

Lokalklimaanalyse

**Die unterkühlte Blockschutthalde mit
Hexenwäldli im Brüeltobel (AI) im Vergleich
mit zonalen Permafrostgebieten**

**Maturaarbeit von Pascal Egli
Vorgelegt bei Patrick Hager
Eingereicht am 26.1.07**

Kantonsschule am Burggraben

Ich widme diese Arbeit meinem Freund Timo

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung.....	4
1.1 Themenwahl	4
1.2 Begriffe.....	4
1.3 Literatur.....	5
1.4 Fragestellungen und Hypothesen	5
1.5 Vorgehen	6
2 Brüeltobel.....	7
2.1 Gebietsbeschreibung	7
2.2 Indikatoren	8
2.2.1 Kümmerfichten	8
2.2.2 Beobachtete Indikatoren	9
2.3 Klimafaktoren	10
2.3.1 Grundlagen zum Energiehaushalt.....	10
2.3.2 Strahlung.....	12
2.3.2.1 <i>Im Zusammenhang mit dem regionalen Klima</i>	12
2.3.2.2 <i>Einfluss der Topografie</i>	13
2.3.3 Lufttemperatur.....	16
2.3.4 Niederschlag	17
2.3.5 Windsystem in der Blockschutthalde	18
2.3.5.1 <i>Verschiedene Theorien</i>	18
2.3.5.2 <i>Windlöcher</i>	19
2.3.5.3 <i>Theorie von Wegmann</i>	19
2.3.5.4 <i>Erkenntnisse vom Creux du Van</i>	20
2.3.5.5 <i>Folgerungen für das Brüeltobel</i>	21
2.4 Bodentemperaturmessungen.....	22
2.4.1 Wegmann.....	22
2.4.2 Philipps et al.....	22
2.5 Temperaturaufzeichnungen im Brüeltobel, Oktober 2006	23
2.5.1 Durchführung	23
2.5.2 Messergebnisse.....	26
2.5.2.1 <i>Tagesmittel</i>	27
2.6 Feldprotokolle	28
3 Der alpine Permafrost.....	33
3.1 Definition	33
3.2 Grundlagen	33
3.3 Verbreitung	34
3.3.1 Topografische Ermittlung von Permafrost.....	34
3.3.2 Indikatoren für Permafrost.....	35
3.4 Nutzen der Permafrostforschung	36
3.4.1 Bauprojekte	36
3.4.2 Naturgefahren	36
3.5 Klimabeispiel Corvatsch.....	37
3.5.1 Gebietsbeschreibung	37
3.5.2 Klimafaktoren	37
4 Vergleich Brüeltobel – Corvatsch.....	39

4.1	Auswertung	39
5	Ergebnisse	41
5.1	Brüeltobel	41
5.1.1	Energiebilanz	41
5.1.2	Klimafaktoren	41
5.1.3	Hinweise auf eine niedrige Energiebilanz	42
5.1.4	Temperaturmessungen	42
5.2	Vergleich mit zonalem Permafrost	43
5.2.1	Gegenüberstellung	43
5.2.2	Schlüsse	44
6	Diskussion	45
6.1	Brüeltobel	45
6.1.1	Lokalklima	45
6.1.2	Andere Ursachen für Zwergwuchs von Kümmerfichten	45
6.1.3	Feldversuche.....	46
6.2	Vergleich mit zonalem Permafrost	47
6.3	Ausblick.....	48
6.3.1	Warmes Jahr 2006.....	48
6.3.2	Zukünftige klimatische Entwicklung	48
6.3.3	Bedeutung für das Brüeltobel.....	49
7	Schlusswort	50
8	Dank	51
9	Literaturverzeichnis	52
9.1	Sekundärliteratur.....	52
9.2	Landeskarten	53
9.3	Internetquellen	53
9.4	Weitere Quellen	54
9.5	Abbildungen	54
10	Bestätigung der Eigentätigkeit	55

1 Einleitung

1.1 Themenwahl

Die majestätische Bergwelt und die Macht der Elemente haben mich schon immer fasziniert. Da ich mich in meiner Freizeit häufig in den Bergen bewege, beschäftigte ich mich schon früh mit den meteorologischen Verhältnissen, um meine Unternehmungen planen zu können und aus Interesse an der Wetterkunde.

Auf diesen Touren stiess ich im Gebirge mehr als einmal auf Stellen im Gelände, deren Verhältnisse auf irgendeine Weise extrem waren: Sei dies ein starker Wind, der durch einen ausgeprägten Sattel pfeift, ein Hang, der mit besonders viel Schnee gesegnet worden war, oder eine schattige Schlucht, die sich einem im Sommer während dem Schweiss treibenden Aufstieg als willkommene Abkühlung präsentiert.

Nachdem ich mich für die Analyse eines speziellen Lokalklimas entschieden hatte, wählte ich mit dem Brüeltobel in Appenzell Innerrhoden eine ebensolche Schlucht, genauer gesagt einen Hang dieser Schlucht, zum Gegenstand meiner Maturaarbeit.

Dieser Hang fällt einem als Wanderer sofort auf, da er von hüftgrossen Fichten besetzt ist und im oberen Teil unbewachsener Blockschutt zu Tage tritt, während nicht weit entfernt normal gewachsener Tannenwald gedeiht.

Die klimatischen Einflüsse, durch die sich der besagte Hang im Brüeltobel von der Umgebung abzuheben scheint, werde ich mit den Klimafaktoren vergleichen, die in grossflächigen alpinen Permafrostgebieten vorherrschen. Eine geringe Energiebilanz führt dort zu niedrigen Bodentemperaturen. Im Brüeltobel scheint die Tendenz dazu zu bestehen. Ein solcher Vergleich scheint überdies deshalb interessant, weil im Brüeltobel ein sporadisches Permafrostvorkommen vermutet wird.

1.2 Begriffe

Für den Kümmerfichtenbestand werden die Begriffe „**Hexenwäldli**“ und „**Zwergwäldli**“ verwendet.

Es existiert eine unbekannte Anzahl weiterer solcher Hexenwäldli in Lagen unterhalb 1500 m ü.M. (im Weiteren „tiefe Lagen“ genannt) in Mitteleuropa. In der Schweiz wurden bereits ungefähr 30 derer untersucht und allen Vorkommen ist das Phänomen der **unterkühlten Blockschutthalde** gemeinsam:

Wakonigg bezeichnet mit diesem Begriff Schutthalden in tiefen Lagen, deren durchschnittliche Bodentemperatur markant tiefer liegt als die des umliegenden Gebietes. Diese Bezeichnung beinhaltet sowohl Böden, deren Temperatur ganzjährig unter dem Gefrierpunkt liegt, die also azonalen Permafrost induzieren, als auch solche, die während des Sommers auftauen. Das Phänomen ist in beiden Fällen das gleiche, jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt.¹

Ist im Folgenden vom Brüeltobel die Rede, so wird es topografisch immer von Brülisau aus betrachtet. Der hintere Teil des Tobels wäre demzufolge der von Brülisau gesehen am weitesten entfernte.

1.3 Literatur

Der Standort im Brüeltobel und weitere vergleichbare Vorkommen waren bereits Gegenstand diverser Arbeiten auf Universitätsstufe: Bauermeister (2002), Delaloye et al. (2001), Furrer (1966), Müller et al. (1999), Rist (2002), Schudel (2002), Wakonigg (1996), Wegmann (1995) und weitere haben sich bereits mit diesem und ähnlichen lokalklimatischen Systemen befasst. In den Arbeiten von Bauermeister, Rist, Schudel und Wegmann wurde neben anderen Standorten das Kümmerfichtenwäldchen im Brüeltobel bereits aus dendro- und landschaftsökologischer Sicht betrachtet, weshalb eine Untersuchung dieses Phänomens allein für mich nicht den Schwerpunkt der Arbeit darstellen wird.

Aus der Literatur der Permafrostforschung werde ich Grundlagenstudien der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich verwenden.²

1.4 Fragestellungen und Hypothesen

- Welche Indikatoren weisen auf spezielle lokale Klimaverhältnisse im Brüeltobel hin?
- Durch welche Klimaphänomene kann eine Zone in tiefen Lagen entstehen, die sich von der Umgebung durch Erscheinungen wie zwergwüchsige Fichten abhebt?

¹ Rist (2002), S.7

² Keller (1994); Vonder Mühl (1993)

- Welchen Einfluss auf die Schutthalde haben die einzelnen Klimafaktoren im Verhältnis zu einander?
- Ist in der Schutthalde des Brüeltobels azonaler Permafrost nachweisbar?
- Welche klimatischen Einflüsse kennzeichnen alpine Permafrostgebiete?

Kernfrage: Wodurch unterscheiden sich die Ursachen für eine unterkühlte Blockschutthalde in tiefen Lagen von den Ursachen für zonalen Permafrost oberhalb von 2000 m ü. M.?

Ich vermute, dass die Blockschutthalde aussergewöhnlich schattig gelegen ist, sodass nur in den Sommermonaten zeitweise direkte Sonnenstrahlung das Hexenwäldli erreicht. Weiter nehme ich an, dass durch diese Strahlungsarmut und weitere Klimafaktoren, wie zum Beispiel die Schneemenge, die mittlere Temperatur im Bereich der Schutthalde niedriger ist als an anderen Standorten in vergleichbaren Höhenlagen. Dies müsste sich auch auf die Bodentemperatur auswirken und könnte sogar ganzjährig gefrorenen Boden zur Folge haben, was den Zwergwuchs der Fichten erklären würde.

Die Verbreitung des alpinen Permafrostes dürfte im Gegensatz zu unterkühlten Blockschutthalden stark von der Höhe ü. M. abhängig sein und nur sekundär von regionalen oder lokalen Begebenheiten bestimmt sein.

1.5 Vorgehen

Das Hexenwäldli im Brüeltobel werde ich einerseits mit Hilfe der bestehenden Literatur und andererseits durch eigene Untersuchungen und Erkenntnisse untersuchen. Ich werde eine Reihe von Feldprotokollen aufnehmen und während einem Monat Temperaturmessungen an Ort durchführen. Auch auf das Kartenstudium und auf Informationen über den Einfluss des regionalen Klimas werde ich mich stützen.

Erkenntnisse über den alpinen Permafrost werde ich zum grössten Teil der Fachliteratur entnehmen.

2 Brüeltobel

2.1 Gebietsbeschreibung

Südöstlich von Brülisau durchschneidet zwischen der südlichen und der mittleren Hauptkette des östlichen Alpsteins das Brüeltobel die Landschaft.

Im oberen Drittel des Tobels, welches fast durchgehend von Felswänden überragt wird, führt der Wanderweg auf 1180 m ü.M. an einem in jedem Sinne merkwürdigen Wäldchen vorbei: Einer untersuchten Schutthalde mit kümmerlichen Fichtenbestand, häufig Hexenwäldli genannt. Die Blockschutthalde liegt NNW – exponiert und steht im Schatten der anschliessenden Felswand. Die **kleinwüchsigen Fichten** (Ausbreitung ungefähr 50 m horizontal, 20 m vertikal) werden links und rechts vom normal gewachsenen Wald flankiert. Der Übergang vom Zwergwuchs zum **hohen Wald** ist jedoch nur an wenigen Stellen abrupt, weshalb hier auch eine **Übergangszone** erwähnt sein will.

Im oberen Teil der Schutthalde folgt auf das „Zwergenwäldchen“ ein baumloser Abschnitt, in dem blanker, praktisch unbewachsener Schutt zu Tage tritt; darauf folgt wieder ein ca. 3 m breiter Baumbestand, der sich fast bis an die Felswand zieht. Oberhalb der Felswand schliesst sich ein bewaldeter Abschnitt an, der nochmals durch eine baumlose, felsige Steilzone unterbrochen wird, bevor die Flanke in eine dicht bewaldete Hügelkuppe übergeht.



Abbildung 1: Eine Zwergfichte (ungefähr hüfthoch) im Brüeltobel am 3.11.06, nach dem ersten Schneefall (falls nicht anders vermerkt, wurden **alle Aufnahmen vom Autoren selbst erstellt**)

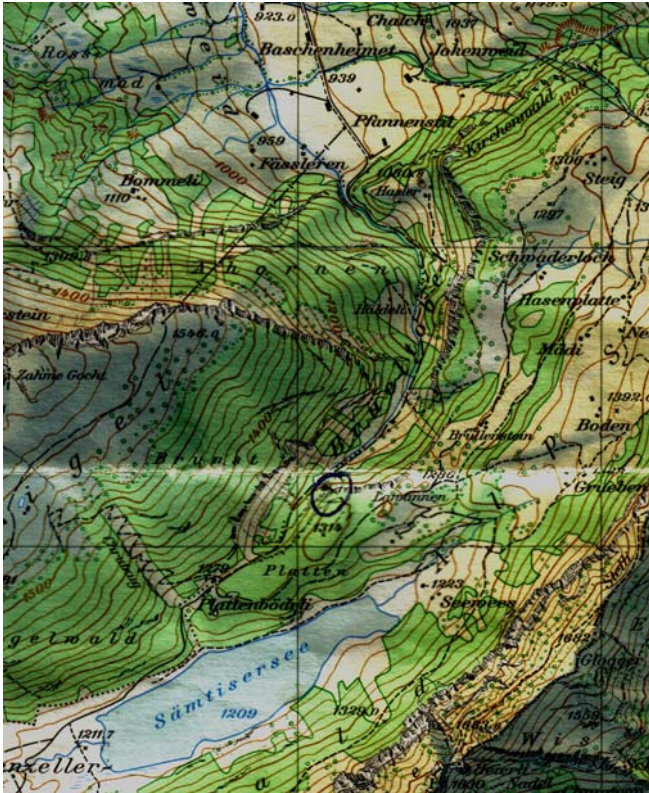


Abbildung 2: Kartenausschnitt³ mit Brüeltobel im Zentrum

2.2 Indikatoren

2.2.1 Kümmerfichten

Der Kleinwuchs der Fichten ist Hauptindikator für eine lokale Abweichung der klimatischen Verhältnisse, da tiefere Bodentemperaturen, vor allem Fröste während der Vegetationszeit, die Fotosyntheseleistung von Pflanzen verringern und Gewebe zerstören können und somit das Wachstum hemmen.⁴ Konkret heisst das: Die Netto-Photosyntheseleistung nimmt mit steigenden Bodentemperaturen (10 cm unter der Erdoberfläche) kontinuierlich zu bis zur 7°C-Marke. Das Gedeihen der Zwergfichten hängt somit direkt von der Bodentemperatur ab, da sich diese im Hexenwäldchen zumindest im Winterhalbjahr fast immer unter 7°C befindet. Ein weiterer Faktor sind die Fröste in der Vegetationsperiode: Pflanzen mit feinem, noch schwach

³ Landeskarte 1:25'000. Sântis. 1115 (1978)

⁴ Schudel (2002), S.8

ausgebildetem Wurzelwerk können durch Bodenfrost angehoben werden. Feine Wurzeln werden durch den Gefrierprozess zerrissen.⁵

2.2.2 Beobachtete Indikatoren

Schon bevor ich mich mit der Literatur über das Hexenwäldli des Brüeltobels befasste, waren mir Schneeresten im Spätfrühling und vor allem merklich kühlere Temperaturen aufgefallen, wenn ich jeweils an diesem sagemumwobenen Wäldchen vorbeiwanderte. Nachdem ich im Frühling 2006 erste Informationen⁶ über das Phänomen der unterkühlten Blockschutthalde konsultiert hatte, begab ich mich Anfang Mai selbst an Ort und Stelle um mir ein genaueres Bild zu machen und die typischen Merkmale des Hexenwäldlis und seine momentanen Verhältnisse festzuhalten.

