


## 5.1. Unterkühlte Schutthalden (und andere Lockermaterialansammlungen) in niedrigen Höhenlagen

 [geomorphologie-montagne.ch/de/5-1-unterkuehlte-schutthalden-und-andere-lockermaterialansammlungen-in-niedrigen-hoehenlagen/](https://geomorphologie-montagne.ch/de/5-1-unterkuehlte-schutthalden-und-andere-lockermaterialansammlungen-in-niedrigen-hoehenlagen/)

In mittleren und niedrigen Höhenlagen, unterhalb von 2000 m ü. M., kommen unterkühlte Schutthalden vor. Sie zeichnen sich durch "mysteriöse" Kaltluftzirkulationen und eine abnormale Abkühlung des Bodens aus. Vor dem 20. Jahrhundert wurden diese besonderen Orte unter anderem als "natürliche Kühlschränke" genutzt.

Mehrere hundert Meter unterhalb der Untergrenze des diskontinuierlichen Permafrosts (die etwa auf 2500 m ü. M. liegt, siehe Factsheet Permafrost 1.6) finden sich in zahlreichen porösen Sedimentformationen (**unterkühlte Schutthalden**, fossile Blockgletscher, Felssturzablagerungen) (Abb. 1 & 2) sowie in unterirdischen Hohlräumen (Höhlengletscher oder Eishöhlen, siehe Factsheet Permafrost 5.5) gefrorene Böden und mehrjähriges oder saisonales Eis.

Die Existenz kühler Bedingungen am Fuss von Schutt-/Geröllhalden in niedrigeren Höhenlagen ist seit mehreren Jahrhunderten bekannt. Horace Bénédicte De Saussure berichtete 1796 auf seiner Reise durch die Alpen, dass *«ein Hirte beobachtete, dass seine Schafe während der grossen Hitze alle ihre Nasen auf den Boden legten, vorzugsweise an bestimmten Stellen, (...) am Fusse eines Berges, der ganz mit kantigem Geröll bedeckt war, und von dem ein kühler Wind ausging»*. Zahlreiche historische Dokumente, die auf wissenschaftliche Reisen von Horace Bénédicte De Saussure (1796), Ferdinand Keller (1839) oder Edwin Swift Balch (1900) im 18. und 19. Jahrhundert zurückgehen, berichten bereits von unterkühlten Schutthalden in geringer Höhe, auch wenn die Autoren sie nicht in diesem Sinne beschrieben. Zu dieser Zeit waren sie hauptsächlich als **«Windlöcher»** bekannt.

Interessanterweise **fürten die Menschen diese kalten Bedingungen schon zu dieser Zeit auf die Existenz eines Luftstroms zurück** und verstanden bereits einige grundlegende Eigenschaften des Abkühlungsprozesses von Schutthalden (siehe Factsheet Permafrost 5.2). Dieser natürliche Frischluftstrom wurde früher für den Bau von **Milchkellern** (Milchhüttchen) genutzt, in denen *«die Milch drei Wochen lang unverdorben blieb, das Fleisch einen Monat lang haltbar war und die Kirschen von einem Jahr zum anderen aufbewahrt werden konnten»* (De Saussure 1796). Diese Hütten, von denen einige auch zur Konservierung von Schnee genutzt wurden, waren in der Zentral- und Ostschweiz sowie im Tessin weit verbreitet (Abb. 3). Auch heute noch wird ein am Fusse einer unterkühlten Schutthalde im Rif Bruyant (französische Alpen) errichteter Keller für die Reifung von Käse genutzt (Abb. 4).

**Die Unterkühlung von talwärts gelegenen Bereichen von Schutt-/Geröllhalden in mittleren und niedrigen Höhenlagen ist ein weit verbreitetes Phänomen (Abb. 5).** Basierend auf dem Auftreten klassischer Hinweise für eine Unterkühlung (siehe [Factsheet Permafrost 5.3](#)) konnten in Europa anhand wissenschaftlicher Literatur mehr als 140 unterkühlte Schutthalden identifiziert werden. Hinweise können sein: Ortsnamen, die an das Vorhandensein von Eis in geringer Höhe erinnern, (schriftliche) Zeugnisse von Eis und kühlen Luftströmen im Sommer, Auftreten von Zwergbaumwäldern oder spezialisierten Ökosystemen oder, bei älteren Texten, die Erwähnung von Milchkellern. Die betroffenen Standorte befinden sich meist im unteren Bereich von Schutt-/Geröllhalden (manchmal auch von Felssturzablagerungen oder fossilen Blockgletschern) und sind zwischen einigen hundert Quadratmetern und einigen Hektaren gross.



**Fig. 1 – La combe de Dreveneuse (Chablais valaisan) et ses imposants voiles d'éboulis.**

Abb.1: Die Talmulde von Dreveneuse (Walliser Chablais) mit ihren imposanten Schutthalden.



**Fig. 2 – Le glacier rocheux fossile du Gros Chadoua (Préalpes fribourgeoises) s’est développé en contrebas d’un large voile d’éboulis. Des moraines tardiglaciaires se rencontrent également sur le site. Une zone d’arbres nains, des cristaux de glace et de forts courants d’air froids ont été découverts sur le complexe éboulis – glacier rocheux fossile.**

---

Abb.2: Der fossile Blockgletscher von Gros Chadoua (Freiburger Voralpen) entstand unterhalb einer breiten Schutthalde. Spätglaziale Moränen sind ebenfalls an diesem Standort zu finden. Im Bereich der Schutthalde –und des fossilen Blockgletschers wurden ein Gebiet mit Zwergbäumen, Eiskristalle und starke Kaltluftströme ausgemacht.



**Fig. 3 – Caves à lait de Seelisberg (Lucerne) décrite par Ferdinand Keller (1839). Aujourd’hui les maisons en bois ont disparu, mais des murets de pierre formant un carré de 2 mètres de côté sont toujours visibles dans les parties basses de la pente d’éboulis. Il est possible que les caves à lait aient été construites à cet endroit.**

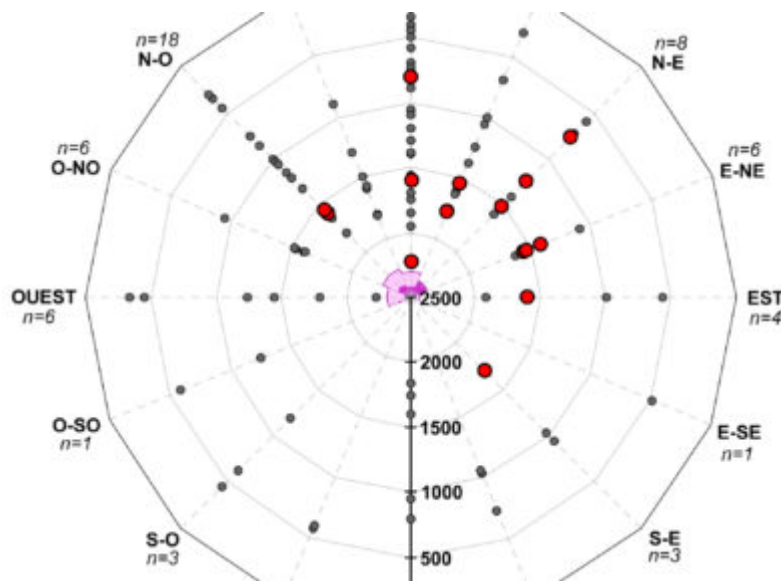
---

Abb.3: Milkeller von Seelisberg (Uri), beschrieben von Ferdinand Keller (1839). Heute sind die Holzhäuser verschwunden, aber niedrige Steinmauern, die ein Quadrat mit einer Seitenlänge von 2 Metern bilden, sind in den unteren Teilen des Schutthaldenhangs noch sichtbar. Es ist möglich, dass die Milkeller einst an dieser Stelle gebaut wurden.



**Fig. 4 – Construite à la base d'un éboulis, la cave à fromage du Rif Bruyant est toujours utilisée pour l'affinage des fromages en raison des températures froides qui s'y maintiennent durant toute la saison estivale.**

Abb.4: Der Käsekeller von Rif Bruyant wurde am Fuss einer Schutthalde errichtet und wird aufgrund der kalten Temperaturen, die dort während des gesamten Sommers herrschen, noch immer zur Käsereifung genutzt.



**Fig. 5 – Répartition des éboulis froids décrits dans la littérature en fonction de l'altitude et de l'orientation. Les cercles rouges indiquent la position des sites d'étude de Suisse occidentale présentés dans la thèse de Morard (2011) et dans les travaux de Delaloye (2004), Lambiel (2006) et Dorthe & Morard (2007). La zone rose claire au centre du quadrant indique l'extension du pergélisol discontinu selon le modèle Haute-Alpes calcaires (Imhof 1996), la zone violette les limites définies par le modèle Entremont (Delaloye & Morand 1997). Tous les sites sont (largement) localisés en dessous de la limite régionale du pergélisol discontinu.**

Abb.5: Verteilung von in der Literatur beschriebenen unterkühlten Schutthalden nach Höhenlage und Exposition. Die roten Kreise zeigen die Lage der Untersuchungsgebiete in der Westschweiz, die in der Dissertation von Morard (2011) und in den Arbeiten von Delaloye (2004), Lambiel (2006) und Dorthe & Morard (2007) vorgestellt wurden. Der hellrosa Bereich in der Mitte des Quadranten zeigt die Verbreitung von diskontinuierlichem Permafrost gemäss dem Modell Haute-Alpes calcaires (Imhof 1996), der violette Bereich die gemäss dem Modell Entremont (Delaloye & Morand 1997) definierten Permafrostuntergrenzen. Alle Standorte liegen (weit) unterhalb der regionalen Untergrenze des diskontinuierlichen Permafrosts.

