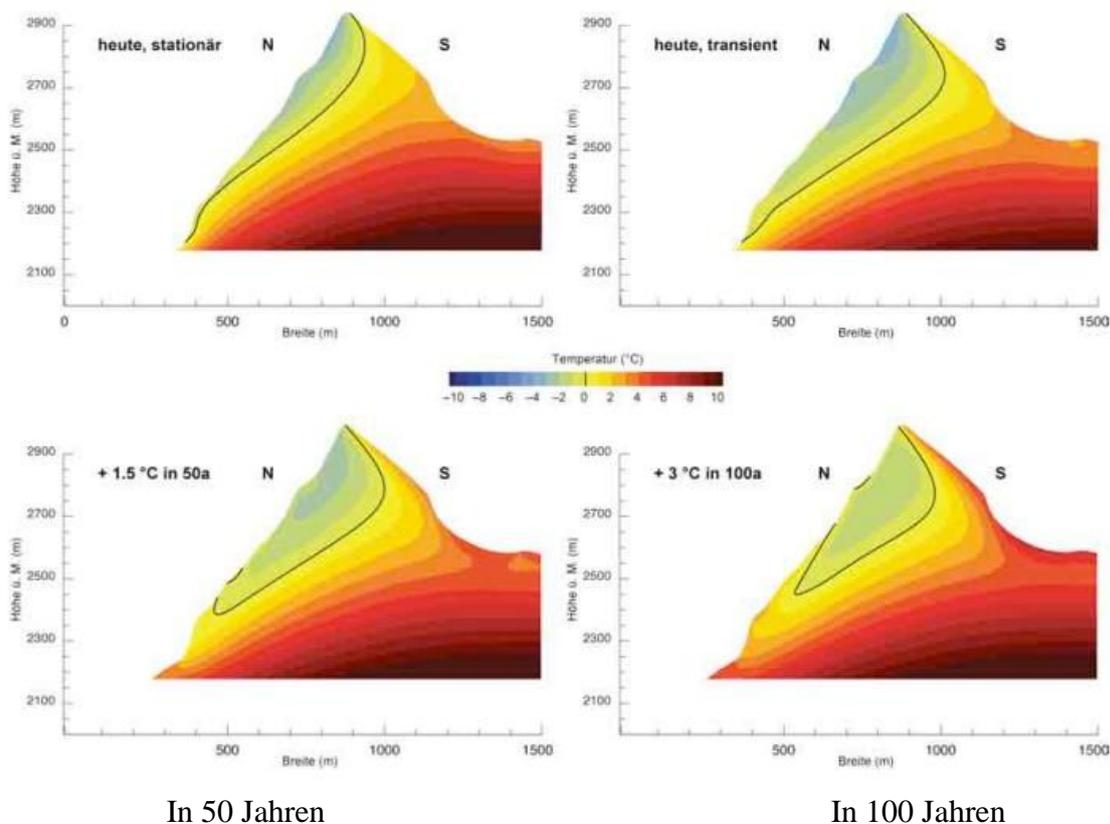


Abb. 13: modellierter Temperaturverlauf auf der Zugspitze in Abhängigkeit verschiedener Klimaszenarien

³⁰ Vgl. Permafrost Monitoring Switzerland (Permos) (2007) S. 29/30

Im ersten Bild ist die Verteilung des Permafrostes dargestellt wie sie sich nach den herrschenden Oberflächentemperaturen ergeben würde. Es ist aber heute im Gipfelgrat noch Permafrost vorhanden, der aus Resten der letzten Eiszeit besteht (transienter Anteil). Deshalb ist im zweiten Bild der Permafrostbereich ausgedehnter als im ersten Bild. Die weitere Entwicklung wird im Abstand von 50 Jahren und einer Temperaturzunahme von jeweils 1,5°C betrachtet, was durchaus im oben angegebenen Bereich liegt. Im dritten und vierten Bild ist deutlich festzustellen, dass die Erwärmung von Süden und von Norden ins Berginnere vordringt und dass die 0°-Grenze sich unregelmäßig von unten nach oben verschiebt. Letztendlich ist in 100 Jahren nur noch ein geringer Teil des heute vorhandenen Permafrostes übrig geblieben, der auch noch wärmer als der heutige Teil ist. Die Temperatur der nordseitigen Berghänge liegt im kritischen Bereich zwischen -2 und 0°C, weil „dann Fels, Eis und Wasser miteinander auftreten können“.³¹