- Die Kümmerfichten, die schon seit teilweise über 100 Jahren nie grösser als einen Meter⁷ wurden und sich dadurch deutlich vom umgebenden Wald abheben, geben den Hauptanstoß zur Vermutung eines speziellen Lokalklimas.
- Im Sommer ist ein kühler Wind am Fuss der Blockschutthalde spürbar.
- Während im Frühling andere Hänge der gleichen Höhenlage und Exposition bereits aper sind, liegt im Brüeltobel noch Schnee.
- Anfang Mai 2006 befand sich stellenweise noch Eis unter einer dünnen Moos- bzw. Humusschicht in den schattigen Bereichen am Fuss der Schutthalde.

Als zusätzlicher Indikator soll der erste Schneefall im Herbst 2006 beobachtet werden: Auf einem Boden, der Permafrost induziert, bleibt der erste Schneefall im Gegensatz zu permafrostfreiem Boden, auf dem er meist schnell wieder schmilzt, länger liegen.⁸

⁵ Wegmann (1995), S.34f

⁶ Rist (2002), S.6 ff, S.12 f

⁷ Schudel (2002), S.27f

⁸ Keller (1994)



Abbildung 3: Das Hexenwäldli Anfang Mai 06. Die Fichten stehen noch in tiefem Schnee.

2.3 Klimafaktoren

Die Hauptursache für das Entstehen einer unterkühlten Blockschutthalde ist eine besonders niedrige Energiebilanz im Vergleich zur Umgebung. Aber wie kann ein so kleinräumiger Unterschied in der Energiebilanz entstehen? A. Rist nennt das niedrige Strahlungsangebot, eine jahreszeitlich wechselnde Konvektionsströmung durch den groben Blockschutt und dünnen, schlecht isolierenden Boden als Hauptursachen⁹.

2.3.1 Grundlagen zum Energiehaushalt

„Die Energiebilanz [...] an der Oberfläche wird von der Strahlungsbilanz, den Wärmeaustauschvorgängen der Oberfläche mit der Atmosphäre und den Bodenwärmeflüssen bestimmt.“¹⁰ Diese allgemeine Formulierung fasst präzise die

⁹ Rist (2002)

¹⁰ Keller (1994), S.24, Kap.2.2.1.

Einflüsse auf die Energiebilanz am Boden zusammen, welche für die Ermittlung von Bodentemperaturen ausschlaggebend ist.

Die Strahlung lässt sich aufteilen in Komponenten, welche der Oberfläche Energie hinzufügen und in solche, die der Oberfläche Energie entziehen: Als kurzwellige Einstrahlung (direkte Sonnenstrahlung) fliesst Strahlungsenergie zur Erdoberfläche. Die nicht reflektierten Strahlen werden absorbiert und als langwellige Strahlung in die Atmosphäre geschickt, welche sie erwärmen. Ein Grossteil davon kehrt als atmosphärische Gegenstrahlung auf den Boden zurück. Zwei weitere Energieflüsse, welche besonders für die Betrachtung eines speziellen Lokalklimas wichtig sein dürften, sind der fühlbare (Konvektion) und der latente Wärmetransport.

Für die kurzwellige Strahlungsbilanz ist die Albedo ausschlaggebend:

Der Betrag der Albedo gibt an, wie gross der reflektierte Anteil der auf die Bodenoberfläche auftreffenden Strahlung ist. Sie ist das Verhältnis zwischen reflektierter und absorbierter Strahlung und abhängig von der Art der Oberfläche. Helle, gut reflektierende Flächen haben eine grosse Albedo (Neuschnee: 0.8 oder 80%), dunkle, stark absorbierende Flächen folglich eine kleine (Ackerboden: 7 – 10%).¹¹

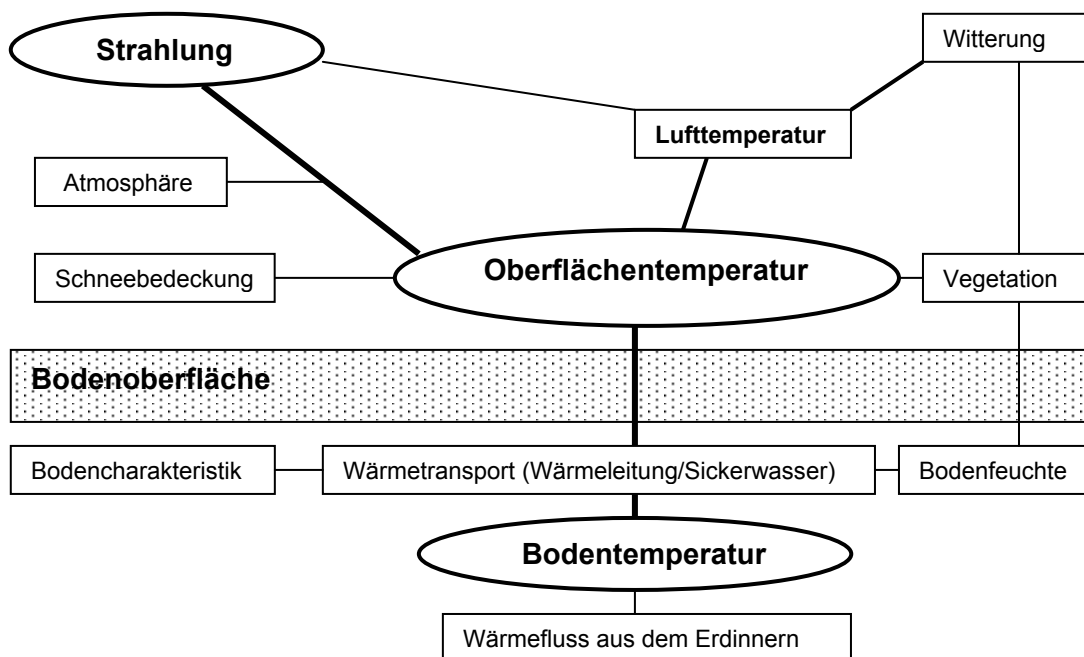
Der Betrag der abgestrahlten langwelligen Strahlung hängt von der Oberflächentemperatur und der Emissivität ab. Auch die Emissivität hängt von der Art der Oberfläche ab, weshalb die Energiebilanz dadurch beeinflusst wird, ob Schnee liegt oder blanker Schutt zu Tage tritt.

Die Oberflächentemperatur hängt mit all diesen Faktoren zusammen und beeinflusst im Weiteren direkt die Bodentemperatur.

Diese hängt mit zunehmender Tiefe immer stärker von den Energieflüssen im Boden ab: Die Wärmeleitfähigkeit des Materials, dessen Beschaffenheit und Struktur (in Hohlräumen wird Wärme durch Luftzirkulation transportiert), die Bodenfeuchtigkeit und der Wärmetransport durch Sickerwasser sowie der Energiefluss aus dem Erdinnern nehmen Einfluss auf die Bodentemperatur.¹²

¹¹ Lexikon der Geowissenschaften (2000), S. 49

¹² Keller (1994), S.24ff; Wetter und Klima, S.68f



Figur 1: Das lokale Klimaregime am und im Boden¹³

2.3.2 Strahlung

2.3.2.1 Im Zusammenhang mit dem regionalen Klima

Die Rahmenbedingungen, innerhalb derer die Entstehung eines Hexenwäldlis überhaupt möglich ist, sind eine jährliche Strahlungsbilanz, die unter 75 W/m^2 liegt, und eine Jahresdurchschnittstemperatur (MAAT), die 8°C nicht übersteigt.¹⁴

Das Klima des Brüeltobels weist wohl mit Abstand tiefere Werte auf als diese Grenzwerte; die Erkenntnis erlangt man bereits, wenn man die MAAT des 500 m tiefer gelegenen St.Gallens (6.8°C) als Vergleich herbeizieht.

Um die ungefähre Strahlungsbilanz in der Umgebung des Hexenwäldchens abschätzen zu können, sollte man beachten, dass das regionale Klima des Alpsteins für voralpine Verhältnisse von grossen jährlichen Niederschlagsmengen (2000 – 2900 mm) geprägt ist, wobei das Hexenwäldli gemäss der hydrologischen Karte im Bereich von 2000 mm Niederschlag pro Jahr liegt. Damit verbunden ist häufige Bewölkung, welche die kurzweilige Einstrahlung reflektiert und daher die Strahlungsbilanz verkleinert.¹⁵ Die mittlere relative Sonnenscheindauer beträgt auf dem Säntis 38% und

¹³ Nach: Keller (1994), S.25, Fig. 4

¹⁴ Rist (2002), S. 23

¹⁵ Schweizer Weltatlas (2002), S.15

in St.Gallen 34%. In der Gegend des Brüeltobels wird sie wohl zwischen diesen beiden Werten liegen. Verglichen mit den Werten der ganzen Schweiz sind das ziemlich bescheidene Zahlen.¹⁶

Eine Konsequenz der oben genannten Tendenz von zu viel Niederschlag sind, zumindest in erhöhten Lagen, grosse winterliche Schneemengen, welche durch die Reflexion von Strahlung und durch die Isolation des Untergrundes die thermischen Vorgänge beeinflussen. Auf diese Vorgänge wird im Kapitel „Niederschlag“ näher eingegangen.¹⁷

2.3.2.2 Einfluss der Topografie

Daten zur Lage des Untersuchungsgebietes

- Höhe: 1180 – 1220 m ü.M.
- Exposition: NNW
- Hangneigung: 28° (eigene Messung bzw. Daten von Rist und Schudel)
- Geländeform: regelmässiger Hang, der von einer ca. 60m hohen Felswand überragt wird und in ein enges Tal mündet
- Oberfläche: Im unteren Teil (60%) vorwiegend moosiges Gras und Zwergfichten; Im oberen Teil vorwiegend roher Blockschutt (30%), unterbrochen durch eine Zone mit Laubwaldvegetation und Rostseggen (10%)

¹⁶ Internet: MeteoSchweiz: Normwerte der relativen Sonnenscheindauer

¹⁷ Wetter und Klima, S.68



Abbildung 4: Der Zwergfichtenbestand (untere Bildhälfte), gefolgt von blankem Blockschutt, Rostseggenbestand und Felswand (oberer Rand). Im Vordergrund flankieren zwei grosse Tannen das Bild. Aufnahmedatum: 19.8.06

Situierung im Brüeltobel

Schon auf Grund der landschaftlichen Begebenheiten erhält das Brüeltobel besonders wenig Strahlung. Bis zu 100 m hohe senkrechte Felswände begrenzen es im vorderen Teil westlich und östlich und im hinteren Teil Nordwestlich und Südöstlich. Dadurch gelangt vor allem im Winter, wenn die Sonne tief steht, kaum mehr direkte Sonnenstrahlung in die Bereiche am Grund der Schlucht und unter den Felswänden. Während den Beobachtungen vom 2. November fielen zwischen 14 Uhr und 15 Uhr nur während einer Viertelstunde wenige flache Strahlen aus Südwesten auf die Fichten. Da die Bäume oberhalb der nordexponierten Felswand während dieser Stunde sonnenbeschienen waren, lässt sich erahnen, dass das Zwergwäldchen zur Mittagszeit, als die Sonne höher stand, und eventuell für kurze Zeit am Vormittag noch beschienen war. Da sich bis zum 21. Dezember der Einfallswinkel der Sonne (im Verhältnis zur Nordhalbkugel) täglich verkleinert, ist es durchaus realistisch, dass das ganze Untersuchungsgebiet 20 Tage vor- bzw. nach dem 21. Dezember keine direkte Strahlung erhält. Am 8. Februar präsentiert sich dann bezüglich der Strahlungsdauer wieder dieselbe Situation wie am 2. November. Für die Monate März und April

vermerkt Wegmann¹⁸, dass das Hexenwäldchen noch immer nur für kurze Zeit direkt bestrahlt wird. Anlässlich des Felduntersuches vom 7. Mai 06 schien mir die Intensität und die Dauer (> 3h) der Bestrahlung schon beträchtlich. Für den Juli nimmt Wegmann an, dass die Sonne das Wäldchen während acht Stunden, von 8:00 bis 16:00, bestrahlt.

Wieso tritt nun der charakteristische Zwergwuchs der Bäume nur an der einen Stelle im Tobel auf und nicht auch entlang weiterer Hänge am Fuss der nordwestexponierten Wand, die über dem Brüelbach thront? Aus topografischer Sicht betrachtet, fällt einem beim näheren Studium der Landeskarte (1115 Säntis) Folgendes auf:

Das Hexenwäldli liegt am Beginn des engsten und folglich schattigsten Schluchtabschnittes. Gleichzeitig erhebt sich darüber der am nördlichsten exponierte Teil der Felswand dieses Schluchtabschnittes. Hier beträgt die Gesamthöhe der Felswand zwar „nur“ etwa 60m, doch endet die Wand im Gegensatz zum restlichen nordexponierten Wandteil des Tobels nicht in relativ ebenem Gelände, sondern geht in einen bewaldeten Hügel über, auf dem P.1314 als höchster Punkt angegeben wird. Die süd- bis südostexponierten Hänge, also die gegenüberliegende Talseite, schliesse ich für diese Auseinandersetzung aus, da sie unabhängig von den obigen Parametern für normalen Baumwuchs genügend besonnt sind.