## 5.2. Luftzirkulation durch Kamineffekt

---

 [geomorphologie-montagne.ch/de/5-2-luftzirkulation-durch-kamineffekt/](http://geomorphologie-montagne.ch/de/5-2-luftzirkulation-durch-kamineffekt/)

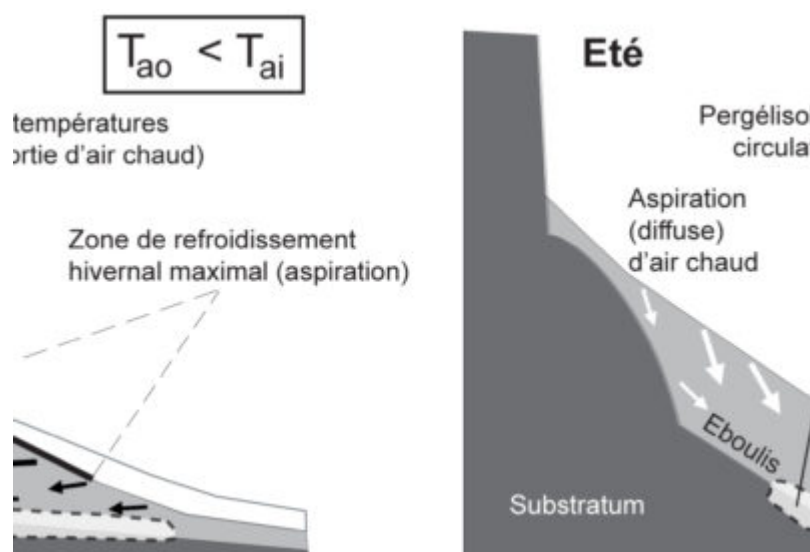
Die Unterkühlung von Schutthalden in mittleren und niedrigen Höhenlagen wird durch einen Luftzirkulationsmechanismus verursacht, der als Kamineffekt bezeichnet wird. Der Luftstrom im Inneren der Schutthalde ist im Winter aufsteigend und im Sommer abfallend.

Von Lockermaterial bedecktes Gelände, bestehend aus Blöcken und porösen Zwischenräumen wie beispielsweise bei Schutt-/Geröllhalden und fossilen Blockgletschern, kann von einem Luftzirkulationsmechanismus durchströmt werden, der als **Kamineffekt** bezeichnet wird. Dieser Prozess der **bidirektionalen Belüftung** wurde ursprünglich in unterirdischen Netzwerken mit mehreren, auf unterschiedlichen Höhen liegenden Eingängen beschrieben (siehe [Factsheet Permafrost 5.5](#)). Diese «*dunklen Winde*» sind im Wesentlichen thermischen Ursprungs, da ihre Richtung und Geschwindigkeit vom **Temperaturgradienten zwischen dem Inneren und Äusseren des belüfteten Systems** abhängen. Die Temperaturentwicklung kann in zwei unterschiedliche Phasen unterteilt werden: **das Winterregime (aufsteigend) und das Sommerregime (absteigend)** ([Abb. 1](#)).

- Im Winterregime ist die Luft im Inneren der belüfteten Sedimentformation wärmer (und damit leichter) als die Aussenluft. Es stellt sich ein aufsteigender Luftstrom ein ([Abb. 2](#)). Infolgedessen wird **kalte Luft angesaugt**, wobei sich die Zone maximaler Abkühlung etwa 10 m oberhalb des Fusses der Schutt-/Geröllhalde befindet ([Abb. 3](#)). Ansauglöcher begünstigen das Eindringen der kalten Aussenluft in das Lockermaterial. Dies kann jedoch auch durch eine dicke Schneedecke hindurch stattfinden! Die Blöcke, aus denen die Schutt-/Geröllhalde besteht, sowie der darunter liegende und angrenzende nicht poröse Untergrund (anstehender Fels, [Moräne](#)) speichern die durch den Luftstrom eingebrachte Kälte durch [Konduktion](#) (Wärmeleitung). Die Schutt-/Geröllhalde nutzt also alle kalten Perioden des Winters, um sich unter den Gefrierpunkt abzukühlen und ein «**Kältereservoir**» zu bilden ([Abb. 4](#)). Das Ansaugen von kalter, trockener Luft im Winter führt auch zu einer Austrocknung der tiefliegenden Geländebereiche. Das Eis, welches in den Schutt-/Geröllhalden vorkommt, bildet sich daher nicht im Winter, sondern während der Schneeschmelze im Frühjahr.

- Die im **Winter gespeicherte Kälte fließt im Sommer durch die Schwerkraft vorzugsweise zu den tiefsten Stellen** der Schutt-/Geröllhalde oder des fossilen Blockgletschers. Es besteht also ein räumlicher Versatz zwischen Bereichen mit der stärksten Winterabkühlung und Bereichen mit der geringsten Sommererwärmung (Abb. 1). Während des Sommers neigt die allgemeine Tendenz der Temperaturentwicklung in einem Windloch zur Stabilität, auch wenn es kleine Schwankungen gibt, die umgekehrt proportional zur Entwicklung der Außenlufttemperatur sind. Mit anderen Worten: **Je wärmer es draussen ist, desto kühler ist der Luftstrom, der aus der Schutthalde austritt** (Abb. 5). Der Luftstrom bleibt im Sommer gesättigt (100% relative Luftfeuchtigkeit) und wird angefeuchtet, wenn er durch die unterkühlte Schutthalde strömt, die durch das Sickerwasser der Schneeschmelze feucht geworden ist.
- Herbst und Frühling sind Zeiträume, in welchen das Belüftungssystem schrittweise vom Sommer- zum Winterregime (und umgekehrt) übergeht. Die **Temperaturschwelle für die Umkehr des Luftstroms** hängt von der allgemeinen Temperatur des belüfteten Systems ab (Abb. 6) und liegt im Herbst bei einer höheren Aussenlufttemperatur als im Frühling (die Schutt-/Geröllhalde hat sich im Sommer erwärmt und im Winter abgekühlt). Am Creux-du-Van (Neuenburger Jura) zum Beispiel liegt die Umkehrschwelle im Herbst bei etwa +6°C und im Frühjahr bei +1/+2°C.

Während die Belüftung durch den Kamineffekt der dominierende Prozess zur Erklärung der Unterkühlung von Schutthalden in mittleren und niedrigen Höhenlagen ist, spielen andere Faktoren eine sekundäre Rolle bei der Verstärkung oder Abschwächung dieses Effekts: Sonneneinstrahlungsdefizit, Kühlung aufgrund eines sommerlichen Verdunstungsprozesses durch Absorption latenter Wärme, Begrenzung der Wirkung der Sonneneinstrahlung am Boden durch das Vorhandensein von Vegetation oder eines Moosteppichs, Korngrößenverteilung der Schutthalde, usw.

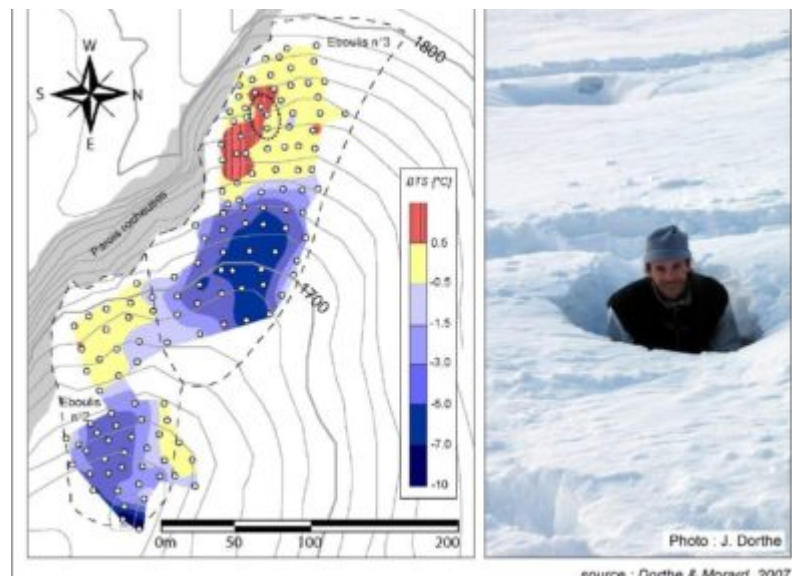


**Fig. 1 – Représentation schématique du processus de circulation d’air par effet de cheminée dans un éboulis de basse altitude en mode hivernal (ventilation ascendante) et estival (décharge gravitationnelle d’air froid).**

**Noter l'asymétrie du processus et la position différenciée des secteurs froids hivernaux et estivaux.  $T_{ao}$  = température de l'air extérieur ;  $T_{ai}$  = température moyenne de l'éboulis (source : Delaloye 2004).**

---

Abb.1: Schematische Darstellung des Prozesses der Luftzirkulation durch den Kamineffekt in einer tief gelegenen Schutthalde im Winter (aufsteigender Luftstrom) und im Sommer (gravitative Kaltluftabfuhr). Beachten Sie die Asymmetrie des Prozesses und die unterschiedliche Lage der winterlichen und sommerlichen Kältsektoren.  $T_{ao}$  = Aussenlufttemperatur;  $T_{ai}$  = Durchschnittstemperatur der Schutthalde (Quelle: Delaloye 2004).