Es lässt sich zusammenfassend feststellen:

- Die Zunahme der Lufttemperatur auf der Zugspitze führt zum Anstieg der Oberflächentemperatur und damit der Untergrundtemperatur und Erwärmung des Permafrostes, was jedoch ein längerfristiger Prozess ist.
- Die Erwärmung des Permafrostes führt zum Abschmelzen des Permafrostes (Degradierung), wodurch die räumliche Erstreckung des Permafrostbereiches abnimmt.
- Die Mächtigkeit der Auftauschicht auf der Nordseite bzw. im Kammbereich der Zugspitze nimmt zu.
- Erhöhung der Felstemperatur durch eindringendes Schmelzwasser und damit Beschleunigung des Abschmelzvorgangs im Permafrost

2.6 Gefährdungspotential auf der Zugspitze

Aus den genannten thermischen Veränderungen und dem damit verbundenen Übergang steiler Felsbereiche in den kritischen Temperaturbereich kann es zu einer zunehmenden Instabilität der betroffenen Gesteinspakete und des in den Felsklüften gefrorenen Lockermaterials kommen. Denn durch die Zunahme der aktiven Schicht und durch die Degradation des Eises im Untergrund verlieren das Lockermaterial und der Fels das Eis als stabilisierendes Element,

³¹ Haeberli, W.; Maisch, M. (o.J.) S. 104

als Klebemittel. Experimente und Simulationen haben ergeben, „dass die Stabilität von eisgefüllten Klüften mit steigender Eis-/Felstemperatur abnimmt und im Bereich von ca. -1,5 bis 0°C ein Minimum erreicht.“³² Wie in Abb. 13 zu sehen ist, liegen große Teile des nordseitigen Permafrostbereichs und der Gipfelregion in diesem Temperaturbereich oder werden in Zukunft dorthin gelangen. Durch den Klimawandel muss man grundsätzlich mit folgenden geomorphologischen Reaktionen auf den Rückgang von Permafrost im Zugspitzgebiet rechnen:

- Subsidenz (Absack-)erscheinungen auf dem Zugspitzplatt
- Veränderungen bei den kryogenen (eisgenerierten) Verwitterungsprozessen wie z.B. Frostsprengung
- Zunahme des Volumens und der Ausdehnung der Instabilitätsbereiche besonders im Bereich des Grates
- Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Steinschlägen, Felsstürzen und Rutschungen
- vermehrte Murgänge im Zusammenhang mit Starkniederschlägen³³

2.7 Gefährdungen der Infrastruktur im Zugspitzgebiet bei Permafrostdegradierung

Wie schon mehrfach erwähnt erstreckt sich der Permafrostbereich auf der Zugspitze im Umfeld des Grates. Genau in diesem Bereich befinden sich aber größere Bauwerke, auf welche sich das Abschmelzen des Permafrostes negativ auswirken könnte. Deutsches und österreichisches Gipfelhaus wurden auf den Fels mit eisgefüllten Spalten gebaut. Durch den möglichen Wärmefluss und die Wärmestrahlung aus den Gebäuden in den Untergrund könnte der Permafrost aufgetaut werden. Dies könnte zu Horizontal- und Vertikalbewegungen der Gebäude führen, die wiederum eine Rissbildung und ein Kippen nach sich ziehen könnten. Auch die Seilbahn-Zuganker der Tiroler und Bayerischen Zugspitzbahn und die Seilbahn vom Zugspitzplatt sind im Grat verankert, was bei tauendem Permafrost zu Instabilitäten führen könnte. Dies gilt auch für die Sendemasten der Deutschen Bundespost und des Österreichischen Rundfunks, für das Gebäude der Deutschen Telekom und für den meteorologischen Turm des Deutschen Wetterdienstes, der schon 1900 neben dem Münchner