Einfluss der Albedo

Die durchschnittliche Albedo (α) im Untersuchungsgebiet liegt vermutlich etwas höher als jene von hohem Wald, was auf eine geringere Absorption der Strahlung im Untersuchungsgebiet hinweist. Ungefähr 30% des Untersuchungsgebietes sind mit Kalkschotter bedeckt, dessen Reflektionseigenschaft (steinige Oberfläche: $\alpha = 0.24$) stärker ist, als diejenige von Nadelwald ($\alpha = 0.05 - 0.12$) oder Laubwald ($\alpha = 0.15 - 0.20$). 60% nehmen die Zwergfichten selbst ein, zwischen denen moosiger Grasboden ($\alpha = 0.16 - 0.20$) zu Tage tritt. Hier ist die Albedo wohl am kleinsten (durchschnittlich ~ 0.14)¹⁹, die Absorption am grössten. Auf der 10% einnehmenden Fläche des Rostseggenbestandes dürfte sie am zweitgrössten sein.

Um einiges einflussreicher ist die stark reflektierende Schneedecke, die sich im Dezember bildet und den Boden zuweilen bis Mitte Mai bedeckt. Ihre Bedeutung wird im Kapitel „Niederschlag“ eingehender behandelt.

¹⁸ Wegmann (1995), S.37f

¹⁹ Albedowerte: Lexikon der Geowissenschaften (2000), S. 49

2.3.3 Lufttemperatur

Obwohl die Lufttemperatur nicht der Haupteinflussfaktor für die Unterkühlung der Blockschutthalde sein dürfte, ist es angebracht, den Rahmen zu kennen, innerhalb dem sie sich durchschnittlich befindet.

In der Arbeit von A. Rist und in jener von K. Schudel²⁰ wurden keine spezifischen Temperaturberechnungen oder Messungen vorgenommen. Rist hat sich aber mit den Grenzbedingungen für das Bestehen eines unterkühlten Hanges befasst (Kapitel 2.3.2.1).

G. Wegmann hat mit verschiedenen Methoden einen Näherungswert für die MAAT im Brüeltobel errechnet: Sie zog die langjährigen Messreihen der Stationen „Säntis“ und „Nanisau“ (Appenzell) bei und errechnete die jeweilige MAAT. Aus der Differenz der zwei Jahresmittel und der Höhendifferenz der Standorte errechnete sie den mittleren Gradienten der Lufttemperatur in dieser Gegend, welcher 4°C als eine mögliche MAAT auf der Höhenlage des Brüeltobels lieferte.

Zudem rechnete sie die MAAT von Nanisau mit dem allgemeingültigen Gradienten für Tallagen hoch auf die Höhe des Brüeltobels, was 3°C als Jahresmittel ergab. Analog ging sie für die Station Säntis mit dem Gradienten für Gipfellagen vor, was für das Brüeltobel 6.9°C als Mittel ergab. Schliesslich errechnete sie mit dem Programm Meteororm (konzipiert für Lokaltemperaturberechnungen) eine mittlere Jahrestemperatur von 5.2°C für das Hexenwäldchen.

Nach der Auswertung dieser vier Berechnungsansätze folgerte Wegmann, dass die MAAT im Hexenwäldchen *zwischen 3.0 und 5.5 °C liegt*.²¹

Da es sich beim untersuchten Standort offensichtlich um ein spezielles Lokalklima handelt, können Berechnungen, welche sich auf Normwerte stützen, heikel sein. Das Brüeltobel ist ja gerade ein Ort, der von der Norm abzuweichen scheint. Die Resultate von Wegmann scheinen trotzdem durchaus plausibel, denn im Falle des Hexenwäldli ist wahrscheinlich nicht die Temperatur der herausragende Faktor, welcher so stark von der Norm abweicht, dass dadurch ein unterkühlter Boden entsteht. Auf Grund der Durchmischung der Luftmassen müsste in diesem Fall nämlich das ganze Brüeltobel von diesem Zwergwuchs der Fichten gezeichnet sein.

²⁰ Rist (2002); Schudel (2002)

²¹ Wegmann (1995), S.20ff

2.3.4 Niederschlag

Am häufigsten kommen Hexenwäldli in Gebieten mit 1700 bis 2000 mm Niederschlag im Jahr vor, im Gegensatz zum hohen Wald, der bei 1200 mm Jahresniederschlag am besten wächst. Zu den Grundvoraussetzungen gehört auch eine geschlossene Schneedecke von Dezember bis März.

Diese klimatischen Begebenheiten werden – abgesehen von den hochgelegenen Alpengebieten mit zonalem Permafrost – in den Voralpen und im Jura am besten erfüllt.²² Wichtig ist hier vor allem der Niederschlag in Form von Schnee. Der Einfluss von Regen beschränkt sich primär auf den Wasserhaushalt der Vegetation, deren Überlebenschancen in dieser Region jedoch kaum über die Verfügbarkeit von Wasser definiert sind.

Im Winter hält eine Schneedecke mit grosser Mächtigkeit den Boden relativ zur Aussen-temperatur eher warm, da sie ihn vor der Kälte isoliert. Im Frühling jedoch hält der Schnee als Isolationsschicht den Boden kühl und reflektiert das jetzt stärkere Sonnenlicht besser als es die Oberfläche der aperen Schutthalde täte, deren Albedo viel kleiner ist.²³ Treffen die selten vorhandenen und flach einfallenden Sonnenstrahlen auf eine Neuschneesicht, deren Albedo bis zu 0.95 betragen kann, so kann man die Energie, die durch Strahlung zugeführt wird, als nahezu gleich Null einschätzen. Im Frühling kommt hinzu, dass durch die Sublimation und das Schmelzen und anschließende Verdunsten des Schnees latente Wärme entzogen wird.

Um eine ungewöhnlich niedrige Energiebilanz zu erzeugen, müsste in der unterkühlten Schutthalde der kühlende Effekt der Reflexion im Frühling mehr Einfluss haben als die Isolationsschicht im Winter.

Untersuchungen in der Schutthalde des Creux du Van haben das Resultat ergeben, dass auf Grund des porösen Bodens auch im Winter die kalte Aussenluft einströmte und trotz einer mächtigen Schneedecke Temperaturen von mehreren Grad unter Null im Innern des Blockschutts gemessen wurden.²⁴

²² Rist (2002), S. 25ff

²³ Wetter und Klima, S.68f; Internet: Wikipedia: Albedo (13.9.06)

²⁴ Delaloye et al. (2003), S.178f

2.3.5 Windsystem in der Blockschutthalde

Die Strahlungsbilanz im Untersuchungsgebiet ist zwar aussergewöhnlich tief, doch gewisse Parameter wie zum Beispiel die Lufttemperatur, welche im Untersuchungsgebiet nicht frappant von Vergleichswerten in ähnlichen Lagen abweicht, erklären den offensichtlich unterkühlten Boden im Hexenwäldli noch nicht; es müssen weitere lokalklimatische Phänomene existieren.

2.3.5.1 Verschiedene Theorien

Eine alte Theorie legt den kühlen Temperaturen in der Schutthalde die Verdunstungskälte, die im Sommer entsteht, zu Grunde: Warme Luft strömt ein und die Feuchtigkeit an den Steinen verdunstet aufgrund der grossen Oberfläche des Schutts; da das Verdampfen ein endothermer Vorgang ist, wird die Luft dabei abgekühlt.

Wakonigg stellte mit dem Prinzip der jahreszeitlich wechselnden Luftströme durch die Schutthalde eine neue, plausiblere Theorie auf: Im Winter tritt schwere Kaltluft am Fuss der Schutthalde ein und wird durch die verhältnismässig wärmeren Steine erwärmt, womit ihre relative Luftfeuchte sinkt, was zur Verdunstung führt. Dieser Vorgang entzieht der Umgebung Wärme und kühlt das Gestein aus. Die erwärmte Luft strömt auf Grund ihrer geringeren Dichte am oberen Ende der Schutthalde aus, zieht also am Fuss des Hanges Aussenluft nach. In einigen Fällen kann man deshalb im Winter im oberen Teil von unterkühlten Blockschutthalden bis zu faustgrosse Löcher im Schnee beobachten, die durch die ausströmende Warmluft entstehen. Im Sommer verhält sich das Windsystem genau umgekehrt: Oben tritt wärmere Aussenluft in die Schutthalde ein. Sie enthält mehr absolute Luftfeuchte als die Luft mit der Temperatur der Steine im Innern der Schutthalde aufnehmen könnte und kondensiert deshalb an den kalten Steinen. Durch diese Kondensation wird latente Wärme an die Steine abgegeben, also das Innere der Blockschutthalde aufgewärmt. Die vorher noch verhältnismässig warme, oben eingetretene Luft ist am Fuss der Schutthalde als kühler Windhauch, der aus den Lücken zwischen den Blöcken hervorströmt, spürbar.²⁵

²⁵ Rist (2002), S.7ff

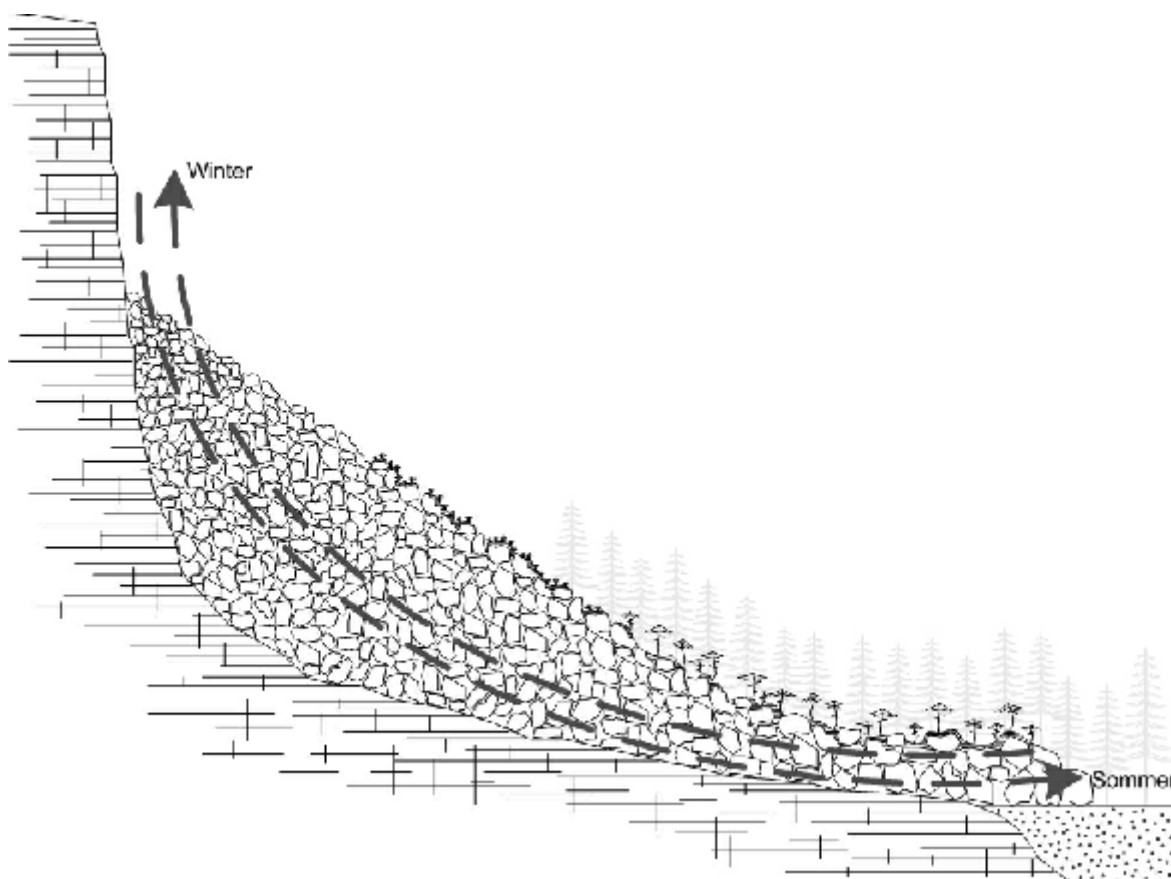


Abbildung 5: Schematische Darstellung²⁶ der jahreszeitlich wechselnden Luftströmungen in einer Blockschutthalde

2.3.5.2 Windlöcher

Als bemerkenswertes Phänomen wurden in diesem Zusammenhang sogenannte „Windlöcher“ beobachtet: Handtellergrösse Löcher zwischen den Steinen am Wegrand unterhalb der Schutthalde, aus denen im Sommer ein kühler Luftzug entweicht.

G. Wegmann hat in diesen Löchern im Sommer 1994 Temperaturmessungen vorgenommen, welche die obige Theorie bestätigen. Das bemerkenswerteste Ergebnis stammt von Mitte Juli, wo bei einer Lufttemperatur von 21.5°C im Windloch gerade mal eine Temperatur von 3°C gemessen wurden!²⁷

2.3.5.3 Theorie von Wegmann

Wegmann betrachtete die wechselnden Luftströmungen verteilt auf vier Jahreszeiten und differenzierte zwischen trockener und feuchter Witterung. Im Frühling und im

²⁶ Grafik aus: Internet: SLF: Hexenwäldli

²⁷ Wegmann (1995), S. 36ff

Herbst sind die Luftströmungen am schwächsten und wechseln auch ihre Richtung. Im Frühling wird der Boden von Schmelz- und Regenwasser gesättigt, der Überschuss fliesst auf der gefrorenen Bodenschicht ab. Auch im Herbst ist der Boden häufig durchnässt. Aber im Gegensatz zum Frühling ist der Boden nach dem Sommer erwärmt: Die isothermale Schicht liegt tief, und die Bodentemperatur gleicht sich, unter anderem auch durch konduktive Wärmetransporte von kaltem Niederschlag, langsam der Lufttemperatur an.²⁸

2.3.5.4 Erkenntnisse vom Creux du Van

Konkretere Erkenntnisse für den Bezug zwischen der Bodentemperatur und dem Windsystem liefern Untersuchungen²⁹ in der Blockschutthalde des Creux du Van, einer hufeisenförmigen Felsarena im Jura, die sich in der gleichen Höhenlage wie das Brüeltobel befindet. Hier sind die Vorgänge in der Schutthalde besonders gut erfassbar, da das ganze System viel grösser angelegt ist (Höhe Felswand: 100 – 150 m, vertikale Erstreckung der Schutthalde: 130 m) und demnach die thermischen Vorgänge in der Schutthalde stärker ausgeprägt sind als in einem System der Grösse des Brüeltobels.

Eine massgebende Erkenntnis ist dabei, dass an einer Messstation im oberen Teil der Blockschutthalde während zwei Messjahren die Bodentemperatur nie unter 0.5°C fiel.

Während des Sommers wurden die tiefsten Temperaturen im Bereich der Zwergfichten gemessen, die im unteren Abschnitt der Schutthalde wachsen, wo – was zuerst paradox erscheint – am meisten Sonnenstrahlung hingelangt.