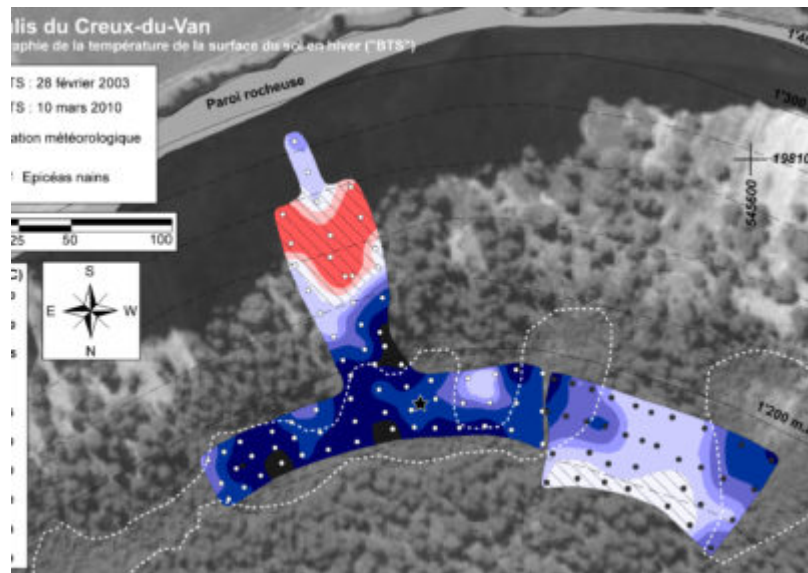


**Fig. 2 – Interpolation par krigeage simple de mesures BTS effectuées le 8 février 2005 dans les éboulis de la combe de Vudèche (Préalpes fribourgeoises). Dans les parties basses des éboulis, une zone sur-refroidie (entre -5 et -10°C) est présente malgré un manteau neigeux épais de 1.5 à 2 mètres. Dans les parties supérieures, les températures sont plus chaudes (voire positives), avec la présence de puits à air chaud (cercle noir et photo). Cette distribution thermique à la surface du sol est caractéristique d'un système de ventilation en régime hivernal (source : Dorthe & Morard, 2007).**

---

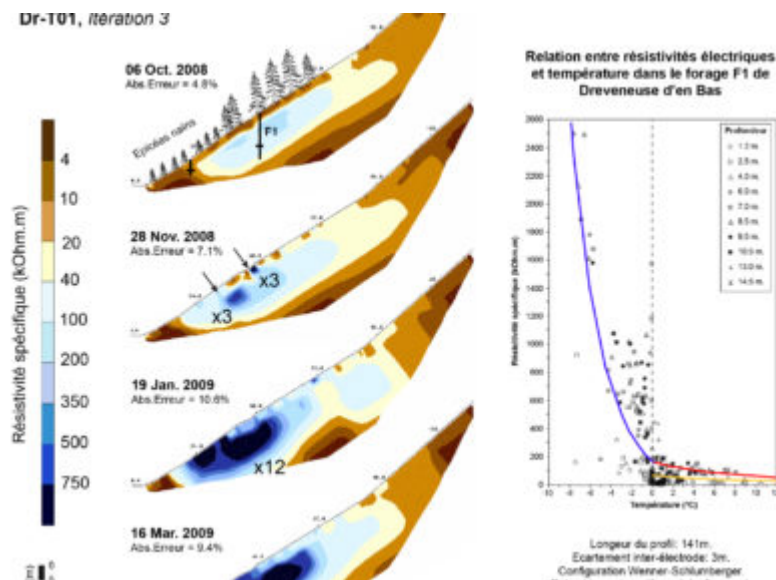
Abb.2: Einfache Kriging-Interpolation von BTS-Messungen, die am 8. Februar 2005 in den Schutthalden der Vudèche (Freiburger Voralpen) durchgeführt wurden. In den unteren Bereichen der Schutthalden ist trotz einer 1.5 bis 2 Meter dicken Schneedecke eine unterkühlte Zone (zwischen -5 und -10°C) vorhanden. In den oberen Bereichen sind die Temperaturen höher (sogar positiv), mit dem Auftreten von Warmluftschächten (schwarzer Kreis und Foto). Diese Wärmeverteilung an der Bodenoberfläche ist typisch für ein Belüftungssystem im Winterregime.





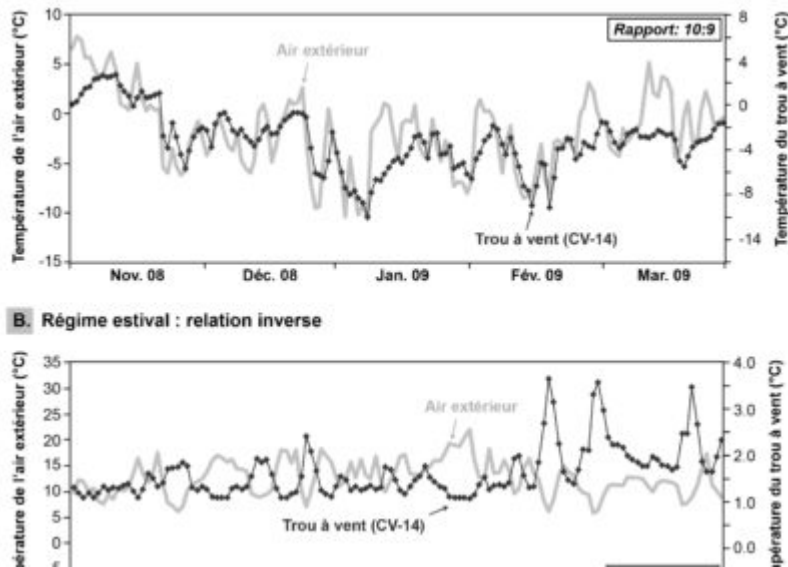
**Fig. 3 – Carte des températures de la surface du sol en hiver (BTS) sur l'éboulis du Creux-du-Van le 28 février 2003 (points gris) et le 10 mars 2010 (points blancs). La zone maximale de refroidissement hivernal s'étend jusqu'au milieu de la pente d'éboulis à l'amont des secteurs à épicéas nains (source : Morard, 2011).**

Abb.3: Karte der Bodenoberflächentemperaturen im Winter (BTS) auf der Schutthalde des Creux-du-Van gemessen am 28. Februar 2003 (schwarze Punkte) und am 10. März 2010 (weisse Punkte). Die Zone der maximalen winterlichen Abkühlung reicht bis zur Mitte des Schutthaldenhangs oberhalb des Bereichs mit Zwergfichtenbewuchs (Quelle: Morard, 2011).



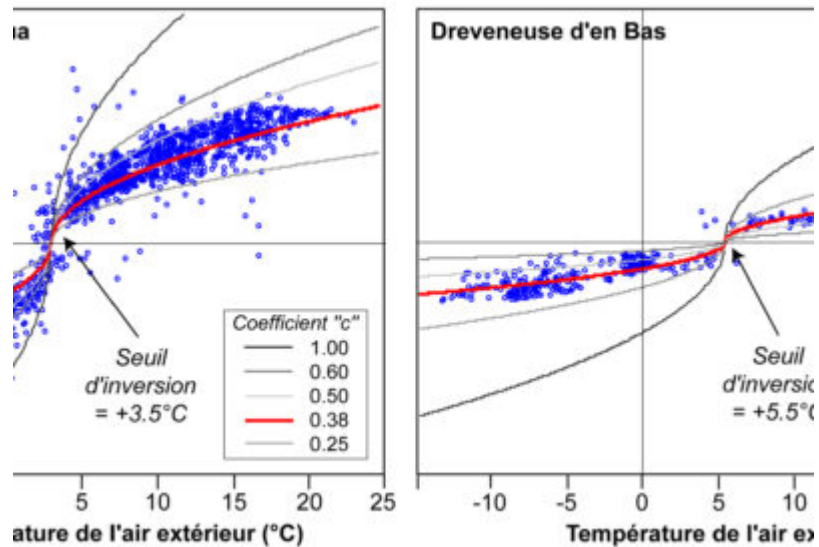
**Fig. 4 – Monitoring des résistivités électriques dans l'éboulis froid de Dreveneuse d'en Bas. L'augmentation des résistivités du sous-sol durant l'hiver s'expliquent en grande partie par le refroidissement et l'assèchement de l'éboulis consécutif à l'aspiration d'air extérieur froid. Le gel du terrain est profond et la zone de refroidissement ne se limite pas uniquement à la partie inférieure de la pente d'éboulis (source : Morard 2011).**

Abb.4: Monitoring der elektrischen Widerstände in der unterkühlten Schutthalde von Dreveneuse d'en Bas. Der Anstieg der Widerstandswerte im Untergrund während des Winters lässt sich grösstenteils durch die Abkühlung und Austrocknung der Schutthalde infolge des Ansaugens kalter Aussenluft erklären. Der Bodenfrost ist tiefgreifend und die Abkühlungszone beschränkt sich nicht nur auf den unteren Teil des Schutthaldenhangs (Quelle: Morard 2011).