³² Nötzli J., Gruber S. (2005) S. 119

³³ Vgl. PermaNET synthesebericht S. 18

Haus von 1897 auf dem Permafrostboden erbaut wurde. Die Wasser- und Stromleitungen, die in Stollen und Tunnel verlaufen, können ebenfalls durch das Abschmelzen des Eises in Mitleidenschaft gezogen werden. Im Tunnel der Zahnradbahn könnte sich durch das Abschmelzen des Bodeneises eine deutliche Absenkung des Gleiskörpers ergeben. Lift- und



Abb. 14: Bauwerke am Zugspitzgrat

Seilbahnmasten, auch der neuen Wetterwandeckbahn, könnten durch ausschmelzendes Eis im Untergrund instabil werden. Schließlich könnte das Schneefernerhaus durch Steinschlag aus den steilen Felsbereichen, die sich oberhalb befinden, und durch sackende Fundamente bei tauendem Permafrost gefährdet sein.³⁴ Aber der Steinschlag oder ein Felssturz oder eine abgehende Mure gefährden bei abschmelzendem Permafrost nicht nur das Schneefernerhaus, sondern auch Wanderwege, Aufstiegsrouten, Klettersteige und Berghütten wie z.B. die Aufstiegsroute über die Wiener-Neustädter-Hütte und die Hütte selbst, den Klettersteig im Höllental, den Aufstieg vom Sonnalpin zum Zugspitzgipfel oder die Tour über den Jubiläumsglat. Auch Gebiete am Fuße der Zugspitze können durch den abschmelzenden Permafrost im Bereich des Zugspitzgrates betroffen sein. Vor ca. 3700 Jahren lösten sich

³⁴ Vgl. Gude, M.; Barsch, D. (o.S)

zwischen Zugspitze und Großer Riffelwandspitze ca. 300 bis 400 Millionen m³ Fels und bedeckten ca. 15 km² Talfläche zwischen dem Eibsee und Grainau. Nach Meinung von Experten war die Ursache von diesem Großen Eibsee Bergsturz der tauende Permafrost am Ende des holozänen Klimaoptimums.