Ein Datalogger im unteren Teil des Hanges, wo die Fichten besonders klein gewachsen sind, verzeichnete sogar bis in den Juli gefrorenen Boden, wobei dann die Bodentemperaturen gegen den August hin bis auf ca. 5°C stiegen!

Im September und Oktober stiegen im Bereich der Zwergfichten die Temperaturen gegenüber den Sommermonaten noch leicht an, bevor im November die erneute Auskühlung begann.

Daraus kann man folgern, dass vor allem der untere Sektor des Hanges während des Winters trotz der dicken Schneedecke so stark auskühlt, dass er bis Mitte Sommer nicht weit über den Gefrierpunkt erwärmt werden kann. Die geringe Sonnenbestrahlung im Winter ist also sicher auch ein Faktor, aber nicht der entscheidende.

²⁸ Wegmann (1995), S.36ff

²⁹ Delaloye, Reynard & Lambiel, Marescot & Monnet (2003)

Eine Anomalie wurde unter der dicken Schneedecke des Winters 1999 festgestellt: Trotz der starken Isolationswirkung von fast zwei Metern Schnee wurde im Februar eine Bodentemperatur von -5.6°C gemessen!

So wird im Winter ein kalter Vorrat an latenter Schmelzwärme produziert, der im Sommer nur langsam abgebaut werden kann.

Für das Wind- bzw. Tunnelsystem in der Schutthalde wurden differenzierte Daten gesammelt. Deren Auswertung ergab, dass Luft- und Tunneltemperatur direkt proportional waren, solange die Aussentemperatur 7°C nicht überstieg. Oberhalb 7°C Aussentemperatur nahm die Temperatur im Tunnelsystem der Schutthalde bei steigender Aussentemperatur kontinuierlich ab. Die Temperaturanomalie ist nach Delaloye et al. also hauptsächlich eine Folge der temperaturabhängigen Luftdichteunterschiede, welche im porösen Schutt Luftströmungen erzeugen.

Durch Messungen des elektronischen Widerstandes im Boden konnte ein 15 – 20 m mächtiger Permafrostkörper nachgewiesen werden, dessen aktive Schicht etwa 2 m dick ist.

2.3.5.5 Folgerungen für das Brüeltobel

Da im Brüeltobel ähnliche Voraussetzungen gegeben sind, jedoch in kleineren Ausmassen, kann man annehmen, dass das Prinzip der Auskühlung etwa das gleiche ist. Die Existenz eines Permafrostkörpers ist hingegen ungewiss. Weder Schudel noch Rist konnten ganzjährig gefrorenen Boden nachweisen. Wegen der bescheideneren Grösse der Schutthalde entsteht im Winter auch ein kleineres Volumen an gefrorenem Boden, das bis gegen Ende Sommer bestehen könnte. Auch Dr. M. Hölzle³⁰ vom geografischen Institut der Universität Zürich konnte ein Permafrostvorkommen weder bestätigen noch ausschliessen.

Ich tendiere im Zusammenhang mit meinen eigenen Beobachtungen auf die Annahme, dass der Boden zumindest im unteren Teil des Hexenwäldli bis ungefähr Mitte Mai gefroren bleibt und während des Sommers verhältnismässig niedrige Temperaturen aufweist. Das Einfrieren des Bodens dürfte je nach Witterung Anfang Dezember beginnen.

³⁰ M. Hölzle; mdl.

2.4 Bodentemperaturmessungen

2.4.1 Wegmann

Wegmann hat an vier Messpunkten während zwei Jahren Bodentemperaturmessungen durchgeführt (November 1992 – Oktober 1994). Jeder Messpunkt bestand aus einer 2 m langen Thermistorenkette, die in den Boden versenkt wurde.

Die wärmsten Temperaturen verzeichnete ein Messpunkt im Rostseggenbestand, im oberen Teil der Schutthalde. Nur einmal unterschritt dort die Bodentemperatur die 0°C-Marke.

Ein Messpunkt unterhalb des Hexenwäldlis, im Föhrenwald, verzeichnete zwar einige 0°C-Durchgänge im Winter, die Temperaturen lagen aber auch in 2 m Tiefe vorwiegend im positiven Bereich.

An den zwei Messpunkten in Mitten der Zwergfichten wurden jeweils von Ende November bis Ende Juni bzw. von Ende Dezember bis Juni resp. Juli Temperaturen um den Nullpunkt gemessen ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). Auf den Anstieg der Lufttemperatur Anfang April reagierten die tief liegenden Thermistoren mit vier bis fünf Monaten Verzögerung.

Aus den Resultaten der Bodentemperaturmessungen folgerte Wegmann, dass der Boden zum Teil während der Vegetationsperiode unterkühlt ist und dadurch die Fichten in ihrem Wachstum gehemmt werden. Die Existenz von Permafrost unter der Blockschutthalde konnte sie aber nicht nachweisen, da keiner der installierten Thermistoren während mindestens einem Jahr Temperaturen unter 0°C registriert hatte. Auch eine Extrapolation der Werte von fünf Thermistoren in die Tiefe ergab noch keinen Beleg für ein Permafrostvorkommen unter der Blockschutthalde.³¹

2.4.2 Philipps et al.

Die Messungen von Philipps et al. (SLF)³² wurden nur 10 cm unter der Erdoberfläche angelegt. Ein Messpunkt befand sich am Fuss des Zwergwäldchens und ein weiterer im hohen Wald. Die Messperiode dauerte von Anfang November 2001 bis Mitte Mai 2002.

Im Januar lag die Bodentemperatur im Hexenwäldli während zirka drei Wochen 5°C unter dem Nullpunkt und im Dezember sogar noch tiefer. In dieser Periode war die

³¹ Wegmann (1995), S.29ff

³² Philipps et al. (2002)

Bodentemperatur im hohen Wald 0.5 bis 4°C höher als die im Hexenwäldli gemessene. Ab Ende April beginnt dann die Temperatur im hohen Wald im positiven Bereich kontinuierlich zu steigen, während die des Hexenwäldli bis zum Messende am 16. Mai konstant bei 0°C verweilt.

2.5 Temperaturlaufzeichnungen im Brüeltobel, Oktober 2006

2.5.1 Durchführung

Zwischen dem 1. Oktober 06 und dem 30. Oktober 06 wurden mittels zweier Datalogger - Geräte die Lufttemperatur und die Bodenoberflächentemperatur am Fusse des Zwergwäldchens gemessen. Einigermassen exakte Temperaturlaufzeichnungen durchzuführen stellte sich aufwändiger heraus als erwartet: Nach verschiedenen Anfragen bekam ich freundlicherweise von der EMPA St.Gallen (Herrn Weder) kostenlos Messgeräte zur Verfügung gestellt.

Diese bestehen jeweils aus einem Datalogger (Aufzeichnungsgerät, „Hygrolog – 1.0“, Firma Rotronics) mit einem ca. 2 m langen Kabel, an dessen Ende in Form eines 5 cm langen zylindrischen Metallstiftes mit 0.5 cm Durchmesser der eigentliche Temperatur- bzw. Luftfeuchtigkeitsfühler zu finden ist.

Der Logger ist feuchtigkeitsempfindlich, weshalb ich ihn in zwei Plastiksäcke einpackte. Eine weitaus grössere Hürde stellten die Temperaturfühler dar: Sie dürfen nicht in direkten Kontakt mit Wasser geraten, weil dadurch die Messgenauigkeit nicht mehr gegeben wäre.

Die Norm für die Lufttemperaturmessung ist eine so genannte Wetterhütte aus Holz (ca. 0.5 x 0.5 x 0.5 m), die auf vier Stangen zwei Meter über dem Boden angebracht ist. Darin ist der Temperaturmesser vor direkter Sonneneinstrahlung und vor Niederschlägen geschützt, während die vielen Belüftungsschlitze der Wände eine ausreichende Durchlüftung gewährleisten, sodass nicht ein isolierter Körper entsteht³³.

Ich musste also ein Gehäuse verwenden, welches der Wetterhütte möglichst nahe kommt, aber selbst herstellbar, unproblematisch zu transportieren und einfach zu installieren ist. Für die Lufttemperaturmessung bot sich ein ausgedientes Vogelhäuschen an und für die Messung der Bodenoberflächentemperatur konstruierte ich einen geeigneten Wetterschutz:

³³ Schulstoff Geographie 2mar; Wetter und Klima, S.30

Zwei Holzplatten verschraubte ich zu einem Dach, welches ich durch seitliche Holzdreiecke stabilisierte. Daran schraubte ich zwei Metallfüsse, die ich dann als Verankerung in den Humus hineinschlagen wollte.



Abbildung 6: Wetterschutzdach zur Messung der Temperatur 5 cm über dem Boden

Neben dem Lösen messtechnischer Probleme war es auch erforderlich, vom Grundbesitzer eine Bewilligung zu erfragen, die mir schlussendlich durch den Verantwortlichen des innerrhoder Bezirkes „Schwende“ auch zugesichert wurde.

Die eigentliche Installation gestaltete sich wegen des Regens eher mühsam, verlief jedoch relativ reibungslos: Ich suchte einen Platz im untersten Teil der Blockschutthalde, da dort aufgrund den Eigenschaften des Windsystems und der indirekten Proportionalität von Lufttemperatur und –dichte und dem damit verbundenen Absinken der Kaltluft die tiefsten Temperaturen zu erwarten sind. Zudem sollte die Messstation vom Wanderweg her nicht allzu gut sichtbar sein.



Abbildung 7: Wetterschutzhäuschen mit dem Lufttemperaturfühler im Innern (roter Pfeil)



Abbildung 8: Die „Messstation“ im Gelände. Das hintere Messhäuschen wurde an einer Metallstange befestigt und durch Schnüre gegen den Wind gewappnet.

Die Befestigung des Oberflächentemperaturmesshäuschens verlief ohne Probleme. Jedoch erforderte das Einschlagen der Eisenstange, an der ich die Holzstange mit dem „Vogelhäuschen“ fixierte, mehrere Anläufe. Schliesslich stiess ich unter der 10 – 20 cm dicken Humusschicht auf eine Lücke im Blockmaterial. Zusätzlich verspannte ich das Konstrukt noch mit drei Schnüren, um es sturmsicherer zu machen. Dann hängte ich eine Mitteilung, welche die Legitimität des Projekts klarstellte, an die kleine Messstation und hielt das Ganze auch noch bildlich fest.

Daten zu den Messbedingungen

Höhe Lufttemperaturmessung: 185 cm

Höhe Oberflächentemperaturmessung: 5 cm
[über Boden]

Messbeginn: 1.10.06, 14:00 Uhr

Messende: 27.10.06, 3:00 Uhr

Messintervall: 10 min

2.5.2 Messergebnisse

Die Messstation hielt dem zuweilen rauen Wetter stand und wurde auch von den vielen Wanderern nicht beschädigt, sodass die Aufzeichnungen der beiden Datalogger Mitte November ausgewertet werden konnten.

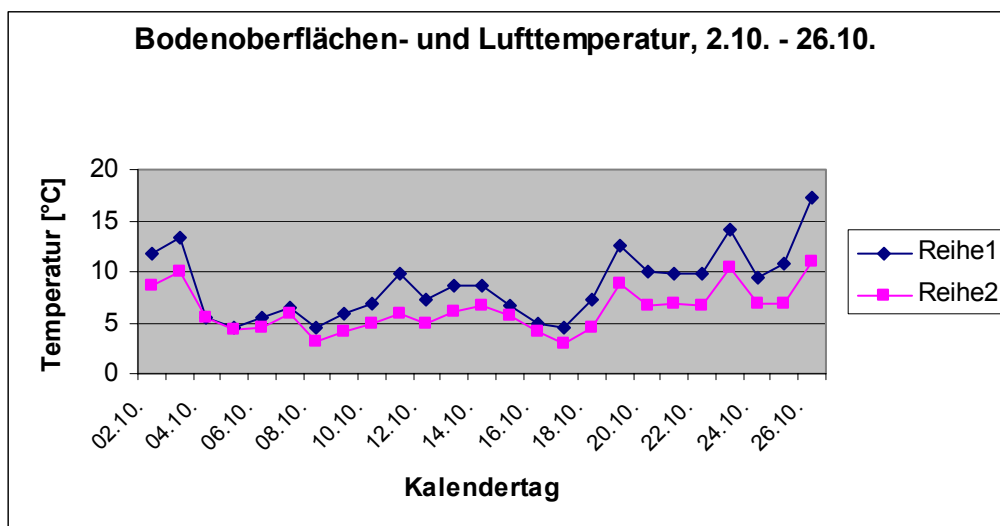


Abbildung 9: Temperaturmessungen im Brüeltobel: Reihe 1 = Lufttemperatur, Reihe 2 = Temperatur 5cm über dem Boden

Aus den Datenreihen wurde das jeweilige Temperaturmittel der gesamten Messperiode errechnet: Die mittlere Lufttemperatur betrug 8.7°C und die mittlere Temperatur 5cm über dem Boden betrug 6.3°C , was eine beträchtliche Diskrepanz ist. Dies sind verhältnismässig hohe Werte, wenn man bedenkt, dass die von G. Wegmann errechnete MAAT zwischen 3.0 und 5.5 Grad Celsius liegt.

Es muss aber beachtet werden, dass sich im Oktober 06 die Monatsmittel an allen Stationen der Alpennordseite deutlich über dem langjährigen Mittel befanden. Das durchschnittliche Tagesmittel der Lufttemperatur auf dem Säntis vom 2.10.06 bis zum 26.10.06 betrug 4.2°C .³⁴ Verglichen mit dem langjährigen Julimittel (1961 – 1990), welches auf dem Säntis 4.9°C beträgt, ist dies ein enorm hoher Wert.³⁵ Während einer Föhnperiode wurde am 26. Oktober auf dem Säntis ein Tagesmaximum von 12.1°C gemessen²³ und im Rheintal wurden Rekordwerte von bis zu 27°C erreicht!

³⁴ Oktoberwerte Säntis: Internet: MeteoSchweiz: Tageswerte Oktober, Säntis

³⁵ Juliwert Säntis: Schweizer Weltatlas (2002), S.14

Die Mittelwerte aus meiner Messreihe entsprechen nicht exakt dem Monatsmittel, da die Batterien der Messgeräte nur bis Anfang 27. Oktober reichten. In den nicht mehr erfassten 4 – 5 Tagen fanden aber keine tief greifenden Veränderungen mehr (z.B. plötzlicher Wintereinbruch) in Bezug auf die bisherige Tendenz statt.