**Fig. 5 – Evolution de la température de l'air extérieur (courbe grise) et du trou à vent du Creux-du-Van (courbe noire) durant l'hiver (A) et l'été (B). A) en hiver, l'évolution des températures est synchrone : une baisse des températures extérieures se traduit par une baisse de la température du courant d'air aspiré dans l'éboulis. B) en été, l'évolution des températures est inverse : une augmentation des températures extérieures se traduit par une baisse de la température du courant d'air expulsé dans l'éboulis. En effet, comme le contraste thermique augmente entre l'intérieur et l'extérieur de l'éboulis, le courant devient plus fort et expulse plus de « froid » de l'éboulis (source : Morard, 2011).**

Abb.5: Entwicklung der Temperatur der Aussenluft (graue Kurve) und des Windlochs des Creux-du-Van (schwarze Kurve) im Winter (A) und Sommer (B). A) Im Winter verläuft die Temperaturentwicklung synchron: Ein Rückgang der Aussenlufttemperaturen führt zu einem Rückgang der Temperatur des Luftstroms, der in die Schutthalde gesaugt wird. B) Im Sommer ist die Temperaturentwicklung umgekehrt: Ein Anstieg der Aussenlufttemperaturen führt zu einem Rückgang der Temperatur des aus der Schutthalde entweichenden Luftstroms. Da der Temperaturunterschied zwischen der Innen- und Aussenseite der Schutthalde zunimmt, wird der Luftstrom stärker und stösst mehr «Kälte» aus der Schutthalde aus (Quelle: Morard, 2011).



**Fig. 6 – Relation entre la température de l’air extérieur (axe X) et la vitesse et direction du courant d’air (axe Y) dans le trou à vent du Gros Chadoua (à gauche) et dans la partie basse de l’éboulis de Dreveneuse d’en Bas (à droite). La direction du courant d’air se renverse lorsque la température de l’air extérieur franchit un seuil thermique propre au site d’étude (source : Morard, 2011).**

Abb.6: Beziehung zwischen der Temperatur der Aussenluft (X-Achse) und der Geschwindigkeit und Richtung des Luftstroms (Y-Achse) im Windloch von Gros Chadoua(links) und im unteren Bereich der Schutthalde von Dreveneuse d'en Bas(rechts). Die Richtung des Luftstroms kehrt sich um, wenn die Aussenlufttemperatur einen für den Untersuchungsstandort spezifischen Temperaturschwellenwert überschreitet (Quelle: Morard, 2011).

## 5.3. Indikatoren für unterkühlte Schutthalden

---

 [geomorphologie-montagne.ch/de/5-3-indikatoren-fuer-unterkuehlte-schutthalden/](http://geomorphologie-montagne.ch/de/5-3-indikatoren-fuer-unterkuehlte-schutthalden/)

Ein sich jahreszeitlich stark unterscheidender Verlauf der Bodentemperaturen zwischen den bergwärts und den talwärts gelegenen Bereichen ist typisch für unterkühlte Schutthalden.

Um das Vorhandensein einer unterkühlten Schutthalde zu erkennen, stützen sich Forscher:innen auf drei Arten von Indikatoren: ein sich stark unterscheidendes Bodenoberflächen-Temperaturregime (in 50 cm Tiefe) zwischen dem oberen und dem unteren Teil der Schutthalde, das Auftreten besonderer visueller Erkennungsmerkmale und das Vorhandensein von Ökosystemen, die für kalte Regionen charakteristisch sind und daher an diesen Standorten eigentlich nicht vorkommen sollten.

Das Temperaturregime einer unterkühlten Schutthalde unterscheidet sich saisonal stark **zwischen ihrem oberen und unteren Teil (Abb. 1).**

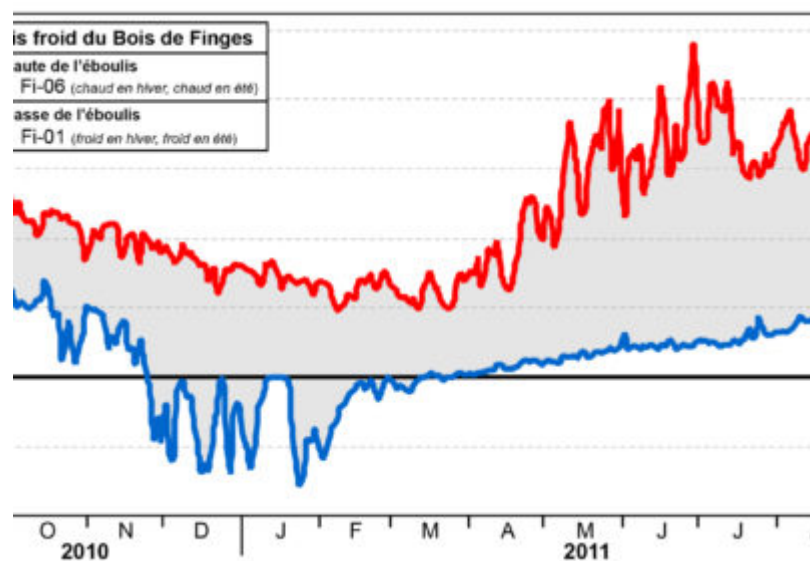
- *Unterer Teil der Schutthalde:* Die Bodentemperaturen sind im Winter kalt und verlaufen mehr oder weniger parallel zur Entwicklung der Aussenlufttemperatur. **Im Sommer hingegen bleiben die Temperaturen kühl und relativ stabil.** Es kann eine negative Temperaturanomalie (Abkühlung) gemessen werden, die 3 bis 7 °C gegenüber der durchschnittlichen jährlichen Lufttemperatur (MAAT) betragen kann.
- *Oberer Teil der Schutthalde:* Im Sommer sind die Bodentemperaturen erhöht und folgen relativ gut dem Temperaturverlauf der Aussenluft. **Im Winter hingegen bleiben die Bodentemperaturen im Allgemeinen im positiven Bereich (Abb. 2),** mit einer abnehmenden Tendenz im Verlauf des Winters. In der Schutthalde nahe des Pfywalds zum Beispiel (Abb. 1) bleibt die Bodentemperatur im oberen Teil während der Winterperiode aussergewöhnlich hoch (+10°C im November und +5°C im März).

Im Laufe der Jahre entwickeln sich zahlreiche visuelle Merkmale, die mit dem sich zwischen dem oberen und unteren Teil einer unterkühlten Schutthalde saisonal stark unterscheidenden Temperaturregime zusammenhängen. Im Sommer ist ein **kühler Luftzug** (unter 5°C) zwischen den Blöcken des unteren Teils der Schutthalde spürbar (Abb. 2). Häufig findet man dort auch **Kongelationseis** oder Schneereste (Abb. 3 & 4). Auch beim Aushub von Material aus einer Schutthalde für den Bau von Strassen wird in der Tiefe häufig Eis gefunden. Zu Beginn des Winters konzentrieren sich die am leichtesten zu beobachtenden visuellen Merkmalen auf den oberen Teil der Schutthalde. Die warme Luft, die aus dem oberen Teil der Schutthalde austritt, schmilzt den Schnee. Von der ersten Herbstkälte bis zum Ende des Winters können an diesen Stellen **apere Flecken** entstehen (Abb. 5).

Im Jura und in den Schweizer Voralpen sind häufig auch **Zwergbaumwälder** anzutreffen, in denen einige Exemplare trotz ihrer geringen Grösse (oft weniger als 1 Meter hoch) ein Alter von 100 Jahren erreichen (Abb. 4 & 6). Schöne Zwergbaumwälder gibt es zum Beispiel bei Dreveneuse d'en Bas (Walliser Chablais), am Creux-du-Van (Neuenburger Jura) oder im Brüeltobel im Appenzeller Alpstein. Letzterer Standort ist auch für seine Sage vom «Hexenwäldli» (Hexenwald) bekannt (Abb. 7).

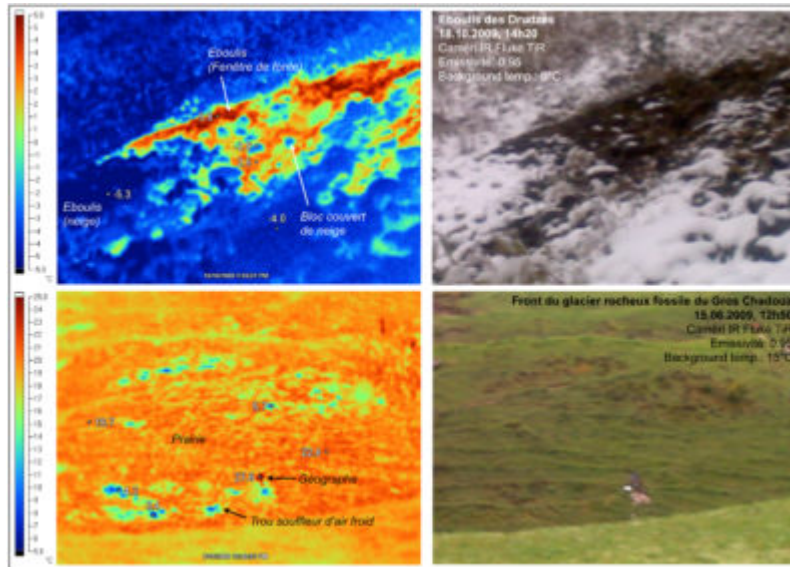
Zahlreiche botanische und ökologische Studien in der Schweiz, in Deutschland und in der Tschechischen Republik haben ausserdem gezeigt, dass die tiefliegenden Bereiche von unterkühlten Schutthalden in niedrigen Höhenlagen von **einer reichen Flora und Fauna bevölkert sind, die eigentlich für kalte Lebensräume in hohen Höhen und Breitengraden typisch ist**. Einige Autoren halten unterkühlte Schutthalden für aussergewöhnliche ökologische Nischen, die seit dem Ende der letzten Eiszeit oder sogar während des gesamten Pleistozäns ein stabiles Mikroklima aufrechterhalten haben könnten.