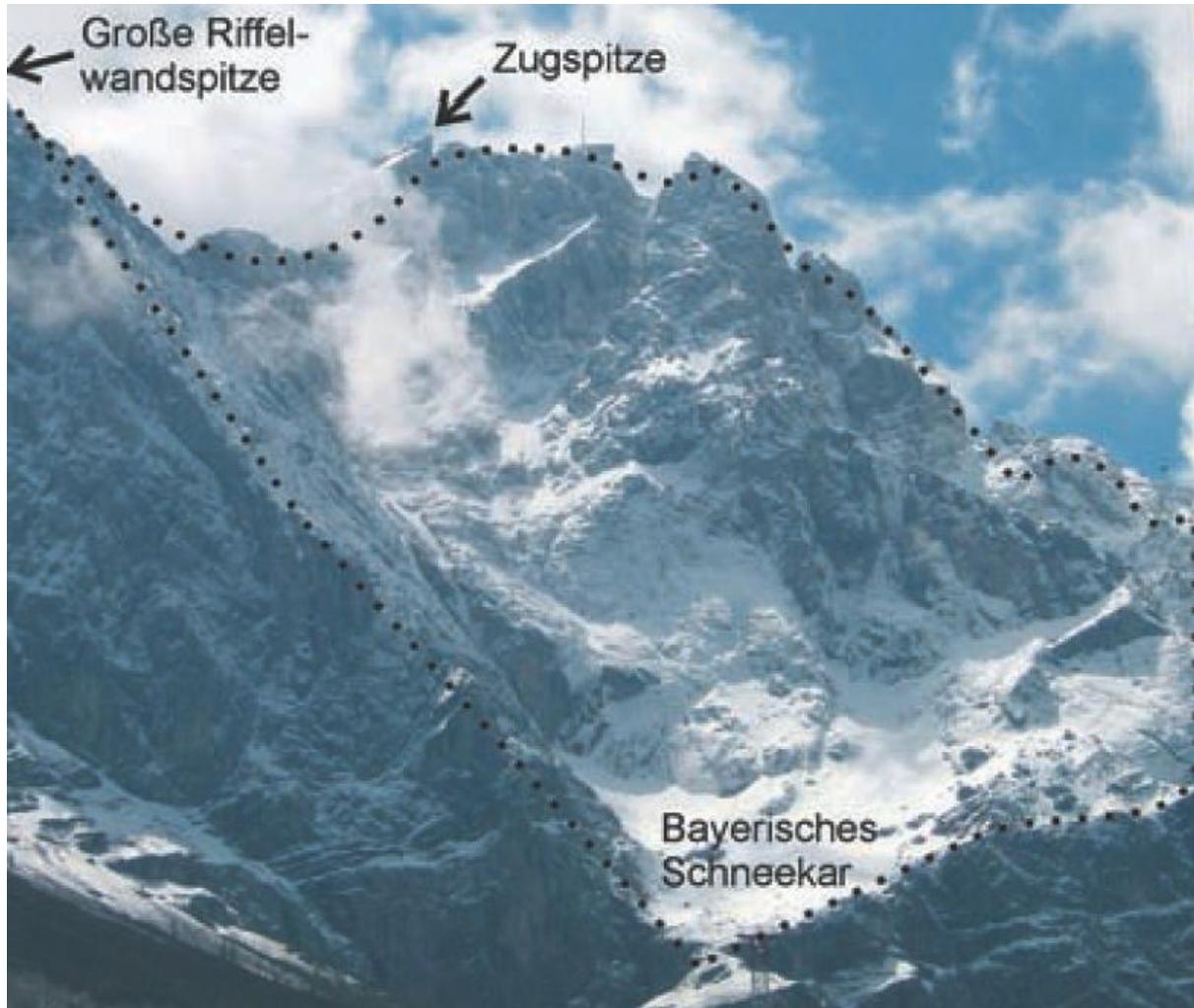


Abb. 15: Gebiet des Eibsee-Bergsturzes

Auch zwischen 1999 und 2004 sind drei Felsstürze mit einem Volumen zwischen 1000 und 30000 m³ Fels aus dem Bereich des wahrscheinlichen Permafrostes der Nordseite der Zugspitze dokumentiert.³⁵ Gude und Barsch entwickelten ein Gefährdungsmodell für Fels- und Bergstürze in der Zugspitzregion, welches in folgender Abbildung wiedergegeben ist.

³⁵ Vgl. Gude, M.; Barsch, D. (2004): Assessment of geomorphic hazards in connection with permafrost occurrence in the Zugspitze area S. 91