Eine bedeutsame Fehlerquelle könnte das Messgehäuse sein: Eine Wetterhütte für Lufttemperaturmessungen gemäss Norm fasst etwa das 10-fache Volumen des Vogelhäuschens, welches für die Messungen im Brüeltobel verwendet wurde und ist durch schräge, senkrecht übereinander angeordnete Latten belüftet. Es besteht die Gefahr, dass im Innern des Vogelhäuschens vor allem bei längerer Sonnenbestrahlung ein relativ warmes Mikroklima entsteht, auch, weil es nicht wie eine gewöhnliche Wetterhütte weiss gestrichen ist. Dadurch dass das Konstrukt seitlich offen steht, ist jedoch eine gute Belüftung gewährleistet.

Das Gehäuse, unter dem die Temperatur 5 cm über dem Boden gemessen wurde, ist grösser und deshalb vertrauenswürdiger. Es wurde helles Holz verwendet und die Durchlüftung ist gewährleistet. Direkt über dem Boden trifft man auf jeden Fall die tiefsten Temperaturen an. Im Herbst ist dies häufig mit Taubildung verbunden: Bei einer Kontrollbesichtigung am 14.10.06 war der Temperaturfühler mit Tau bedeckt, auch die nebenbei aufgezeichnete Luftfeuchte, welche fast die ganze Zeit über 100% betrug, deutet darauf hin. Somit könnte die Taubildung eine weitere Fehlerquelle für die Temperatureaufzeichnung gewesen sein.

2.5.2.1 Tagesmittel

Neben den angenäherten Monatsmitteln beider Messreihen errechnete ich die Tagesmittel vom 2.10 bis zum 26.10. im Hexenwäldli. Ein „Messtag“ umfasst alle Zehnminuten-Messwerte von 00:00 bis 23:50 eines Tages. Die daraus erstellte Grafik zeigt das Verhältnis zwischen der Temperatur 5 cm über Boden und derjenigen 185 cm über Boden besonders anschaulich. Auffällig ist dabei, dass die Temperatur knapp über dem Boden auf plötzliche Temperaturänderungen träger reagiert als die Lufttemperatur. In der zweiten Hälfte der Messperiode verlaufen die beiden Kurven fast parallel. Zwei markante Ereignisse sind der Temperatursturz während des Kaltfronteinbruches in der Nacht auf den 6. des Monats und der schnelle Temperaturanstieg vom 25. zum 27. Oktober in Folge des Föhns.

2.6 Feldprotokolle



Abbildung 10: Die Schutthalde am 7. Mai: Das Hexenwäldli liegt noch unter einer beträchtlichen Schneedecke.

7. Mai 2006

Auf dem Fahrweg und am Hang mit dem Hexenwäldli liegt noch Schnee: Vom Hangfuss an, wo der Schnee wahrscheinlich auch eingeweht wurde, nimmt die Mächtigkeit der Schneedecke gegen die Felswand hin ab, die obersten 5 – 10 m der Schutthalde sind aper.

Die grösste Schneehöhe beträgt zirka 40 cm und teilweise ragen erst die Spitzen der Tännchen aus dem Schnee.

Im schneefreien Bereich zwischen den Tannen unterhalb bzw. seitlich des Hexenwäldli tritt stellenweise eine dünne Eisschicht unter der obersten Moos- und Humusschicht hervor.



Abbildung 11a/b: Zwischen Moosen und Grasen (z.T. von Hand entfernt) am Rande des Hexenwäldli ist Eis sichtbar (Pfeil). Zirka 40 cm links der Landeskarte beginnt die Schneedecke.

24. Mai 2006

Nach einer warmen Periode ist die Schneedecke abgesehen von kleinen Resten am Hangfuss vollständig abgeschmolzen. Die Fichten zeigen noch Spuren von der Last des Schnees: Zum Teil sind die Nadeln bräunlich verfärbt und die Fichten weisen eine stark gekrümmte Statur auf.

19. August 2006

Während des Sommers hat sich für den Beobachter äusserlich nicht viel geändert, ausser dass sich die Bäumchen jetzt sichtlich erholt haben vom Winter. Sie präsentieren sich in frischem Grün und stehen verhältnismässig aufrecht.

2. November 2006

Diese Besichtigung findet etwa 30 Stunden nach dem ersten Schneefall bis in tiefe Lagen statt. Nordwestwinde brachten einen Temperatursturz von bis zu 15°C, der eine fast ununterbrochene vierwöchige Schönwetterperiode mit mildem Hochdruckwetter beendete.

Zwischen 14 Uhr und 15 Uhr erhielten wenige Tännchen im mittleren Bereich etwa für eine Viertelstunde direkte Sonnenbestrahlung. Während der restlichen Zeit lag die ganze Schutthalde im Schatten der Felswand und des hohen Waldes, der sich westlich anschliesst.



Abbildung 12: Blick in Richtung NO auf das Hexenwäldchen (2. November 2006). Im Hintergrund hoher Wald.

Am Fuss der Schutthalde wurden **5 cm Neuschnee** und eine Bodenoberflächentemperatur von -4°C bzw. eine Lufttemperatur von -3°C gemessen (mit „Suunto Vector“ Multifunktionsuhr, fragliche Genauigkeit!). Während dem Temperatursturz ist der Regen in Schnee übergegangen, wodurch die Schneedecke hart gefroren ist. Darauf liegt noch eine dünne Schneesicht, die etwas später gefallen sein dürfte. Auffallend sind die bis zu 20 cm langen Eiszapfen, die sich an der Felswand gebildet haben.

Leider kann an diesem Tag der Herbstschneeeffekt (siehe Kapitel 2.2) nicht beobachtet werden, da der Neuschnee bei den Minustemperaturen noch nicht zu schmelzen begonnen hat.

Ich hebe im Bereich des rohen Blockschuttes im oberen Drittel des Hanges ein ca. 30 cm tiefes Loch aus. In dieser Tiefe sind die Steine kleiner und erstaunlich locker, weisen Hohlräume auf. Eine subjektive „Temperaturfühlung“ mit der Hand ergibt im gegrabenen Trichter deutlich wärmere Temperaturen. Ein weiterer deutlicher Hinweis auf warme Luftmassen, die in diesem Hangbereich aus dem Boden aufsteigen, ist ein aperer Bereich von etwa drei Quadratmetern. Während der ganze Hang mit angefrorenem Schnee bedeckt ist, scheint er hier schon beim Niederfallen fortlaufend geschmolzen zu sein!

Diese empirischen Erkenntnisse belegen die Theorie der jahreszeitlich wechselnden Windströmungen im Innern der Schutthalde (Kapitel 2.3.5). Da beim Untersuchen die austretende Luft im oberen Abschnitt des Hanges eher als warm empfunden wurde, hat man es hier mit der Wintervariante des Systems zu tun.



Abbildung 13: Das Lufttemperaturmesshäuschen im verschneiten Wäldchen, welches noch im Schatten der Felswand steht. Auf halber Höhe des Holzpfahles befindet sich das Hinweisschild für Wanderer.



Abbildung 14a: Das zur Temperaturführung ausgehobene Loch im oberen Teil der Schutthalde. Als Grössenvergleich ein Turnschuh links unten im Bild.



14b: Blitzaufnahme aus der Nähe: Zwischen den Steinen (2 – 15 cm Durchmesser) sind Laubreste und (beginnende?) Humusbildung erkennbar.

31. Dezember 2006

Vom Schneefall des 8. und 9. Dezembers liegt noch immer eine 10 – 20 cm dicke Schicht, trotz über zweiwöchigem Strahlungswetter (kaum Unterbrüche) mit Inversionslagen und zeitweisen Temperaturen um 15°C auf 1000 m ü. M. In höheren Lagen, wie zum Beispiel am Fälensee (1450 m ü. M.), liegt an diesem Tag eine bedeutend kleinere Restschneemenge als im Brüeltobel.³⁶



Abbildung 15: (3. November 2006) Blick ins innere des Häuschens, unter dessen Dach die Temperatur 5 cm über Boden gemessen wurde: Im Zentrum ist der Messfühler zu sehen, der mit dem dick in Plastik eingewickelten Datalogger verbunden ist (Hintergrund). Die Konstruktion scheint ihre Schutzfunktion gut erfüllt zu haben, da kaum Schnee eingedrungen ist.

³⁶ Feldprotokoll: Alther, Dersu

3 Der alpine Permafrost

3.1 Definition

Lithosphärenmaterial, dessen Temperatur während des ganzen Jahres auf oder unter dem Gefrierpunkt liegt, wird als Permafrost bezeichnet.

Ob im Boden Eis enthalten ist, bleibt für diese Definition irrelevant.³⁷

Permafrost meint nur den gefrorenen Boden und nicht Gletscher bzw. reines Eis.

3.2 Grundlagen

Im Sommer taut die oberste Bodenschicht in Permafrostgebieten jeweils auf (active layer), während in der Tiefe der eigentliche Permafrostkörper bestehen bleibt. Wenn die Auftauschicht im Winter jeweils wieder bis zum Permafrostkörper zufriert, spricht man von aktivem Permafrost, da sich in diesem Falle der Permafrostkörper während der kalten Jahreszeit wieder regeneriert.

Befindet sich der Permafrostspiegel, d.h. die Obergrenze des Permafrostkörpers, tiefer als 6m unter der Bodenoberfläche, so handelt es sich um inaktiven Permafrost. Der Winterfrost reicht nur ungefähr bis in eine Tiefe von 6m hinab und deckt hier nicht die ganze Auftauschicht ab. Inaktiver Permafrost ist in Zeiten entstanden, in denen die MAGT (Mean Annual Ground Temperature) und somit auch die MAAT noch tiefer lagen. Er taut allmählich auf.

Beim Eisgehalt in Permafrostböden wird unterschieden zwischen eisuntersättigtem Boden (Eisvolumen < Schuttvolumen), gesättigtem Boden, bei dem der ganze Porenraum im Schutt mit Eis ausgefüllt ist, und eisübersättigtem Boden (Eisvolumen > Schuttvolumen).³⁸

Man vermutet in Tiefen von mehreren Deka- bis Hektometern reliktschen Permafrost aus früheren Kaltzeiten. In verschiedenen unterkühlten Blockschutthalden, unter anderem auch im Brüeltobel, wurden reliktsche Permafrostkörper als Ursache für die tiefen Bodentemperaturen in Betracht gezogen. Im Creux du Van konnte ein solcher durch die Messung des elektrischen Widerstandes im Boden und durch Bodentemperaturmessungen nachgewiesen werden. (siehe Kapitel 2.4)

³⁷ Keller (1994), S. 22ff

³⁸ Keller (1994), S. 22ff

3.3 Verbreitung

Die Untergrenze des Vorkommens von zonalem Permafrost liegt an NW – exponierten Hängen am tiefsten. In allen Expositionen folgt sie ungefähr der -2°C bis -1°C Isotherme der MAAT.

Unterhalb dieser Grenze spricht man von sporadischen (lokalen) Permafrostvorkommen, welche bis auf eine Höhe von 1000 m ü. M. hinunter möglich sind. Darüber wird beim zonalen, grossflächigen Permafrost zwischen dem kontinuierlichen und dem diskontinuierlichen unterschieden. Mit diskontinuierlich werden voneinander getrennte Flecken gemeint, deren Auftreten vor allem vom Mikro- und Regionalklima abhängt. Dabei sind die Parameter Strahlung, Lufttemperatur und Oberflächenbeschaffenheit bestimmend. Man wird zum Beispiel in schattigen, kaltluftgefüllten Muldenlagen eher Permafrost antreffen, als an besonnten Kuppen oder Graten.

Die geografische Verbreitung des Permafrostes hängt von der Energiebilanz am Boden ab. Diese beeinflusst direkt die thermischen Bedingungen im Boden. Die Oberflächentemperatur hat eine bedeutende Aussagekraft, da sie direkt durch die Strahlung, die Lufttemperatur und die Art und Beschaffenheit der Oberfläche beeinflusst wird (siehe Kapitel 2.3.1)

Grundsätzlich ist die Verbreitung von Permafrost abhängig von der Temperatur, welche die Untergrenze seines Auftretens bestimmt, und vom Niederschlag: In tendentiell maritimen Klimaten findet man eher Gletscher vor und in trockenen, kontinentalen Klimaten tritt häufiger Permafrost auf.³⁹

3.3.1 Topografische Ermittlung von Permafrost

In **Hanglagen** mit einer Neigung $> 5 - 10^{\circ}$ ist die Permafrostverbreitung stark expositionsabhängig.

Auf der Nordhälfte, von Sektor NE bis W, ist Permafrost bis auf 2600 m ü. M. hinunter wahrscheinlich. Auf der südlichen Hälfte begrenzt sich das Terrain, wo Permafrost wahrscheinlich ist, auf Höhen über 3000 m. Der Bereich, wo gefrorener Boden noch möglich ist, erstreckt sich jeweils zirka 200 m unter die Untergrenze der oben genannten Zonen.

³⁹ Keller (1994), S. 22ff

Hangfusslagen sind oft bis in den Sommer hinein mit (Lawinen-)schnee bedeckt, der den Boden kühl hält. Überdauern die Schneereste den ganzen Sommer, so induzieren sie höchstwahrscheinlich Permafrost.

Diese Lage weist in allen Expositionen ein vertikal grösseres Verbreitungsterrain auf. Permafrost ist von Sektor Nord bis und mit Sektor SW bis auf eine Höhe von 2100 m ü. M. möglich und in den Sektoren S bis SE ist er noch bis auf 2700 – 2800 m ü. M. hinunter wahrscheinlich bzw. bis auf 2200 – 2300 m ü. M. hinunter möglich.⁴⁰

Tallagen und Mulden weisen wegen ihrer dickeren Schneedecke erst in höheren Lagen Permafrost auf und sind expositionsunabhängig.

Gipfellagen und Grate liegen auf Grund der Windexponiertheit selten unter einer mächtigen Schneedecke. Die hohe Strahlungsbilanz wirkt der schwachen Isolationswirkung entgegen und führt dort zu eher wärmeren Bodentemperaturen.⁴¹

3.3.2 Indikatoren für Permafrost

- **Blockgletscher** sind handfeste Indikatoren für Permafrost. Darunter versteht man gefrorene Schuttmassen, welche sich, einem zähflüssigen Lavastrom ähnlich, langsam hangabwärts bewegen. Sie treten in eher kontinentalen, trockenen Gebirgsklimata auf und werden an ihrer oberen Verbreitungsgrenze meist von Gletschern abgelöst, während die Untergrenze mit derjenigen für diskontinuierlichen Permafrost übereinstimmt. Im Allgemeinen ist grobblockiges Oberflächenmaterial im Gegensatz zu feinkörnigen, wasserführenden Schichten permafrostgünstig, unter anderem, weil der grobe Schutt auf Grund der Öffnungen zwischen den Blöcken schlechter isoliert ist.
- **Frostmusterböden und Solifluktsdecken** (unbewachsene Schuttgebiete) können auch als Indikatoren verwendet werden. Da ihre Entstehung vom in höheren Lagen ausgewaschenen Feinmaterial abhängt, findet man sie vor allem im Bereich der Permafrostuntergrenze.
- **Perennierende Schneeflecken**, die den Sommer überdauern, induzieren mit grosser Wahrscheinlichkeit Permafrost. Sie bestehen aus Lawinenkegeln an Hangfusslagen und aus windverfrachtetem Schnee.