Die Abbildungen 8 und 9 fassen die thermischen Eigenschaften und die verschiedenen visuellen Merkmale zusammen, die in einem Komplex aus einer unterkühlten Schutthalde und einem fossilen Blockgletscher mit Kamineffekt zu finden sind.



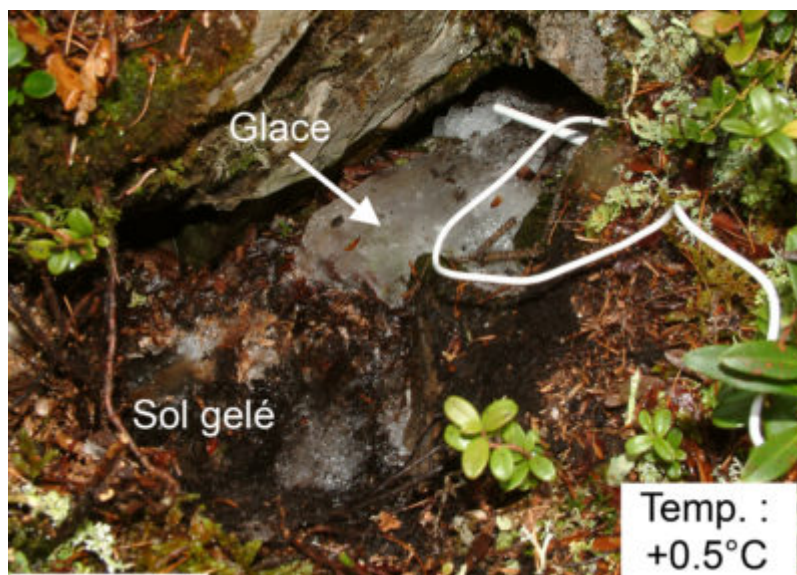
**Fig. 1 – Régime thermique contrasté entre la partie haute et basse d'un éboulis froid ventilé (éboulis de Finges, 800 mètres d'altitude). La température moyenne annuelle de l'air à cet endroit est d'environ +9°C, alors que la température moyenne annuelle du sol dans la partie basse de l'éboulis est de +1°C (anomalie thermique négative de 8°C) (source : Morard 2011).**

Abb.1: Sich stark unterscheidendes Temperaturregime zwischen dem oberen und unteren Teil einer belüfteten unterkühlten Schutthalde (nahe Pfywald, 800 m ü. M.). Die durchschnittliche jährliche Lufttemperatur an dieser Stelle beträgt etwa +9°C, während die durchschnittliche jährliche Bodentemperatur im unteren Teil der Schutthalde bei +1°C liegt (negative Temperaturanomale von 8°C) (Quelle: Morard 2011).



**Fig. 2 – Détermination de zones chaudes en début d’hiver (éboulis des Drudzes) et froides en été (front du glacier rocheux fossile du Gros Chadoua) par imagerie thermique IR (source : Morard 2011).**

Abb.2: Bestimmung von warmen Zonen im Frühwinter (Schutthalden der Drudzes) und kalten Zonen im Sommer (Front des fossilen Blockgletschers Gros Chadoua) durch Infrarot-Wärmebildgebung (Quelle: Morard 2011).



**Fig. 3 – Sol gelé et glace massive à la sortie d’un trou souffleur d’air froid dans le glacier rocheux fossile du Bois des Arlettes (1750 m., région du Col des Mosses, VD).**

Abb.3: Gefrorener Boden und massives Eis am Ausgang eines Kaltluftlochs im fossilen Blockgletscher Bois des Arlettes (1750 m ü. M., Region Col des Mosses, VD).



**Fig. 4 – A gauche : éboulis froid du Chânel Gantrisch (Préalpes fribourgeoises) dont la partie inférieure sur-refroidie est occupée par un groupement d’arbres nains. La forêt climacique est facilement visible en dehors du cône. A droite : épicéa nain avec indication de l’occurrence d’un courant d’air froid et de glace dans l’éboulis de Dreveneuse d’en Bas (Valais) (photos : S. Morard et R. Delaloye).**

Abb.4: Links: Unterkühlte Schutthalde des Chânel Gantrisch Gantrisch (Freiburger Voralpen), deren unterkühlter unterer Teil von einer Gruppe von Zwergbäumen bedeckt ist. Ausserhalb des Kegels ist der Klimaxwald leicht zu erkennen. Rechts: Zwergfichte mit Hinweis auf das Auftreten eines Kaltluftstroms sowie Eis in der Schutthalde von Dreveneuse d’en Bas (Wallis) (Fotos: S. Morard und R. Delaloye).



**Fig. 5 – Fenêtres de fonte de la neige (indices d’expulsion d’air chaud) dans la partie haute des éboulis de la combe de Dreveneuse (Chablais valaisan). A : Dreveneuse d’en Haut, B : Dreveneuse du Milieu, C : Dreveneuse d’en Bas (photos : R. Delaloye, novembre 2004).**

Abb.5: Apere Flecken (Indikatoren für das Ausströmen von warmer Luft) im oberen Teil der Schutthalden der Combe de Dreveneuse (Walliser Chablais). A: Dreveneuse d'en Haut, B: Dreveneuse du Milieu, C: Dreveneuse d'en Bas.



**Fig. 6 – Secteur à épicéas nains dans les éboulis du Creux-du-Van (Jura neuchâtelois).**

Abb.6: Bereich mit Zwergfichten in den Schutthalden des Creux-du-Van (Neuenburger Jura).

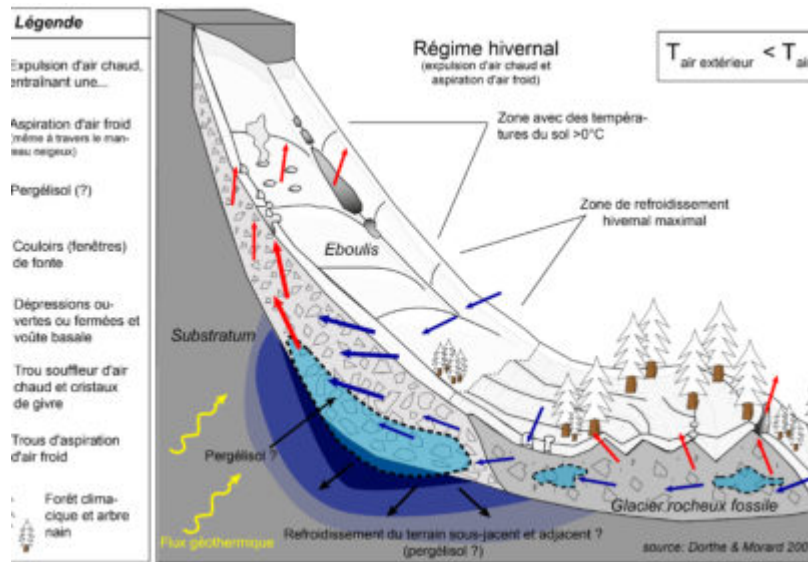
*la grotte s'ouvrait au milieu d'une paroi rocheuse de 80m de haut. L'intérieur de leur royaume étincelait de l'éclat de milles pierres précieuses, d'or et d'argent. Un jour, il se trouva que la reine de nains devait guérir un petit enfant. Ils firent ainsi appel à une « sage femme » du village de Brülisau. Et quelle ne fût pas la joie du couple royal lorsque l'enfant fut à nouveau d'humeur joyeuse ! En remerciement de son aide, les nains offrir à la femme un sac ficelé, avec l'instruction de ne pas l'ouvrir avant d'être rentrée chez elle. Mais la femme était curieuse, et quelle ne fut pas sa déception lorsqu'elle n'y découvrit que des feuilles mortes ! De rage, elle les abandonna sur place, mais quelques unes se glissèrent discrètement dans son tablier. De retour au village, ces dernières s'étaient transformées en pièces d'or. Elle se plaignit de ne pas avoir écouté le conseil des nains et de ne pouvoir jouir allégrement de cet or qui aurait éloigné bien des soucis quotidiens. Elle retourna à l'aplomb de la grotte pour quêmander un nouveau salaire, en vain.*

*Le soir, elle en parla à son mari. Rapidement il réunit une douzaine d'hommes, avec la volonté de se faire justice et s'emparer du trésor des nains, par la force même s'il le fallait. Du haut de la paroi, le roi des nains les avertit que s'ils poursuivaient leur quête, la seule récompense de leur convoitise serait une catastrophe. Mais face à l'or et aux pierres précieuses, les hommes sont cupides et cinq d'entre eux commencèrent à escalader la paroi jusqu'à l'entrée de la grotte. C'est à cet instant, qu'une partie de la montagne volât en éclat, ensevelissant les assaillants, tandis que le reste de la troupe – effrayé – quittait à grandes enjambées les lieux du drame. Le roi des nains venait de lancer une terrible malédiction qui fit également disparaître la forêt alentour. Depuis ce tragique événement, les arbres virent leur croissance entravée et ne retrouvèrent plus jamais leur taille d'antan, ne dépassant plus dès lors la taille d'un petit enfant. Croyant la forêt éternellement à tout jamais, les habitants de la région lui donnèrent le nom de*

**Fig. 7 – Le légende de la “Forêt des Sorcières” du Brüeltobel (traduction libre d'après Baechler 1946).**

Abb.7: Die »Hexenwäldli«-Sage aus dem Brüeltobel (freie Übersetzung nach Baechler 1946).