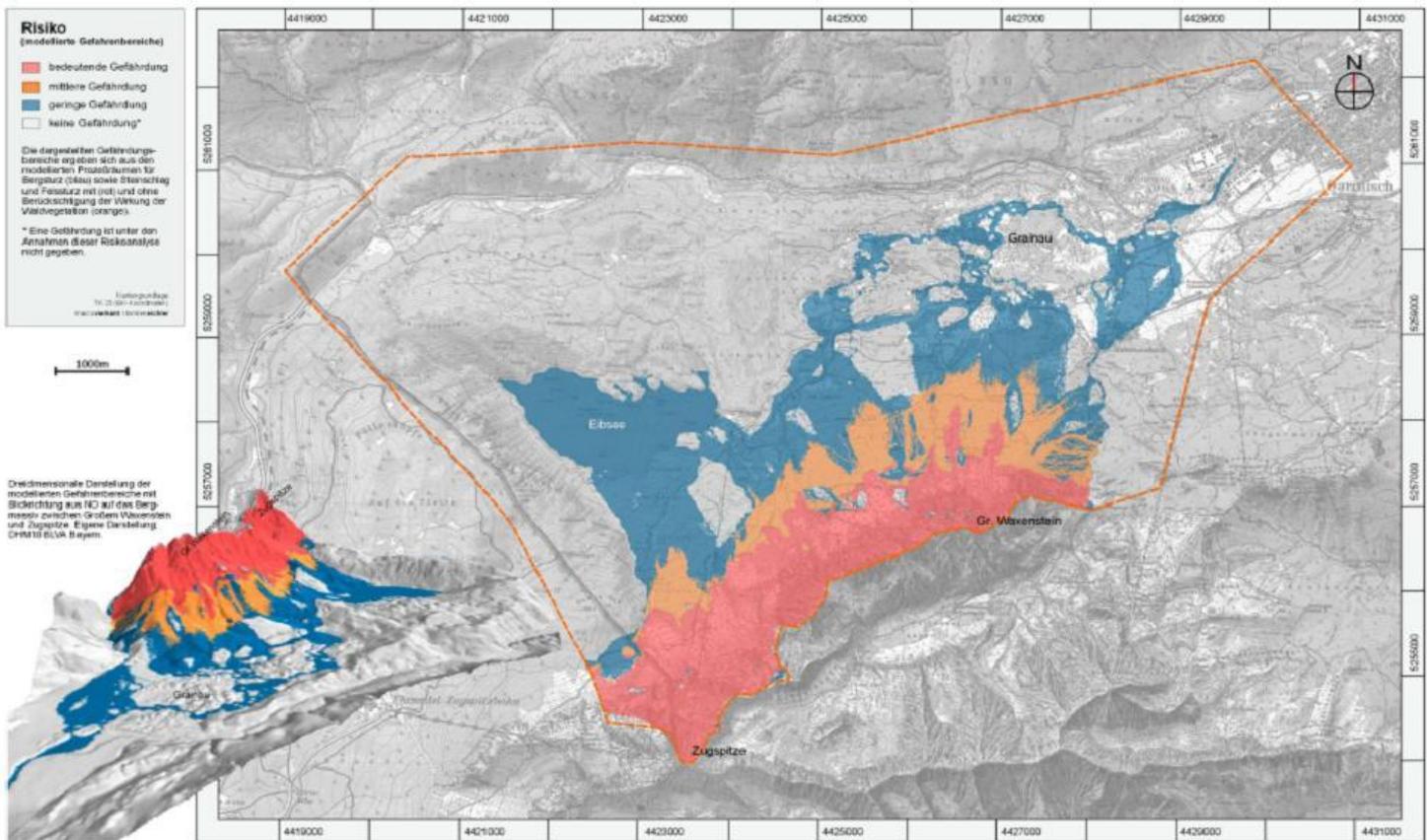


Abb. 16: Gefahrenbereiche im Gebiet der Zugspitze

Die Abbildung 16 zeigt, dass die nach Norden vorgelagerten Gebiete zwischen Zugspitze und Großem Waxenstein eine bedeutende Gefährdung in den höheren Bereichen (rot) und eine geringe Gefährdung (blau) am Fuße des Zugspitzmassivs aufweisen. Weiter entfernt liegende Gebiete (grau, weiß) sind nicht gefährdet.³⁶ Diese Gefährdung sollte auf keinen Fall unterschätzt werden, da in den letzten Jahren im gesamten Alpenraum verstärkt Felssturzaktivitäten beobachtet wurden, die auf das verstärkte Abschmelzen des Permafrostes durch überdurchschnittliche Jahrestemperaturen, z.B. im Jahre 2003 am Matterhorn, in der Eiger Nordwand, an der Dent Blanche und am Piz Bernina, zurückgeführt werden.