⁴⁰ Keller (1994), S.28: Schlüssel zur Permafrostverteilung (nach Haeberli 1975)

⁴¹ Keller (1994), S. 20ff

- **Quellwassertemperaturen** unter 1°C im Spätsommer weisen auf Permafrost hin, da in diesem Falle das Wasser durch den Kontakt mit einem Permafrostkörper gekühlt wurde.⁴²

3.4 Nutzen der Permafrostforschung

3.4.1 Bauprojekte

Erkenntnisse aus der Permafrostforschung sind unerlässlich für sicheres und reibungsloses Bauen in alpinen Gebieten oberhalb von 2000 m ü. M, vor allem für das Erstellen von Schutzvorrichtungen wie Lawinenverbauungen.

Bauarbeiten in alpinen bis hochalpinen Lagen, bei deren Planung ein mögliches Permafrostvorkommen nicht miteinbezogen wurde, können wegen des hart gefrorenen Bodens auf ernsthafte Probleme stossen.

Bei bestehenden Bauwerken wie Lawinenverbauungen können auf Grund der Fließ- und Kriecheigenschaften von Permafrost induzierenden Böden gravierende Schäden durch Verschiebungen im Untergrund entstehen.

3.4.2 Naturgefahren

Das Zielgebiet, dem die grösste Bedeutung zukommt und das in Zukunft noch an Bedeutung gewinnen wird, ist die Gefahrenanalyse. Durch die Klimaerwärmung tauen grossflächig Permafrostgebiete auf und das ganze Material in den Steilhängen, welches bis anhin durch den Frost zusammengehalten wurde, droht hinunterzustürzen.

Felswände zerfallen viel schneller als in gefrorenem Zustand. Dies bringt eine erhöhte Felssturzgefahr mit sich. Schuttansammlungen lösen sich und durchnässte Hänge bilden Murgänge.⁴³

⁴² Keller (1994), S. 27ff / S.36ff

⁴³ Keller (1994), S. 15ff

3.5 Klimabeispiel Corvatsch

3.5.1 Gebietsbeschreibung

Das Corvatschgebiet bildet eine Gebirgskette im Oberengadin, die zwischen dem Val Roseg und dem Val Fex von Norden nach Süden verläuft. Eine markante Erhebung im Norden wird von der Bergstation (3295 m ü. M.) der Luftseilbahn „Corvatsch“ gekrönt. Darauf folgen im Süden der Piz Murtèl (3433 m ü. M.) und der Piz Corvatsch (3451 m ü. M.) als höchste Erhebung dieser Gruppe. Die Ostflanken des Piz Corvatsch und des Piz Murtèl sind stark vergletschert, während die Westseite kleinere Gletscher aufweist.⁴⁴

Interessant ist der Blockgletscher Murtèl-Corvatsch im NNW der Bergstation „Corvatsch“: Er ist Teil eines grösseren Permafrostgebietes und gilt als einer der bestuntersuchten Standorte überhaupt.

3.5.2 Klimafaktoren

Im Hinblick auf eine Gegenüberstellung mit den Verhältnissen im Brüeltobel werden im Folgenden kurz die klimatischen Einflüsse im alpinen Permafrost des Corvatsch beschrieben.

Die Lufttemperatur wird hier in den Mittelpunkt gestellt, da sie leicht messbar ist. Dadurch lässt sich eine Messreihe⁴⁵ der Station „Corvatsch“ (3315 m ü. M.) von MeteoSchweiz exemplarisch mit der des Brüeltobels vergleichen.

Das Corvatschgebiet erhält im Verhältnis zum Rest der Schweiz auf Grund der winterlichen Hochdrucklagen im Engadin und seiner südlichen Lage eher viel Sonnenbestrahlung, die zudem verhältnismässig steil einfällt (kleinerer Breitengrad). Das langjährige Mittel der relativen Sonnenbestrahlung auf dem Corvatsch beträgt 48%.⁴⁶

Oberhalb 3000 m ü. M. ist Permafrost im Corvatschgebiet in allen Expositionen und in Nord- und Nordostlagen bis auf 2600 m ü. M. hinunter wahrscheinlich. Südhänge sind zum Teil bis auf 3000 m ü. M. permafrostfrei.⁴⁷

⁴⁴ Landeskarte Piz Bernina. 1277 (1979)

⁴⁵ Internet: MeteoSchweiz: Tageswerte Oktober, Corvatsch

⁴⁶ Internet: MeteoSchweiz: Normwerte der Relativen Sonnenscheindauer

⁴⁷ Keller (1994), S. 63 (Karte)

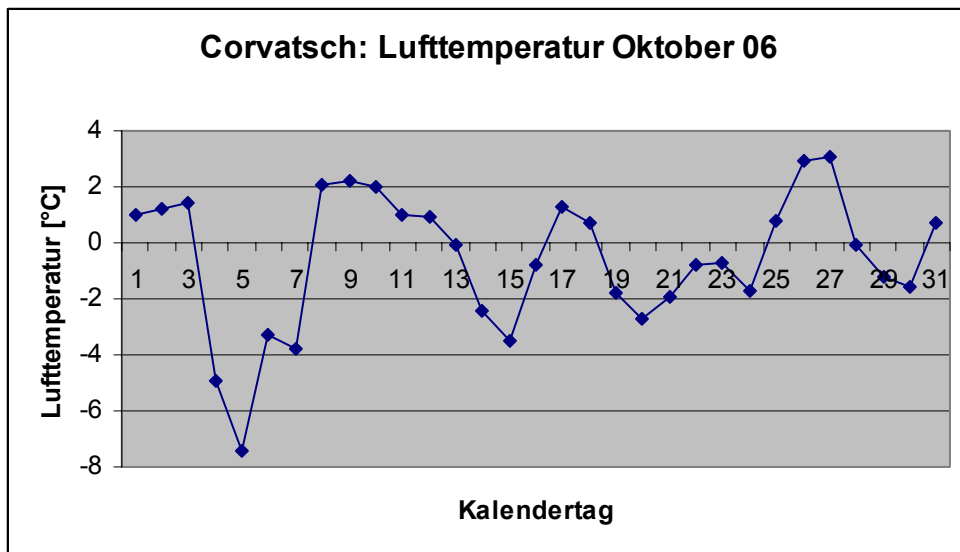


Abbildung 16: Tagesmittelwerte⁴⁸ der Lufttemperatur auf der Messstation „Corvatsch“ (3315 m ü.M.) im Oktober 2006. Monatsmittel (10.2006): **-0.56°C**. Jahresmittel 1961 - 1990: **-6.0°C**

⁴⁸ Internet: Meteoschweiz: Tageswerte Oktober, Corvatsch

4 Vergleich Brüeltobel – Corvatsch

Ich habe die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur vom Oktober 2006, gemessen durch MeteoSchweiz, in einer Grafik den Messwerten aus dem Brüeltobel gegenübergestellt. Mit Hilfe der übrigen Klimafaktoren entsteht ein Vergleich des Einflusses der Temperatur im speziellen Lokalklima des Brüeltobels mit der Bedeutung dieses Klimafaktors für die Energiebilanz im zonalen Permafrost auf dem Corvatsch.

Es ist zu beachten, dass der Corvatsch in einer völlig anderen klimatischen Region auf der Alpensüdseite liegt und deshalb ein Vergleich des Wetterverlaufes, ausser bei einigen prägnanten Wetterlagen, heikel und wenig aussagekräftig wäre.

Ich möchte den Standort Corvatsch primär als repräsentierendes Beispiel für ein Gebiet mit zonalem Permafrost anführen und nicht vor dem Hintergrund der spezifischen klimatischen Begebenheiten in der Region.

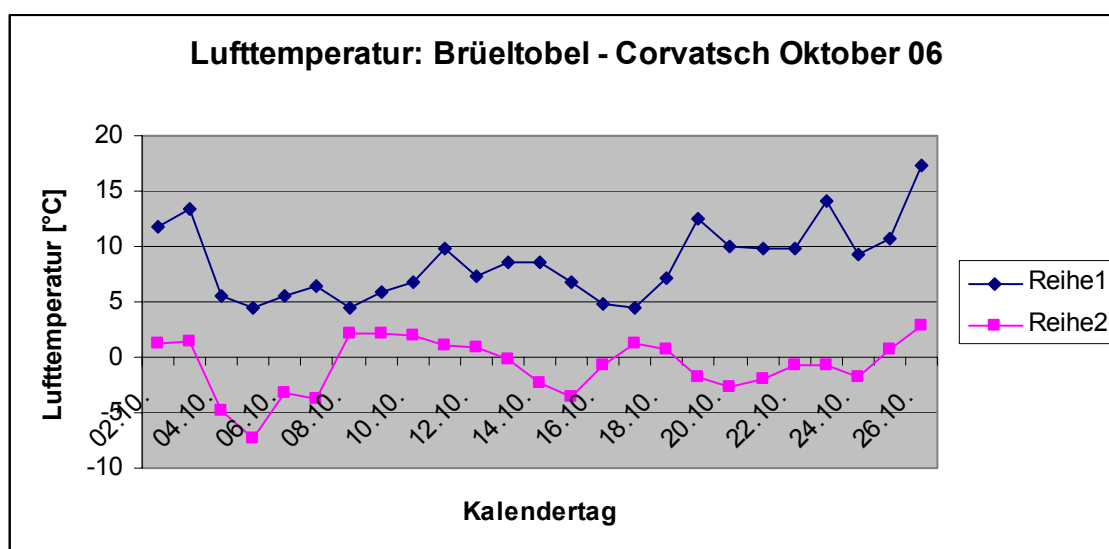


Abbildung 17: Die Tagesmittelwerte (2. bis 26. Oktober) der Messungen im **Brüeltobel (Reihe 1)** in Relation mit den Tagesmittelwerten vom **Corvatsch (Reihe 2)**. Auffällig sind der Temperatursturz am Monatsanfang, während dem die beiden Graphen nahezu parallel verlaufen und die Erwärmung Ende Monat in Folge einer Föhnlage.

4.1 Auswertung

Die Grafik veranschaulicht, was schon ein Vergleich der Monatsmittelwerte ergibt: Im Brüeltobel sind die Temperaturen in dieser Messperiode mit einem Mittelwert der Lufttemperatur von 8.7°C wie erwartet frappant höher als am Corvatsch, wo die mittlere Lufttemperatur über dieselbe Zeitspanne -0.77°C beträgt. Da diese Temperaturdiffe-

renz über 9°C beträgt, stellt sich die Frage, wie bei solch „warmen“ Bedingungen noch ein, wenn nicht permafrosthaltiger, dann zumindest unterkühlter Boden bestehen kann. Die Bedeutung dieser Werte muss ein wenig relativiert werden, da erstens die Messbedingungen der Aufzeichnungen vom Brüeltobel nicht ganz der Norm entsprechen und zweitens die Messperiode viel zu kurz ist, um genügend aussagekräftig zu sein. Trotzdem sind die Lufttemperaturen im Brüeltobel viel zu hoch, als dass allein dadurch das Wachstum der Fichten gehemmt werden könnte. *Die Antwort liegt bei weiteren Klimafaktoren, welche einen Einfluss auf die Energiebilanz und schliesslich auf die Temperatur im **Innern** der Schutthalde haben.*

Im Hexenwäldli des Brüeltobels ist die Strahlungsbilanz am Boden geringer als an den meisten Standorten im Corvatschgebiet. Zum einen bewirkt dies die schattige Lage (Kapitel 2.3.2.2) und zum andern ist dies durch das regionale Klima bedingt: Während der Mittelwert der jährlichen relativen Sonnenscheindauer im Alpsteingebiet etwa 36% beträgt, bringt es der Corvatsch auf 48%, was ein Verhältnis von 3:4 bedeutet.

Das Corvatschgebiet ist im Gegensatz zum Alpstein niederschlagsarm: Der Säntis erhält im Mittel über dreimal so viel Niederschlag wie die Messstation Corvatsch und St.Gallen verzeichnet die 1.5-fache Niederschlagsmenge. Im Winter dürfte so das Brüeltobel ähnlich grosse Schneemengen aufweisen wie der Corvatsch, die sich jedoch im Brüeltobel auf Grund der wärmeren Lufttemperaturen nicht so früh ablegen und nicht so lange liegen bleiben wie am Corvatsch.

5 Ergebnisse

5.1 Brüeltobel

5.1.1 Energiebilanz

Am Untersuchungsstandort im Brüeltobel weisen verschiedene Indikatoren wie der Kümmerfichtenbestand und die Windlöcher auf eine Energiebilanz am Boden hin, die lokal niedriger ist als die regionale Energiebilanz auf der gleichen Höhenlage.⁴⁹

Biologische Faktoren wie Nährstoffarmut als Gründe für das gehemmte Wachstum der Fichten sind eher auszuschliessen, da unmittelbar neben dem Zwergfichtenbestand hoher Wald gedeiht.

5.1.2 Klimafaktoren

Der regionale klimatische Rahmen ist gezeichnet von grossen Jahresniederschlägen und einer geringen relativen Sonnenscheindauer.

Auffällig für den Standort des Hexenwäldli ist seine strahlungsarme Lage: Die nördliche Exposition direkt unter einer Felswand in einer engen Schlucht lässt ein Minimum an direkter Sonnenbestrahlung zu. Rist gibt für die jährliche Strahlungsbilanz 30 bis 45 W / m² an.

Die Lufttemperatur im Hexenwäldli liegt klar im positiven Bereich. G. Wegmann hat diese zwischen 3.0 und 5.5°C eingeschätzt.⁵⁰

Ein wichtiger Faktor ist der Niederschlag: Im Winter bildet sich eine Schneedecke, die einerseits isolierend wirkt und andererseits im Frühling durch ihre hohe Albedo die Strahlung reflektiert und den Boden kühl hält, während die Lufttemperatur steigt.