**Fig. 8 – Modèle de circulation d’air par effet de cheminée dans un complexe éboulis – glacier rocheux fossile en régime hivernal, avec description des indices visuels (source : Dorthe & Morard, 2007).**

Abb.8: Modell der Luftzirkulation durch Kamineffekt in einem fossilen Schutthalden-Blockgletscher-Komplex im Winter, mit Beschreibung der visuellen Merkmale.

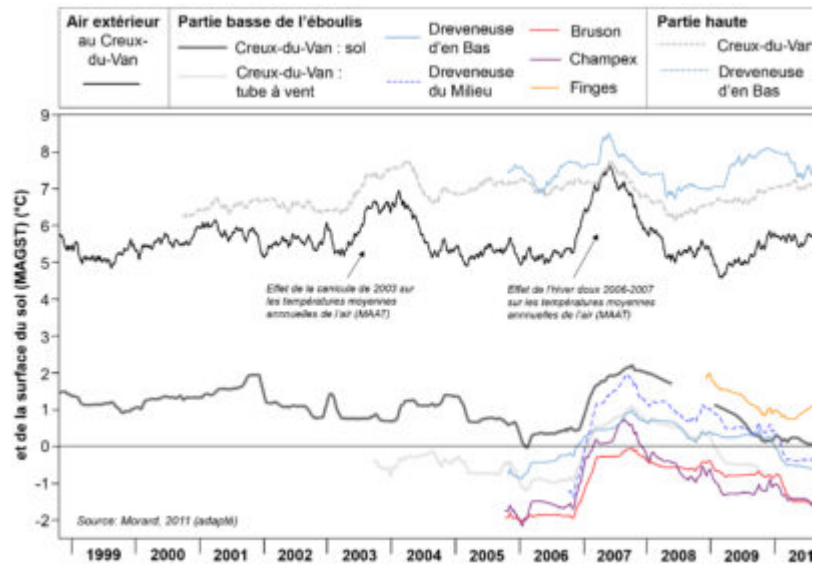
## 5.4. Entwicklung des Temperaturregimes und Auftreten von sporadischem Permafrost

 [geomorphologie-montagne.ch/de/5-4-entwicklung-des-temperaturregimes-und-auftreten-von-sporadischem-permafrost/](http://geomorphologie-montagne.ch/de/5-4-entwicklung-des-temperaturregimes-und-auftreten-von-sporadischem-permafrost/)

Die langfristige Entwicklung des Temperaturregimes in belüfteten, unterkühlten Schutthalden wird im Wesentlichen von der Aussenlufttemperatur während des Winters bestimmt. Unter bestimmten Bedingungen kann sich im Inneren der Schutthalde sporadisch temperierter Permafrost bilden.

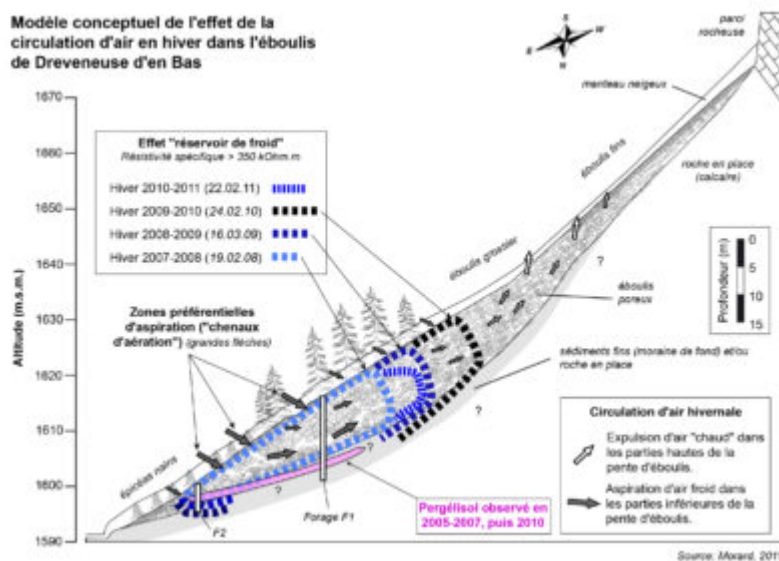
Durch wiederholte Temperaturmessungen nahe der Bodenoberfläche, welche auf verschiedenen unterkühlten Schutthalden durchgeführt wurden – die längste Messreihe am Creux-du-Van begann 1997, konnte einerseits aufgezeigt werden, dass das thermische Regime zwischen den verschiedenen untersuchten Standorten sehr ähnlich ist, und andererseits, dass der **entscheidende Faktor für die Entwicklung dieser Standorte die Aussenlufttemperatur während des Winters** ist. Längere und sehr intensive Kälteperioden im Winter begünstigen die Bildung von Frost bis tief ins Innere der Schutthalde, wie wiederholte Untersuchungen mit elektrischer Widerstandstomographie am Standort Dreveneuse d'en Bas gezeigt haben (siehe Factsheet Permafrost 5.2). Umgekehrt tragen die Aussenlufttemperaturen im Sommer sowie die Höhe der Schneedecke nur sehr wenig zur Entwicklung des Temperaturregimes von belüfteten, unterkühlten Schutthalden bei, im Gegensatz zu den grobblockigen Sedimentformationen in grosser Höhe (siehe Factsheet Permafrost 1.3). So wurde beispielsweise in den unteren Bereichen der unterkühlten Schutthalden in der Westschweiz nach dem Hitzesommer 2003 keine signifikante Erwärmung des Untergrunds beobachtet (Abb. 1). Im Gegensatz dazu erwärmten sich die mittleren jährlichen Bodentemperaturen in den unteren Bereichen der unterkühlten Schutthalden nach dem milden Winter 2006/2007 um mehr als 1°C (Abb. 1).

Am Fuss der Schutthalde von Dreveneuse d'en Bas (Abb. 2) konnte in den Jahren 2004-2006 das Auftreten von geringmächtigem, **temperiertem Permafrost (0°C)** durch Bohrlochmessungen nachgewiesen werden. Ab 2007 taute dieser auf und bildete sich schliesslich ab 2010 infolge der sehr kalten Winter 2009-2010 erneut (Abb. 3). Seit 2013 ist in den Bohrlöchern dieser Schutthalde nur noch saisonaler Frost zu beobachten. Die Dynamik des gefrorenen Bodens in der Schutthalde von Dreveneuse d'en Bas unterscheidet sich somit stark vom Hochgebirgspermafrost. Er kann als «kurzfristiger azonaler Permafrost» (auf Russisch auch «pereletok» genannt) betrachtet werden, dessen Geometrie sich in Abhängigkeit der Aussenlufttemperaturen im Winter von Jahr zu Jahr stark zu verändern scheint.



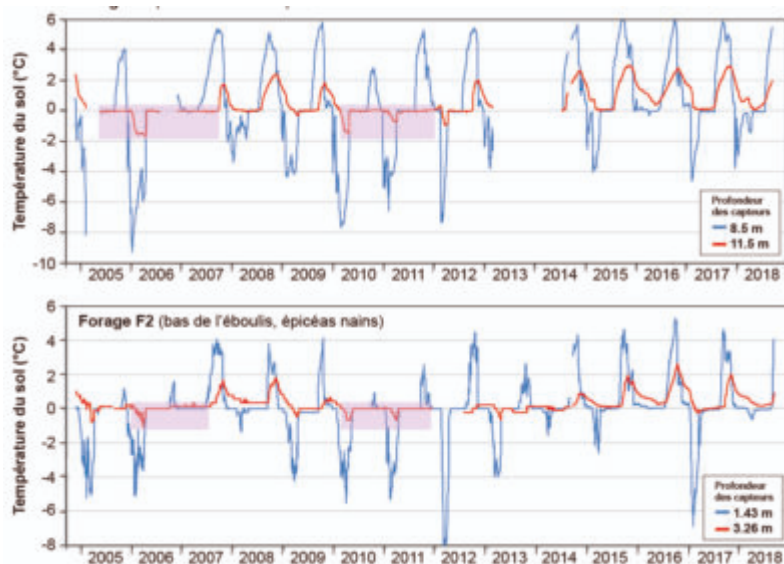
**Fig. 1 – Evolution de la température moyenne annuelle de l’air (MAAT) et de la surface du sol (MAGST) dans différents éboulis de Suisse romande. Noter la baisse relative des températures dans la partie basse de l’éboulis froid du Creux-du-Van durant l’été 2003, ainsi que la hausse généralisée des températures du sol dans les parties basses des éboulis durant l’hiver doux 2006-2007. La température du 1er janvier 2003 correspond à la moyenne entre le 1er janvier 2002 et le 1er janvier 2003 (source : Morard, 2011).**

Abb.1: Entwicklung der mittleren jährlichen Lufttemperatur (MAAT) und der Bodenoberflächentemperatur (MAGST) in verschiedenen Schutthalden der Westschweiz. Beachten Sie den relativen Temperaturrückgang im unteren Teil der unterkühlten Schutthalde Creux-du-Van Van im Sommer 2003 sowie den allgemeinen Anstieg der Bodentemperaturen in den unteren Teilen der Schutthalde im milden Winter 2006-2007. Die Temperatur am 1. Januar 2003 entspricht dem Durchschnitt zwischen dem 1. Januar 2002 und dem 1. Januar 2003.