³⁶ Gude, M.; Barsch, D.

3 Fazit: Risikobewertung

Fakt ist das Vorhandensein von Permafrost in der Umgebung des Zugspitzgrates. Aber nach Meinung von Dr. Martin Gude von der Universität in Jena ist „die momentane geotechnische Stabilität... in Bezug auf den Einfluß des Permafrostes auf der Zugspitze als ausreichend anzunehmen.“³⁷ Auch die Gipfelgebäude und Seilbahntrassen, die im Fels verankert sind, besitzen nach der momentanen Permafrostsituation vermutlich genügend Sicherheit. Da aber heute eine Klimaerwärmung auftritt und sich aller Wahrscheinlichkeit nach in Zukunft noch verstärken wird, ist damit zu rechnen, dass die räumliche Verteilung des Permafrostes im Gebiet der Zugspitze rückläufig sein wird. Außerdem wird die Auftauschicht auf der Nordseite und damit auch durch das Ausschmelzen von Lockersedimenten in den Klüften die Gefahr von Murgängen zunehmen. Die Permafrostdegradierung kann auch zu einer Veränderung im Abflussverhalten von Niederschlägen führen, was einen Anstieg der Hochwassergefahr bedeuten kann. Grundsätzlich wird aber durch die Erwärmung und das Ausschmelzen des Permafrostes der Fels weniger stabil sein, obwohl Permafrost immer noch vorhanden sein wird. Man sollte zwar bedenken, dass sich Temperaturänderungen an der Bodenoberfläche mit einer zeitlichen Verzögerung von Jahren, Jahrzehnten oder gar von Jahrhunderten auf den Permafrost auswirken (können), was aber nicht zur Negierung der Risiken verleiten soll, da es wegen der Kürze der Zeit der Untersuchungen noch kein wissenschaftliches Modell für das Verhalten von Permafrost auf der Zugspitze gibt. Die angeführten Felssturzaktivitäten und andere genannte Folgeerscheinungen des schmelzenden Permafrostes sollten Mahnung genug sein. Um das gegebene Risiko zu minimieren, muss der Permafrostbereich auf der Zugspitze kontinuierlich wissenschaftlich beobachtet werden, damit, falls es notwendig ist oder sein wird, rechtzeitig reagiert werden kann.

³⁷ Gude, M. S. 5

4 Abbildungsverzeichnis

Abb.1: http://www.geo.fu-berlin.de/fb/e-learning/pg-net/themenbereiche/geomorphologie/medien_geomorph/medien_geomorph_periglazial/Permafrost_meridional1.gif

Abb.2: http://nsidc.org/fgdc/maps/ipa_browse.html

Abb.3: PermaNET (2011): Permafrost Long-term Monitoring Network, Synthesebericht, Schriftenreihe 1, Report 3 (Klagenfurt) S. 10/11

Abb.4: <http://www.merkur-online.de/lokales/landkreis-garmisch-partenkirchen/permafrost-gap-mm-1485642.html>

Abb.5: Eigene Darstellung

Abb.6: Nyenhuis, M. (2005): Permafrost und Sedimenthaushalt in einem alpinen Geosystem. (Bonn) S. 13

Abb.7: Gude, M.(2002): Verbreitung und geotechnische Bedeutung von Permafrost im Zugspitzmassiv (Jena) S. 3

Abb.8: Krautblatter, M., et al. (2010): Temperatur-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps), Journal of Geophysical Research, Vol. 115 (o.O.)