Einen besonders kühlenden Einfluss auf die Bodentemperatur hat aber das Windsystem⁵¹ in der Schutthalde. Im Winter wird die Blockschutthalde durch die Aussenluft, die sie von unten nach oben durchströmt, stark unterkühlt. Im Sommer verläuft der Effekt umgekehrt.

Belege für das Windsystem

- Schlotte durch die Schneedecke am Kopf der Schutthalde mit ausströmender Warmluft

⁴⁹ Rist (2002), S.6ff

⁵⁰ Wegmann (1995), S.20ff

⁵¹ Rist (2002), S.6ff

- Windlöcher am Fuss der Schutthalde mit ausströmender Kaltluft
- Bodentemperaturmessungen von Wegmann: bedeutend kühlere Bodentemperaturen im unteren Teil der Schutthalde als im oberen Teil
- Ergebnisse vom Creux du Van: direkte Relation zwischen Lufttemperatur und Bodentemperatur in der Schutthalde unter einer isolierenden winterlichen Schneedecke (Temperatur in Schutthalde = Aussentemperatur); indirekte Relation zwischen Lufttemperatur und Bodentemperatur in der Schutthalde bei Lufttemperaturen über 7°C (Temperatur in Schutthalde < Aussentemperatur)

5.1.3 Hinweise auf eine niedrige Energiebilanz

Im Verlauf der Feldversuche ergaben sich folgende Beobachtungen in der Blockschutthalde im Brüeltobel:

- Geringe Bodenmächtigkeit im Bereich der Zwergfichten
- Anfang Mai im unteren Teil noch relativ viel Schnee im Verhältnis zur Umgebung, Boden vereist; oberer Teil bereits aper
- Sommer: kühler Luftzug am Fuss der Schutthalde
- relativ lange Erholungsphase der Fichten nach dem Winter

5.1.4 Temperaturmessungen

Bei den Messungen der Luft- und Bodenoberflächentemperatur vom 2. bis zum 26. Oktober 2006, welche vor allem zu exemplarischen Zwecken durchgeführt wurden, war die relativ hohe Differenz zwischen der mittleren Temperatur 5 cm über Boden (6.3°C) und der mittleren Temperatur 185 cm über Boden (8.7°C) auffallend.

Die Resultate veranschaulichten die aussergewöhnlich warmen Herbsttemperaturen. Verglichen mit den Messreihen anderer Stationen während der gleichen Zeitspanne liegen die Lufttemperaturwerte (185 cm über Boden) mehr oder weniger im Trend. Das Lufttemperaturmittel der Messstation Säntis in derselben Messperiode beträgt 4.2°C. Berechnet man diesen Wert (Station Säntis), ausgehend vom Lufttemperaturmittel im Brüeltobel (8.7°C) mit einem Gradienten von 0.5°C pro 100 Höhenmeter, so kommt man auf 2.2°C. Diese Diskrepanz von 2°C zwischen der berechneten Temperatur und der tatsächlich gemessenen lässt auf verhältnismässig niedrige Lufttemperaturen im Brüeltobel schliessen!

5.2 Vergleich mit zonalem Permafrost

5.2.1 Gegenüberstellung

Die klimatischen und topographischen Parameter, welche in einer unterkühlten Blockschutthalde (Beispiel Brüeltobel) bzw. in einem zonalen Permafrostgebiet (Beispiel Corvatsch) vorherrschen, werden einander gegenübergestellt und nach ihrer Bedeutung für das jeweilige Gebiet beurteilt.

<i>Parameter</i>	Blockschutthalde des Brüeltobels Unterkühlter Boden	Messstation Corvatsch und Corvatschgebiet Zonaler Permafrost
Topographische Parameter		
<i>Höhe über Meer</i>	Brüeltobel: 1180 – 1220 m Allgemein: < 2000 m	Messstation: 3315 m Permafrost wahrscheinlich ab 2600 m ü. M. (an NW-Hängen möglich ab 2050 m ü. M.)
<i>Exposition</i>	Nordwest	Alle (Süd: Permafrost erst ab 3000 m ü. M. wahrscheinlich)
<i>Geländeform</i>	Steilhang unter einer Felswand in einer Schlucht	Hänge, Hangfusslagen, Gipfelflagen
<i>Oberfläche</i>	Unten: Moosiger Humus mit Gras, von Zwergfichten bewachsen Oben: aperer Blockschutt, Rostseggenbestand	Blockschutt, Geröll Feinmaterial Fels Firn Kaum Vegetation
Klimatische Parameter		
<i>Strahlung</i>	- Bilanz: ist Geringer als in der nächsten Umgebung - 36% relative Sonnenscheindauer - Grössere Albedo als in Umgebung, aber kleiner als im Corvatschgebiet	- Bilanz ist nicht besonders tief (ausser in Schattenlagen) - 48% relative Sonnenscheindauer - eher grosse Albedo, da vorwiegend Schutt, Fels und Schnee
<i>Temperatur</i>	Jahresmittel [Lufttemp.] 3.0 – 5.5 °C	- 6.0°C (Messstation Corvatsch)

	Mittelwert 2.10.06 – 26.10.06	8.7°C [Lufttemp.] 6.3°C [Oberflächentemp.]	-0.77°C ⁵² [Lufttemp.] Messstation Corvatsch
<i>Niederschlag jährlich</i>		>2000 mm	850 mm ⁵³
<i>Schneedecke im Winter</i>		0.5 – 1.5 m ⁵⁴	1 – 1.5 m
<i>Bodentemperatur</i>		Um 0°C von Dezember bis Ende Mai ⁵⁵	ab 2 bis 5 m Tiefe ganzjährig 0°C ⁵⁶ (zum Teil bis in gerin- gere Tiefen)
<i>Windsystem im Boden</i>		Vorhanden	nur in Blockgletschern oder schattigen Schutthalden

5.2.2 Schlüsse

1. Der zonale Permafrost ist im Gegensatz zur azonalen unterkühlten Blockschutthalde (mit möglichem sporadischem Permafrost) ein stark temperaturabhängiges Phänomen. Da die Lufttemperatur direkt mit der Höhe über Meer korreliert, ist er höhenabhängig.
2. Die Energiebilanz in unterkühlten Blockschutthalden wird durch eine strahlungsarme Lage, geringmächtigen Boden und ein kühlendes Windsystem vermindert, während die Lufttemperatur nicht frappant niedriger ist als in anderen vergleichbaren Gebieten dieser Höhenlage.
3. Die Schneedecke im Hexenwäldli ist Anfang Winter dünner als in alpinen Regionen, sodass der Boden auskühlt. Ende Winter ist der Unterschied zwischen den Schneehöhen der beiden Standorte nicht mehr beträchtlich und der Isolationseffekt bleibt bis in den Frühling ähnlich stark. Er wird in unterkühlten Blockschutthalden aber durch die Löcher zwischen den Steinen ausser Kraft gesetzt.
4. Oberhalb von 3000 m ü. M. ist zonaler Permafrost nicht durch eine niedrige Strahlungsbilanz oder ein kühlendes Windsystem bedingt. In tieferen Lagen (2100 – 3000m ü. M.) ist seine Verbreitung vor allem in Hanglagen von der Exposition und somit von der Strahlungsbilanz abhängig.

⁵² Internet: MeteoSchweiz: Tageswerte Oktober, Corvatsch

⁵³ Internet: MeteoSchweiz: Normwerte der Niederschlagssumme

⁵⁴ Rist (2002), S. 56

⁵⁵ Wegmann (1995); Philipps et al. (2002)

⁵⁶ Vonder Mühl (1993), S.20

6 Diskussion

6.1 Brüeltobel

6.1.1 Lokalklima

Viele Vermutungen bezüglich der Klimafaktoren im Brüeltobel haben sich bestätigt:

Eine wichtige Rolle spielen das Windsystem im losen Blockschutt und die Strahlungsarmut, die durch die schattige Lage bedingt ist. Durch die Auseinandersetzung mit der Arbeit über den Creux du Van und mit dem Werk von Wegmann wurde die Funktion und Bedeutung des Windsystems aber noch stark präzisiert. Im Winter entsteht die Unterkühlung nicht nur durch die entzogene latente Wärme, sondern vor allem dadurch, dass der Isolationsmechanismus der Schneedecke ausser Kraft gesetzt wird, indem die oben austretende Warmluft kalte Aussenluft am Fuss der Schutthalde nachzieht.

Anfang Winter gelangt kalte Luft auch direkt durch die noch dünne Schneedecke, da diese wegen dem groben Blockschutt Hohlräume aufweist und nicht so kohärent ist wie die Schneedecke über dem Humusboden. Einmal eingetreten, bleibt ein Grossteil der Kaltluft unter der winterlichen Schneedecke eingeschlossen bis zum Abtauen.⁵⁷

Die Feldvisiten und das Kartenstudium haben die Annahme einer extrem seltenen Bestrahlung relativiert. Immerhin kann davon ausgegangen werden, dass im Winter während ungefähr zwei Monaten kein direktes Sonnenlicht das Hexenwäldli erreicht.

Die Existenz von reliktschem Permafrost unter dem Hexenwäldli erachte ich als eher unwahrscheinlich, kann sie aber nicht kategorisch verneinen. Die Ergebnisse der geophysikalischen Sondierungen durch Wegmann lassen keine gefrorene Bodenschicht vermuten.⁵⁸ Für eine eindeutige Klärung dieser Frage müssten mehrere Bohrungen durchgeführt werden, was einen radikalen Eingriff in die einmalige Landschaft des Hexenwäldli darstellen würde.

6.1.2 Andere Ursachen für Zwergwuchs von Kümmerfichten

In meiner Arbeit habe ich mich vor allem mit den abiotischen Parametern, namentlich mit den klimatischen Ursachen für das eingeschränkte Wachstum der Fichten im Brüeltobel, auseinandergesetzt.

⁵⁷ Rist (2002), S. 48f

⁵⁸ Wegmann (1995), S.66ff

Als Ursache für den Zwergwuchs wurden von Schudel aber auch die Spurenelemente im Boden miteinbezogen. Sie analysierte dazu Bodenproben aus verschiedenen Kümmerfichtenbeständen in der Schweiz. Schudel stiess dabei auf Stickstoff- und zinklimitierte Verhältnisse, Untersuchungen von Bauermeister kamen zu gegenteiligen Resultaten. Auch ergaben die Auswertungen von Schudel teilweise toxische Mengen von Aluminium in den Zwergwäldchen, was durch die Ergebnisse von Bauermeister wiederum dementiert wurde, da diese keine giftigen Konzentrationen von Aluminium in den Fichtennadeln ergaben. Der pH-Wert scheint keinen direkten Einfluss auf die Ringbreiten der Fichten zu haben. Die Fichten sind aber abhängig von einem ausreichenden Kohlenstoffgehalt.⁵⁹

Die Frage ist, ob sich der Mineraliengehalt im Boden über die derart kurze Distanz zwischen Hexenwäldchen und hohem Wald so drastisch verändert, dass das Phänomen der Zwergfichten als alleinige Folge einer ungünstigen Mineralienkonzentration gesehen werden kann.

Für den Untersuchungsstandort Brüeltobel findet sich in den Ergebnissen von Schudel für die Elemente Kalium, Magnesium und Zink hingegen ein bemerkenswerter Unterschied zwischen Hexenwäldli und hohem Wald.⁶⁰

Es wäre ein möglicher Gegenstand weiterer Untersuchungen, das Ausmass der Bedeutung dieser Diskrepanzen für das Gedeihen der Fichten im Brüeltobel zu ermitteln. Abschliessend kann man sagen, dass die vergleichbare Lage (Höhe ü. M., Felswand, schattig etc.) verschiedener untersuchter Hexenwäldli in der Schweiz ein dringender Hinweis auf die wichtige Rolle klimatischer und topographischer Parameter ist, der den Einfluss des Mineralstoffgehaltes eher als zusätzlichen Faktor erscheinen lässt.

6.1.3 Feldversuche

Die empirischen Erkenntnisse waren eindrücklich: Beim Besuch Anfang Mai war ich überrascht darüber, dass im Hexenwäldli noch 40 cm Schnee lagen, der Waldboden eisdurchsetzt war und noch mehr darüber, dass der obere, schattigere Teil der Schuttalpe trotzdem bereits aper war.

Leider konnte der Herbstschneeeffekt nicht beobachtet werden. Ich begab mich zwar kurz nach dem ersten Schneefall des Jahres an Ort, doch die Temperaturen waren noch zu tief, als dass die dünne Schneekruste bereits hätte schmelzen können.

⁵⁹ Schudel (2002), S. 38f. S.51ff

⁶⁰ Schudel (2002), S. 38

Danach war es schwierig, den richtigen Zeitpunkt abzuschätzen und ich konnte auch nicht so bald wieder einen halben Tag für einen Ausflug ins Brüeltobel entbehren.

Dafür verliefen die geplanten Temperaturmessungen umso reibungsloser: Als Messmonat wurde an Stelle des Septembers der Oktober auserkoren, da ich erst später als geplant Messgeräte zur Verfügung bekam. Ein detaillierter Beschrieb der Umsetzung der Messungen und der Messgenauigkeit findet sich in den Kapiteln 2.5.1 bzw. 2.5.2. Die Auswertung der Daten mit Hilfe von Excel nahm viel Zeit in Anspruch. Doch die Resultate stellten sich wie erhofft als ergiebiges Vergleichsmaterial heraus. Die gemessenen Temperaturen präsentierten sich um einiges höher als erwartet. Dies ist vor allem auf den allgemein warmen Oktober 2006 zurückzuführen.

6.2 Vergleich mit zonalem Permafrost

Die Gegenüberstellung der beiden Gebiete hat die anfänglichen Annahmen zu einem grossen Teil bestätigt: Den bedeutendsten Unterschied zwischen den klimatischen Einflüssen im Hexenwäldli und denjenigen im zonalen Permafrost machen wohl die Windzirkulation bzw. die Strahlungsarmut in der Blockschutthalde und die Lufttemperatur aus. Der auskühlende Effekt im Boden während des Winters und die ständige Durchlüftung, welche die isolierende Wirkung einer dicken Schneedecke aufhebt, sind Phänomene, die im alpinen Permafrost selten auftreten. Am ehesten findet man sie aber noch bei Blockgletschern, bei denen Schlote durch die Schneedecke im grobblockigen Permafrost beobachtet wurden.⁶¹

Der Unterschied zwischen der Lufttemperatur des Brüeltobels und derjenigen der Station Corvatsch ist höher ausgefallen als erwartet.

Ein Unsicherheitsfaktor bei den konkreten Höhenangaben zur Verbreitung des Permafrostes könnte im Alter der Literaturquellen bestehen, die fast ausschliesslich aus den 90er-Jahren stammen und teilweise noch weiter zurückgreifen. Denn mit der aktuellen klimatischen Erwärmung verändern sich auch die Permafrostgebiete drastisch.