**Fig. 2 – Modèle de circulation d’air en hiver et de formation d’un réservoir de froid pour l’éboulis de Dreveneuse d’en Bas, basé sur les données thermiques de surface et de forages, et sur la répétition de mesures de tomographie électrique. Durant l’hiver, la zone de forte résistivité électrique grandit en direction de l’amont de l’éboulis, de façon d’autant plus marquée que les températures atmosphériques hivernales sont basses. Cet effet peut s’interpréter comme la taille du réservoir de froid se développant dans l’éboulis (source : Morard 2011).**

Abb.2: Modell der Luftzirkulation im Winter und der Bildung eines Kälteresevoirs für die Schutthalde von Dreveneuse d’en Bas, basierend auf Temperaturmessungen an der Oberfläche und in Bohrlöchern sowie wiederholten Untersuchungen mit elektrischer Widerstandstomographie. Im Winter wächst die Zone mit hohem spezifischem elektrischem Widerstand in Richtung des oberen Teils der Schutthalde, und zwar umso stärker, je niedriger die winterlichen Lufttemperaturen sind. Dieser Effekt kann als Grösse des Kälteresevoirs interpretiert werden, das sich in der Schutthalde entwickelt.



**Fig. 3 – Evolution des températures moyennes journalières du sol mesurées à différentes profondeurs dans les forages F1 et F2 de l’éboulis froid de Dreveneuse d’en Bas. Des conditions de pergélisol tempéré (encadrés roses sur la figure) ont été observées épisodiquement entre 9 et 12 mètres de profondeur au milieu de l’éboulis (forage F1) et entre 2 et 3 mètres de profondeur au bas de l’éboulis (forage F2). Localisation des forages sur la figure précédente. Données actualisées consultables sur le site du groupe de recherche Géomorphologie alpine de l’UNIFr.**

Abb.3: Entwicklung der durchschnittlichen täglichen Bodentemperaturen, gemessen in verschiedenen Tiefen der Bohrlöcher F1 und F2 der unterkühlten Schutthalde von Dreveneuse d’en Bas. Temperierte Permafrostbedingungen (rosa Kästchen in der Abbildung) wurden episodisch in 9 bis 12 Metern Tiefe in der Mitte der Schutthalde (Bohrung F1) und in 2 bis 3 Metern Tiefe am unteren Ende der Schutthalde (Bohrung F2) beobachtet. Lage der Bohrlöcher siehe Abb. 2. Aktualisierte Daten können auf der Website der UNIFRForschungsgruppe für alpine Geomorphologie abgerufen werden.

## 5.5. Höhlengletscher (oder Eishöhlen)

 [geomorphologie-montagne.ch/de/5-5-hoehlengletscher-oder-eishoehlen/](http://geomorphologie-montagne.ch/de/5-5-hoehlengletscher-oder-eishoehlen/)

Höhlengletscher oder Eishöhlen sind Höhlen, die das ganze Jahr über Eis enthalten. Die negative Temperaturanomalie dieser unterirdischen Umgebungen kann durch Kaltluft einschlüsse oder durch eine Luftzirkulation mit Kamineffekt verursacht werden. Das Eisvolumen der Höhlengletscher hat in den letzten Jahrzehnten stark abgenommen.

**Höhlengletscher oder Eishöhlen** liegen an der Schnittstelle zwischen glazialen und periglazialen Prozessbereichen und betreffen Hohlräume, die das ganze Jahr über Eis und/oder Schnee enthalten. Es handelt sich um unterirdische Systeme, die durch eine negative Temperaturanomalie gekennzeichnet sind. In der Schweiz sind sie relativ häufig in Kalksteingebieten anzutreffen. Die Eishöhlen in Höhenlagen um 2.500 m ü. M. liegen innerhalb des Gebiets mit diskontinuierlichem Gebirgspermafrost ([Abb. 1](#)). Die Eishöhlen des Juramassivs und der Voralpen befinden sich hingegen in niedrigeren Höhenlagen, in denen die durchschnittliche jährliche Aussenlufttemperatur ([MAAT](#)) weit über 0 °C liegt.

Klassischerweise unterscheidet man je nach Dynamik der Luftzirkulation zwei Hauptkategorien von Eishöhlen: statische und dynamische Eishöhlen. Das in der Höhle vorhandene Eis kann entweder durch das Wiedergefrieren von Sickerwasser oder durch die Umwandlung von Schnee in Eis entstehen. In der Realität findet man oft gemischte Regime, die komplexer sind als die beiden unten dargestellten Fälle.

- **Statische Eishöhle in einer Kaltluftfalle und/oder Schneefalle:** Hohlräume mit einem oder mehreren Eingängen, die zum Himmel hin offen sind, stellen Kaltluftfallen und/oder Schneefallen dar ([Abb. 2](#)). Diese Art von Eishöhle zeichnet sich durch saisonal unterschiedliche Prozesse aus ([Abb. 3](#)). Im Winter ist das System offen, wobei ein Luftaustausch durch Konvektion stattfindet und kalte Luft in die Höhle eindringt. Je nach Geometrie der Eingänge kann sich auch Schnee in der Höhle ansammeln ([Abb. 4](#)). Im Frühling kann Schmelzwasser bis in die Höhle versickern und dort wieder gefrieren ([Abb. 5](#)). Parallel dazu wird der Schnee, der sich im Winter am Boden der Höhle angesammelt hat, nach und nach zu Eis. Während des Sommers ist das System geschlossen: Die im Winter gespeicherte Kaltluft ist dichter als die Aussenluft. In der Höhle kommt es zu einer thermischen Schichtung und der Bildung einer Kaltlufttasche, die das Abschmelzen des Eises begrenzt ([Abb. 2](#)). Ausserdem bleiben die kalten Temperaturen während des Sommers dank der latenten Wärme (siehe [Factsheet Permafrost 2.1](#)) erhalten, die durch das Schmelzen eines Teils des im Winter gefallenen Schnees entsteht. Im Juramassiv sind statische Eishöhlen wie die von [St-Livres](#) (Waadtländer Jura) und [Monlési](#) (Neuenburger Jura) auch durch den Wald, der fast immer die Umgebung der Höhle bedeckt, vor Sonneneinstrahlung geschützt ([Abb. 6](#)).

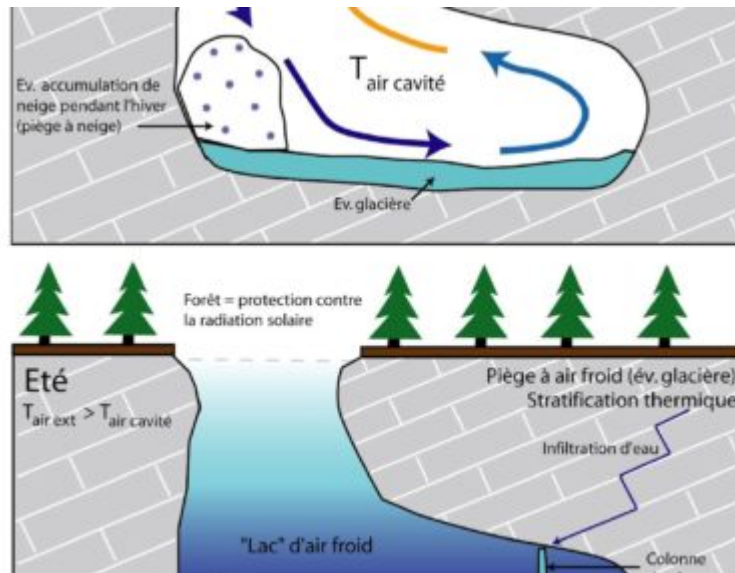
- **Dynamische Eishöhle mit Kamineffekt:** Diese Art von Eishöhle hat mehrere Eingänge auf unterschiedlicher Höhe, die eine Luftzirkulation durch Kamineffekt ermöglichen ([Abb. 7](#)). Im Winter wird aufgrund des Aufsteigens der wärmeren Luft aus der Höhle kalte Luft am unteren Eingang der Höhle angesaugt, wodurch die Höhlenwände abgekühlt werden und ein Kältereservoir entsteht. Im Sommer ist der Prozess umgekehrt und warme Luft wird von den oberen Eingängen angesaugt, da die kalte Luft durch die Schwerkraft ins Innere der Höhle abfließt. Infolgedessen werden in Bezug auf die durchschnittliche jährliche Lufttemperatur (MAAT) zwei Temperaturanomalien (unten kalt, oben warm) beobachtet. Wasser, das durch die Risse im Gestein sickert, kann gefrieren, wenn es in den unterkühlten unteren Teil der Höhle gelangt. In der Schweiz fällt z. B. der Bereich nahe dem unteren Eingang des Gouffre des Diablotins (Freiburger Voralpen) in die Kategorie einer Eishöhle des dynamischen Typs ([Abb. 8](#)).

Auch wenn jede Eishöhle ihr eigenes thermisches und hydrologisches Verhalten hat, zeigt die Untersuchung mehrerer Eishöhlen in der Schweiz und in Europa eine klare Tendenz zu einer mehr oder weniger kontinuierlichen Abnahme des Eisvolumens während der letzten Jahrzehnte ([Abb. 9](#)). Diese Entwicklung hängt grösstenteils mit den **beobachteten Veränderungen während der Wintersaison** zusammen. So wirken sich mildere und schneeärmere Winter besonders auf die Eishöhlen in niedrigen und mittleren Höhenlagen aus. Auch die industrielle Nutzung des Eises einiger Eishöhlen hat zum Rückgang des Eisvolumens beigetragen.



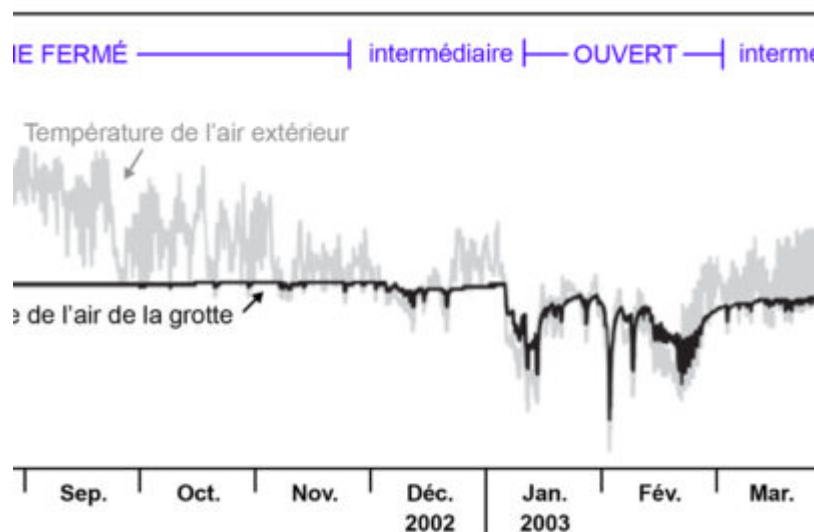
**Fig. 1 – Secteur englacé à l’intérieur du système de grottes karstiques du Lapi du Bou (région du Sanetsch). Située vers 2’500 mètres d’altitude, cette glacière se trouve à l’intérieur de la ceinture alpine du pergélisol discontinu.**

Abb.1: Gefrorener Bereich innerhalb des Karsthöhlensystems des Lapi du Bou (Sanetschgebiet). Die Eishöhle liegt auf einer Höhe von 2.500 m ü. M. innerhalb des Bereichs mit diskontinuierlichem Gebirgspermafrost.



**Fig. 2 – Glacière statique : modèle simplifiée d'un piège à neige et/ou à air froid dans des puits karstiques (adapté de Lismonde, 2002 & Luetscher, 2005).**

Abb.2: Statische Eishöhle: Vereinfachtes Modell einer Schnee- und/oder Kaltluftfalle in Karstschächten (angepasst nach Lismonde, 2002 & Luetscher, 2005).



**Fig. 3 – Evolution annuelle des températures de l'air à la Glacière de Monlési. Durant la saison hivernale, une bonne corrélation est observée entre la température de l'air dans la grotte et la température de l'air extérieur. Durant l'été, les températures très stables et proches de 0 °C sont attribuables au changement de phase de la glace (en l'occurrence de la fonte) (source : Luetscher & Jeannin, 2004).**

Abb.3: Jährliche Entwicklung der Lufttemperaturen in der Eishöhle von Monlési. Während der Wintersaison ist eine gute Korrelation zwischen der Lufttemperatur in der Höhle und der Temperatur der Aussenluft zu beobachten. Während des Sommers sind die sehr stabilen Temperaturen nahe 0 °C auf den Phasenwechsel des Eises (in diesem Fall Schmelzen) zurückzuführen (Quelle: Luetscher & Jeannin, 2004).



**Fig. 4 – Puits d’entrée de la glacière de St-Livres (Jura vaudois).**

---

Abb.4: Eingangsschacht der Eishöhle von St-Livres (Waadtländer Jura).



**Fig. 5 – Stalagmites de glace en forme de bambou dans la glacière de Monlési (Jura neuchâtelois). Cette grotte glacée contient le volume de glace le plus important de tout le Jura : environ 6’000 m<sup>3</sup>.**

---

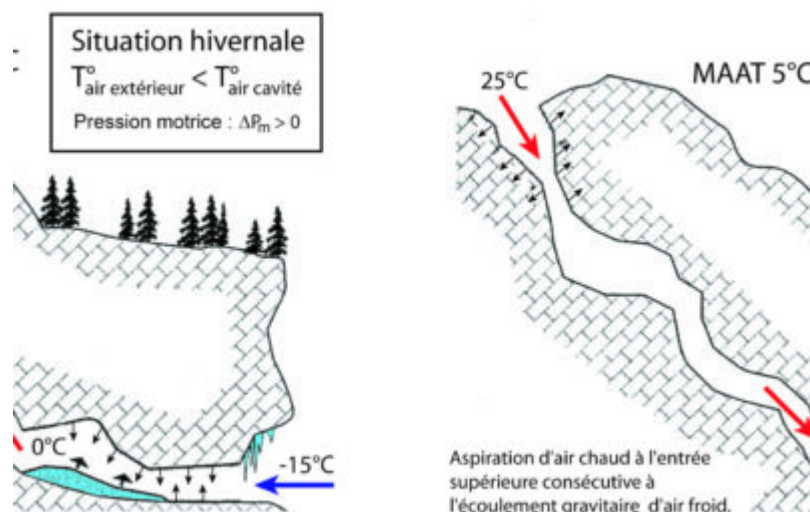
Abb.5: Bambusförmige Eisstalagmiten in der Eishöhle von Monlési (Neuenburger Jura). Diese Eishöhle enthält das grösste Eisvolumen im gesamten Jura: ca. 6000 m<sup>3</sup>.





**Fig. 6 – La glacière de St-Livres (Jura vaudois) est une doline effondrée dans laquelle s’est accumulé un volume de glace de 1200 m<sup>3</sup> pendant les siècles passés. Les premiers analyses des cernes et des datations 14C du bois fossile incrusté dans la masse de glace indiquent un âge des couches compris entre 50 et plus que 1200 ans BP (before present = avant 1950).**

Abb.6: Die Eishöhle von St-Livres(Waadtländer Jura) ist eine eingestürzte Doline, in der sich in den vergangenen Jahrhunderten ein Eisvolumen von 1200 m<sup>3</sup> angesammelt hat. Erste Analysen der Baumringe und 14C-Datierungen des in der Eismasse enthaltenen fossilen Holzes deuten auf ein Alter der Schichten zwischen 50 und mehr als 1200 Jahren BP (before present = vor 1950) hin.



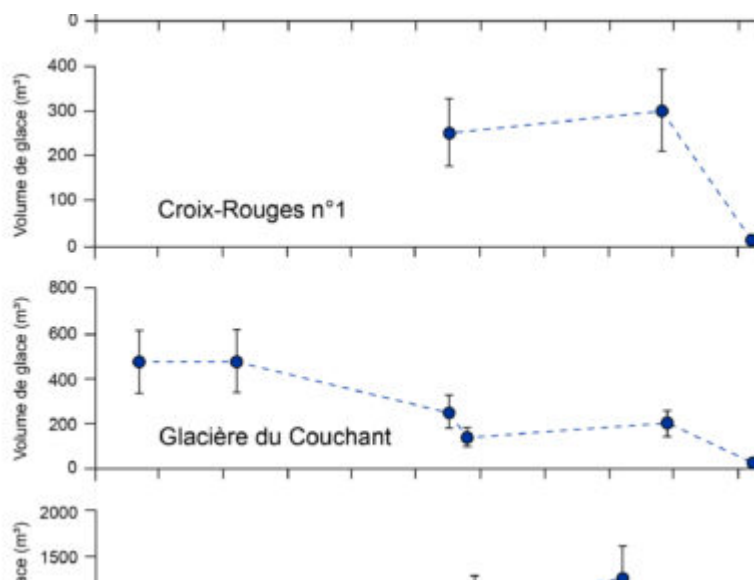
**Fig. 7 – Glacière de type dynamique. Le refroidissement est dû à une circulation d’air dans des conduits karstiques à deux entrées (tube à vent, effet de cheminée) (adapté de Luetscher, 2005).**

Abb.7: Dynamische Eishöhle. Die Abkühlung wird durch eine Luftzirkulation in Karsthöhlensystemen mit (mind.) zwei Eingängen (Windrohre, Kamineffekt) verursacht (angepasst nach Luetscher, 2005).



**Figure 8 – La salle de la cheminée dans la glacière dynamique des Diablotins en octobre 2009. Ce secteur se caractérise notamment par un plafond de glace et de nombreuses stalactites de glace.**

Abb.8: Der “Kaminraum” in der dynamischen Eishöhle der Diablotins im Oktober 2009. Dieser Bereich zeichnet sich vor allem durch eine Eisdecke und zahlreiche Eisstalaktiten aus.



**Fig. 9 – Reconstruction des fluctuations des volumes de glace dans différentes glacières de la chaîne du Jura. Toutes les glacières ont enregistrées une forte diminution de leur volume de glace depuis les années 1990. Les barres d’erreur reflètent l’incertitude (env. 30%) attribuée aux mesures et aux variations saisonnières du volume de glace (source : Luetscher et al. 2005).**

Abb.9: Rekonstruktion der Schwankungen des Eisvolumens in verschiedenen Eishöhlen der Jurakette. Alle Eishöhlen haben seit den 1990er Jahren einen starken Rückgang des Eisvolumens verzeichnet. Die Fehlerbalken spiegeln die Unsicherheit (ca. 30%) wider, die den Messungen und den saisonalen Schwankungen des Eisvolumens zugrunde liegen (Quelle: Luetscher et al. 2005).