Abb.9: Bayerisches Landesamt für Umwelt (o. J.): Permafrost-Forschung in der Zugspitze, Poster Bayerisches Landesamt für Umwelt (Augsburg)

Abb.10: Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007): Permafrostuntersuchungen an der Zugspitze (o.O.) S. 3

Abb.11: Bearbeitet nach „Bayerisches Landesamt für Umwelt Permafrostbeobachtung an der Zugspitze 1. November 2007 - 8. Juli 2009“

Abb.12: Eigene Darstellung

Abb.13: Böckli, L., Nötzli, J., Gruber, S.(2011): PermaNET-BY Untersuchung des Permafrosts in den Bayerischen Alpen, Teilprojekt PermaNET (EU AlpineSpaceInterreg IVb) (Zürich) S. 34

Abb.14: Bearbeitet nach <http://img.fotocommunity.com/images/Berge/Gipfel-und-Grate/Zugspitze-aus-der-Luft-a22556733.jpg>

Abb.15: Krautblatter, M., et al. (2010): Temperatur-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps), Journal of Geophysical Research, Vol. 115 (o.O.)

Abb.16: Gude, M.; Barsch, D. (o.J.): Permafrost im Zugspitzgebiet: aktuelle Verbreitung und geotechnische Bedeutung (Jena)

5 Literaturverzeichnis

Publikationen:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007): Permafrostuntersuchungen an der Zugspitze (München)

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Referat Klimaschutz (o.J.): ClimChAlp Klimawandel, Auswirkungen und Anpassungsstrategien im Alpenraum; Strategisches Interreg-III-B-Alpenraum-Projekt (München)

Böckli, L.; Nötzli, J.; Gruber, S. (2011): Schlussbericht PermaNET-BY Untersuchung des Permafrosts in den Bayerischen Alpen Teilprojekt PermaNET (EU AlpineSpace Interreg IVb)

Bommer, C.; Phillips, M.; Keusen, H.-R.; Teyssere, P. (2009): Bauen im Permafrost: Ein Leitfaden für die Praxis. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, (Birmansdorf)

Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2005): Hinweiskarte der potentiellen Permafrostverbreitung in der Schweiz Erläuterungen (o.O.)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008): Klimawandel in den Alpen, Fakten – Folgen – Anpassung (o.O.)

Deutscher Wetterdienst Wetterwarte Garmisch-Partenkirchen/Zugspitze 1900 bis 2006

Gauderon, A.; Pajarola, C. (2002): Korrelation zwischen Permafrost und Lawinnenniedergängen in der Landschaft Davos (Davos)

Gruber, S. (2005): Mountain Permafrost: Transient Spatial Modelling, Model Verification and the Use of Remote Sensing (Zürich)

Gude, M.; Barsch, D. (o.J.): Permafrost im Zugspitzgebiet: aktuelle Verbreitung und geotechnische Bedeutung (Jena)

Gude, M.; Barsch, D. (2004): Assessment of geomorphic hazards in connection with permafrost occurrence in the Zugspitze area (Bavarian Alps, Germany), *Geomorphology* 66, 85 – 93 (o.O.)

Gude, M. (2002): Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt: Verbreitung und geotechnische Bedeutung von Permafrost im Zugspitzmassiv (Teil des EU-Projektes: PACE – Permafrost and Climate in Europe) (Jena)

Haerberli, W. et al., (1998): Ten years after drilling through the permafrost of the active rock glacier Murtel, eastern Swiss alps: Answered questions and new perspectives (Yellowknife)

Haerberli, W.; Maisch, M. (o.J.): Klimawandel im Hochgebirge, S. 98 – 107 (Zürich)

Harris, C. et al., (2009): Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modeling thermal, geomorphological and geotechnical responses, *Earth-Science Reviews*, doi:10.1016/j.earscirev.2008.12.002, (Cardiff)

Harris, C. et al., (2003): Warming permafrost in European mountains, *Global and Planetary Change* 39, S. 215 – 225 (Cardiff)

Hübl, J.; Kienholz, H.; Loipersberger, A. (2006): DOMODIS – Dokumentation alpiner Naturereignisse (**D**ocumentation of **M**ountain **D**isasters). Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Schriftenreihe 1 Handbuch 1, (Klagenfurt)

Krainer, K. (2007): Permafrost und Naturgefahren in Österreich. Ländlicher Raum Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Jahrgang 2007 (o.O.)