Man kann sich fragen, ob ein Vergleich zweier derart unterschiedlicher Gebiete in repräsentierender Funktion, die zudem geografisch durch den gesamten Alpenbogen

⁶¹ Vonder Mühl (1993)

separiert werden, überhaupt möglich ist, ohne dass dabei die Relationen komplett verfälscht werden.

Ich meine, dass dies immer machbar ist, solange die gewonnenen Erkenntnisse nicht oder nur für ähnliche Fälle verallgemeinert werden. Die Ergebnisse für den Vergleich mit dem Corvatschgebiet dürfen zum Beispiel nicht ohne weiteres auf Permafrostgebiete im Berner Oberland übertragen werden. Als Grundsatz gilt, dass die Gebiete immer möglichst ganzheitlich im Zusammenhang mit den lokalen und regionalen Begebenheiten und Parametern betrachtet werden sollen.

6.3 Ausblick

6.3.1 Warmes Jahr 2006

Die Temperaturen in der Schweiz im Jahr 2006 erinnerten an die globale Erwärmung: Der Juli wurde von einer Rekordhitze beherrscht und nennenswerte Niederschläge blieben aus. Das Auftauen des Permafrostes machte sich bemerkbar, als sich Felsstürze am Eiger ereigneten. Nach einem kühleren August folgte ein sehr warmer Herbst: Beständige Hochdruckgebiete prägten das Wetter in den Alpen und die mittleren Herbsttemperaturen lagen auf der Alpennordseite etwa 3°C über dem langjährigen Mittel.⁶² So verwundert es kaum, dass das Jahresmittel 2006 1.2 bis 1.7°C über dem langjährigen Mittel lag und dass die relative Sonnenscheindauer im Jahre 2006 120% des Durchschnitts betrug.⁶³

Einzelne solcher Jahre sind bisher durchaus schon vorgekommen, doch seit den 90er-Jahren häufen sich diese Ereignisse.

6.3.2 Zukünftige klimatische Entwicklung

Modellrechnungen haben ergeben, dass bis zum Jahre 2050 die mittleren Temperaturen im Winter in der ganzen Schweiz um 1.8°C ansteigen werden, im Sommer sogar um 2.7°C (Alpensüdseite: 2.8°C; Konfidenzintervall 1.1°C – 5.9°C).

Im Winter werden die Niederschläge gegenüber 1990 um 8% zunehmen, im Sommer werden sie sich um 17% vermindern.

⁶² Internet: MeteoSchweiz: Aktuelles zum Wettergeschehen / Das Klima der letzten Monate

⁶³ St.Galler Tagblatt (2.1.2007), S. 8

Zwischen 1959 und 1997 lag die Nullgradgrenze, die in etwa der Schneefallgrenze entspricht, im Winter durchschnittlich auf 1000 m ü. M. Bis zum Jahre 2050 wird sie, bei einer Bandbreite von 150 – 650 m, voraussichtlich um 350 m ansteigen.⁶⁴

6.3.3 Bedeutung für das Brüeltobel

Schudel stellte in ihrer Arbeit fest, dass sich die Ringbreite der Fichten in den Übergangsbereichen der untersuchten Zwergwäldchen seit 1950 kontinuierlich der des grossen Waldes angenähert und diese jetzt ungefähr erreicht hat. Diese Fichten werden also in absehbarer Zeit die Grösse von hohem Wald erreichen.

Auch die Ringbreite der Zwergtännchen nahm seit 1950 kontinuierlich zu, wenn auch moderater.⁶⁵

Rist hat den oberen Grenzwert der Lufttemperatur für das Vorkommen von Hexenwäldli mit 8°C angegeben.⁶⁶ Tritt die oben aufgeführte Prognose für 2050 ein, so läge der von Wegmann⁶⁷ berechnete obere Näherungswert für die MAAT im Brüeltobel (5.5°C) um 2050 über 8°C. Doch auch wenn vom unteren Näherungswert ausgegangen wird, wird sich die globale Erwärmung auf das Wachstum der Tännchen auswirken, da sich diese in einem klimatischen Grenzbereich befinden. Der prognostizierte Anstieg der Nullgradgrenze im Winter würde exakt die Höhenstufe des Hexenwäldlis im Brüeltobel überschreiten.

Der Trend zur wachsenden Ringbreite wird sich also womöglich verstärken und die Kümmerfichtenbestände werden stärker wachsen. Reliktische Permafrostvorkommen wie das im Creux du Van nachgewiesene werden langsam verschwinden.

⁶⁴ Frei et al. (2006)

⁶⁵ Schudel (2002), S. 26ff

⁶⁶ Rist (2002), S. 23

⁶⁷ Wegmann (1995), S. 20ff

7 Schlusswort

Für diese Maturaarbeit habe ich mich einerseits mit der bereits vorhandenen Literatur über unterkühlte Blockschutthalden mit Hexenwäldli und über alpinen Permafrost befasst, andererseits habe ich durch Untersuchungen an Ort und mittels Temperaturmessungen im Brüeltobel Erfahrungen und Daten gesammelt.

Im Verlaufe der Arbeit hat mich das sagenumwobene Wäldchen im düsteren und unwirtlichen „Tobel“ zunehmend in seinen Bann gezogen. Vor allem die empirische Vorgehensweise bei den Feldversuchen hat mich fasziniert und die körperliche Tätigkeit war eine willkommene Abwechslung zur Schreibtischarbeit.

Ich hätte nicht erwartet, dass sich nahezu alle geplanten Untersuchungen realisieren lassen würden.

Die Natur hält noch eine Menge solcher Geheimnisse bereit, deren Erforschung ein spannendes Ziel sein kann. Jedoch sollte man dabei nie vergessen, dass der Mensch von der Natur abhängig ist und diese deshalb mit Respekt behandeln muss. Das bedeutet, dass er sich mit Eingriffen zurückhalten und sich in freier Landschaft stets als Gast fühlen sollte.

8 Dank

Als erstes möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Patrick Hager, meinem Mentor, bedanken: Von Beginn an hat er mich als Geograf bei meiner Arbeit aktiv und mit grossem Interesse unterstützt. Er stand mir mit Rat und Tat zur Seite, ob es sich um die Themenwahl, inhaltliche Fragen, technische Hürden oder organisatorische Probleme handelte. Auch hat er mir Mut gemacht, noch unbekannte und komplexe Dinge anzupacken und zu ergründen.

Ein besonderer Dank geht auch an Herrn Markus Weder und seine Mitarbeiter von der EMPA St. Gallen. Die Temperaturaufzeichnungen im Brüeltobel wurden erst dadurch möglich, dass ich von ihnen kostenlos Datalogg-Geräte zur Verfügung gestellt bekam. Auch die Messdaten haben sie für mich auf den Computer übertragen.

Ich danke Herrn Armin Rist dafür, dass er mir auf meine Anfrage prompt seine Diplomarbeit über unterkühlte Blockschutthalden zur Verfügung gestellt hat.

Für die Zusendung von Gabi Wegmanns Diplomarbeit über das Hexenwäldli im Brüeltobel bin ich Herrn Martin Hoelzle (Universität Zürich) sehr dankbar.

Ich bedanke mich auch bei Dersu Alther, der mir Digitalbilder vom Zustand der Schneedecke im Hexenwäldli am 31.12.06 zukommen liess und dazu Bericht erstattete.

Thomas, Rahel und Marianne Egli danke ich für ihre Hilfe bei computertechnischen Fragen, für ihre kritische Meinung zu inhaltlichen und formalen Aspekten der Arbeit und vor allem für die moralische Unterstützung.

9 Literaturverzeichnis

9.1 Sekundärliteratur

- **Delaloye, R., Reynard, E. & Lambiell, C., Marescot, L. & Monnet, R. (2003):** Permafrost, Thermal anomaly in a cold scree slope (Creux du Van, Switzerland). Hrsg. M. Phillips, S. M. Springman, L. U. Arenson. Swets & Zeitlinger B.V. Lisse. The Netherlands
- **Frei, C., Calanca, P., Schär, C., Wanner, H., Schädler, B., Haerberli, W., Neu, U., Thalmann, E., Ritz, C., Hohmann, R. (August 2006):** Grundlagen, Das Klima in der Schweiz im Jahr 2050. Bern
- **Keller, Felix (1994):** Interaktionen zwischen Schnee und Permafrost. Eine Grundlagenstudie im Oberengadin. VAW der ETH Zürich. 144 S.
- **Lexikon der Geowissenschaften:** Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg, Berlin 2000
- **Meyers Lexikonredaktion:** Wetter und Klima. Meyers Lexikonverlag. Mannheim, Wien, Zürich 1989
- **Phillips, M., Freppaz, M., Stöckli, V. (unveröff. 2002):** Messung der Bodentemperatur in Hexenwäldchen und benachbartem hohem Wald des Brüeltobel und Creux du Van. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung. Davos
- **Rist, Armin (2002):** Unterkühlte Blockschutthalden mit Hexenwäldli - Abiotische Faktoren zur Charakterisierung des Phänomens. Diplomarbeit, Fachbereich Landschaftsökologie, TU München-Weihenstephan. SLF Davos. 65 S.
- **Schudel, Katharina (2002):** Hexenwäldli – Dendroökologie von Kümmerfichtenbeständen auf unterkühlten Schutthalden. Diplomarbeit, Departement für Umweltnaturwissenschaften, ETH Zürich. 64 S.

- **Spiess, Ernst:** Schweizer Weltatlas. Hrsg. Konferenz der kantonalen Erziehungsdirektoren (EDK). Lehrmittelverlag des Kantons Zürich. Zürich 2002
- **Vonder Mühl, Daniel (1993):** Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Oberengadins. VAW der ETH Zürich. 222 S.
- **Wegmann, Gabi (1995):** Permafrostvorkommen auf geringer Meereshöhe. Eine Fallstudie im Brüeltobel (AI). Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich. 80 S.

9.2 Landeskarten

- **Piz Bernina.** 1277. Landeskarte der Schweiz 1:25'000. Bundesamt für Landestopographie. Wabern 1979
- **Säntis.** 1115. Landeskarte der Schweiz 1:25'000. Bundesamt für Landestopographie. Wabern 1978

9.3 Internetquellen

- **Eidg. Schnee- und Lawinenforschungsinstitut (SLF) :** www.slf.ch :
 - Hexenwäldli: <http://www.slf.ch/lebensraum-alpen/hexenwaeldli-de.html>. 9.9.06
 - <http://www.slf.ch/lebensraum-alpen/permafrost-wasser-de.html>. 9.9.06
 - http://www.slf.ch/lebensraum-alpen/permafrost_schneedecke-de.html. 9.9.06
- **MeteoSchweiz:** www.meteoschweiz.ch. Aktuelles:
 - Aktuelles zum Wettergeschehen. 26.11.06
 - Das Klima der letzten Monate. 26.11.06
- **MeteoSchweiz:** www.meteoschweiz.ch. Klima → Klimanormwerte:
 - Normwerte 1961-1990 der Niederschlagssumme. 1.1.07
 - Normwerte 1961-1990 der Tage mit > 0.9 mm Niederschlag. 1.1.07
 - Normwerte 1961-1990 der Lufttemperatur. 1.1.07

- Normwerte 1961-1990 der relativen Sonnenscheindauer. 1.1.07

- **MeteoSchweiz:** www.meteoschweiz.ch. Services → Produkteübersicht → Messwerte → Tageswerte Oktober, Corvatsch / Säntis. 27.12.06
- **Wikipedia:** www.wikipedia.de → Albedo:
http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Albedo-d_hg.png. 13.9.06

9.4 Weitere Quellen

Medien

- **St.Galler Tagblatt** (2.1.2007), sda: Schauplatz. S. 8

Personen

- Alther, Dersu, Andwil, Lehrling (2.1.2007): Feldprotokoll vom 31.12.06
- Hoelzle, Martin, Prof. Dr. Geografie, Universität Zürich: Persönliche Einschätzung zu Permafrost im Brüeltobel

9.5 Abbildungen

Falls es nicht als Fussnote anders vermerkt ist, wurden die Bilder durch den Autor selbst erstellt.

10 Bestätigung der Eigentätigkeit

Der Unterzeichnete bestätigt mit seiner Unterschrift, dass die Arbeit selbstständig verfasst und in schriftliche Form gebracht worden ist, dass sich die Mitwirkung anderer Personen auf Beratung und Korrekturlesen beschränkt hat und dass alle verwendeten Unterlagen und Gewährspersonen aufgeführt sind. Er weiss, dass die erstellte Arbeit Eigentum der Schule ist und dass eine Veröffentlichung oder Weitergabe der Zustimmung von Autor, Betreuer und Schulleitung bedarf.

Pascal Egli, St.Gallen, 21.1.07

Kurzzusammenfassung

Meine Arbeit untersucht die lokalen klimatischen Einflüsse in der unterkühlten Blockschutthalde des Brüeltobels. Die dortigen Klimafaktoren werden denen im zonalen Permafrostgebiet am Corvatsch (Oberengadin) gegenübergestellt.

Im Brüeltobel weist ein Kümmerfichtenbestand auf eine niedrige Energiebilanz in der Schutthalde hin. Diese entsteht vor allem durch die strahlungsarme Lage direkt unter einer Felswand und durch ein Luftzirkulationssystem im Blockschutt. Durch dieses wird der Untergrund im Winter ausgekühlt und im Frühling apert der Hang erst spät aus. Verschiedene Untersuchungen an Ort bestätigen diese Theorien, die ich unter anderem auch aus universitären Arbeiten über Hexenwäldli übernommen habe.

Bevor ich das Hexenwäldli mit dem alpinen Permafrost verglich, fasste ich einige Grundlagen zu den Eigenschaften und zur Verbreitung von Permafrost zusammen: Es handelt sich dabei um ganzjährig gefrorenen Boden, der oberhalb von 2400 m ü. M. grossflächig auftritt und abhängig von Temperatur, Niederschlag und Exposition ist. Das Kernstück des Vergleiches der beiden Standorte bilden eigene Temperaturmessungen im Brüeltobel und eine Messreihe von MeteoSchweiz am Corvatsch. Die Differenz der Mittel aus den beiden Messreihen ist mit 9°C sehr gross. In Kombination mit weiteren Klimafaktoren kommt man zum Schluss, dass zonaler Permafrost ein stark temperaturabhängiges Phänomen ist, während unterkühlte Blockschutthalden von lokalen Parametern wie der Exposition, der Windzirkulation und der Bodendicke beeinflusst werden.