Krautblatter, M.; Hauck, C. (2011, erschienen 2012): Neue Forschungsansätze zur räumlichen und zeitlichen Dynamik des Gebirgspermafrosts und dessen Naturgefahrenpotentials, *Polarforschung* 81 (1), 57 – 68 (o.O.)

Krautblatter, M. (o.J.): Kurzbericht: Einrichtung eines Geoelektrik-Permafrost-Monitorings an der Zugspitze (o.O.)

Krautblatter, M. et al, (2010): Temperature-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps); JOURNAL OF GEOPHYSIKAL RESEARCH; VOL.115, F02003, doi: 10.1029/2008JF001209 (Berlin)

Noetzli, J. et al., (2007): Three-dimensional distribution and evolution of permafrost temperatures in idealized high-mountain topography; JOURNAL OF GEOPHYSIKAL RESEARCH; VOL. 112, FO2S13, doi: 10.1029/2006JF000545

Nötzli J., Gruber S., (2005): Alpiner Permafrost – ein Überblick, Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt, 70. Jahrgang, S. 111 – 121,(München)

Nötzli, J., Gruber, S., Haeberli, W. (o.J.): 3D-Modellierung der thermischen Bedingungen im Bereich des Gipfelgrates der Zugspitze (Zürich)

Nyenhuis, M. (2005): Permafrost und Sedimenthaushalt in einem alpinen Geosystem (Bonn)

Paul, F., Bauder, A., Marty, C., Nötzli, J., (2011): Schnee, Gletscher und Permafrost 2009/10, Kryosphärenbericht der Schweizer Alpen, Die Alpen, S. 46 - 52 (o.O.)

PermaNET (2011): Permafrost Long-term Monitoring Network, Synthesebericht, Schriftenreihe 1, Report 3 (Klagenfurt)

Pfarr, P. (1931): Die Bayerische Zugspitzbahn, AEG Mitteilungen Heft 4 (Berlin)

Umweltbundesamt (2006): Klimagefahr durch Tauenden Permafrost, UBA-Hintergrundpapier (Dessau)

Vonder Mühl, D.; Noetzli, J.; Roer, I. (2010): Permos – A Comprehensive Monitoring Network of Mountain Permafrost in the Swiss Alps (Zürich)

Digitale Literatur:

<http://img.fotocommunity.com/images/Berge/Gipfel-und-Grate/Zugspitze-aus-der-Luft-a22556733.jpg>

http://nsidc.org/fgdc/maps/ipa_browse.html

http://www.geo.fu-berlin.de/fb/e-learning/pg-net/themenbereiche/geomorphologie/medien_geomorph/medien_geomorph_periglazial/Permafrost_meridional1.gif

<http://www.geo.unizh.ch/~hoelzle/E&M/e&mhtml/pfmodell.html>

<http://www.global-greenhouse-warming.com/mountainpermafrost.html>

<http://www.merkur-online.de/lokales/landkreis-garmisch-partenkirchen/permafrost-gap-mm-1485642.html>

<http://www.schneefernerhaus.de/wetterdaten/monatsrueckblicke.html> (Sept.2012)

Erklärung über das selbständige Verfassen der Seminararbeit

Ich versichere, dass ich die vorliegende Seminararbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Texten entnommen sind, wurden unter Angabe der Quellen (einschließlich des World Wide Web und anderer elektronischer Text- und Datensammlungen) und nach den üblichen Regeln des wissenschaftlichen Zitierens nachgewiesen. Dies gilt auch für Zeichnungen, bildliche Darstellungen, Skizzen, Tabellen und dergleichen.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift