

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

 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 Bénédict 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 Bénédict 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 **führten 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.



Abb. 1: Die Talmulde von Dreveneuse (VS)

Die Talmulde von [Dreveneuse](#) (Walliser Chablais) mit ihren imposanten Schutthalden.



Abb. 2: Der fossile Blockgletscher von Gros Chadoua (FR)

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.



Abb. 3: Milkeller von Seelisberg (UR)

Milchkeller 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 Milchkeller einst an dieser Stelle gebaut wurden.



Abb. 4: Der Käsekeller von Rif Bruyant (FR)

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.

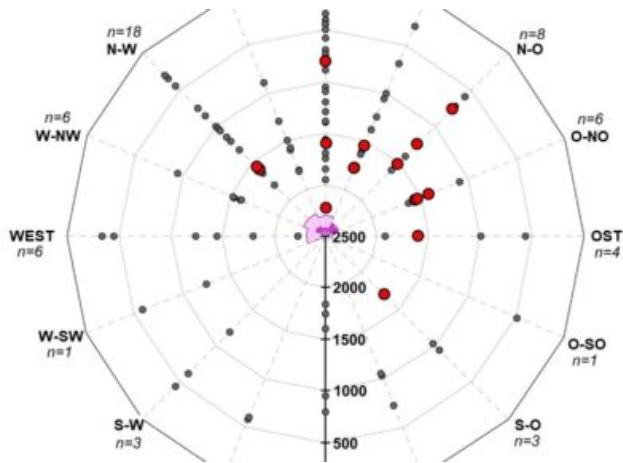


Abb. 5: Verteilung von unterkühlten Schutthalden

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

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.

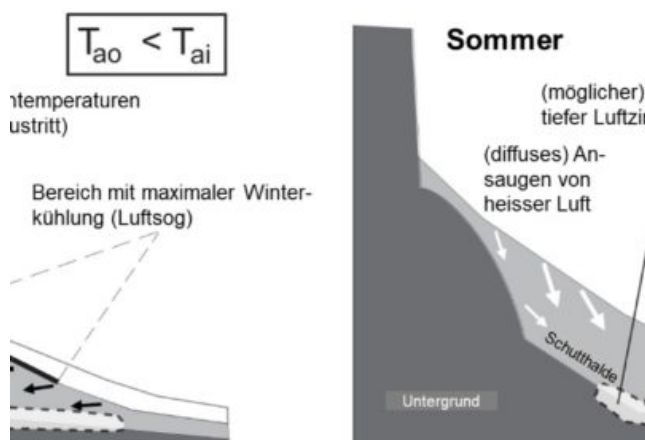


Abb. 1: Prozess der Luftzirkulation durch den Kamineffekt

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 Kältesektoren. Tao = Aussenlufttemperatur; Tai = Durchschnittstemperatur der Schutthalde (Quelle: Delaloye, 2004).

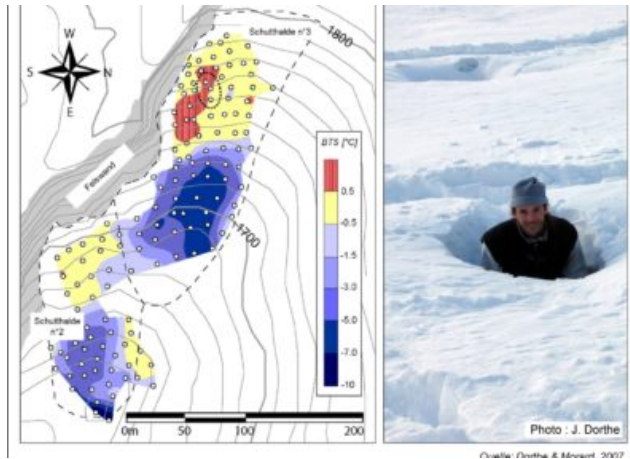


Abb. 2: Kriging-Interpolation von BTS-Messungen in Schutthalden

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 belüftetes System im Winterregime.

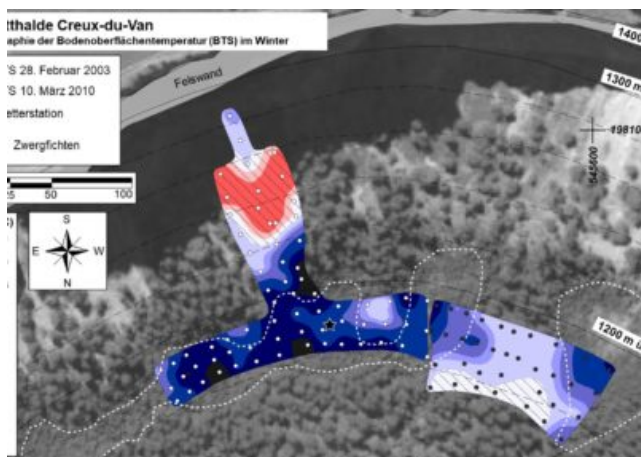


Abb. 3: Karte der Bodenoberflächentemperaturen im Winter (BTS) auf Schutthalden

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).

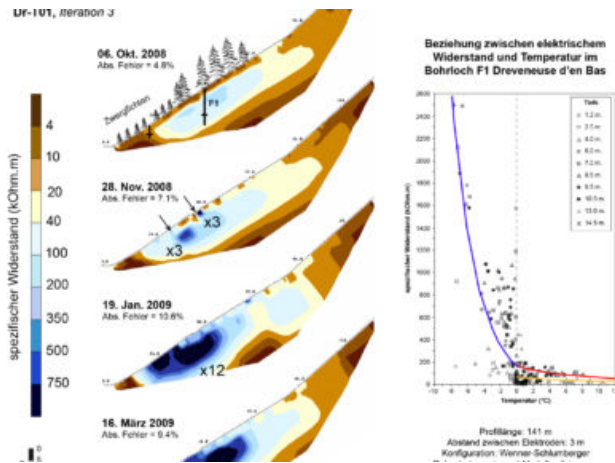


Abb. 4: Monitoring der elektrischen Widerstände in einer unterkühlten Schutthalde

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).

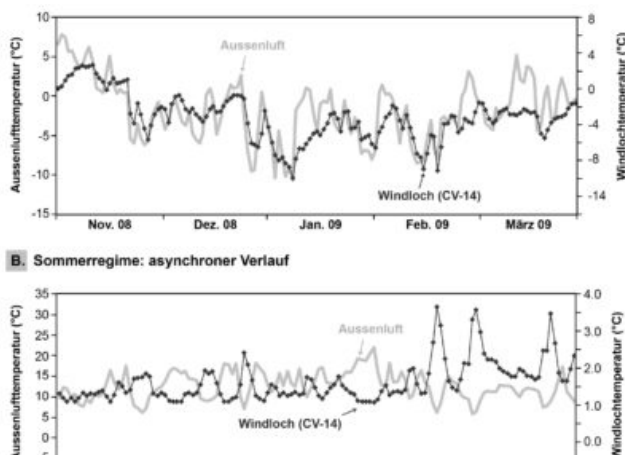


Abb. 5: Entwicklung der Temperatur der Aussenluft und des Windlochs des Creux-du-Van (NE)

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).

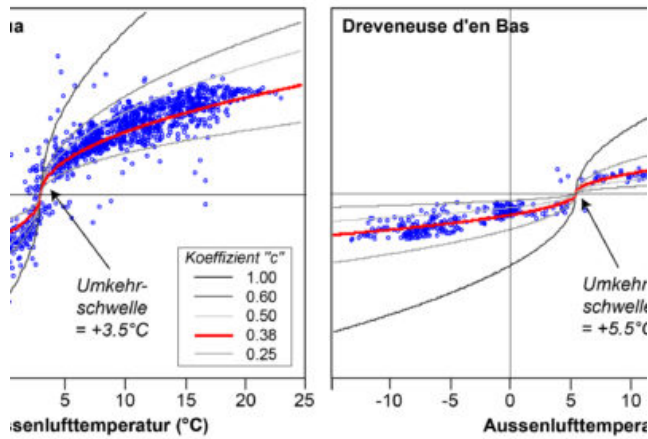


Abb. 6: Beziehung zwischen der Temperatur der Aussenluft und der Geschwindigkeit und Richtung des Luftstroms

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 Dreveneused'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

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 Pfynwalds 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.

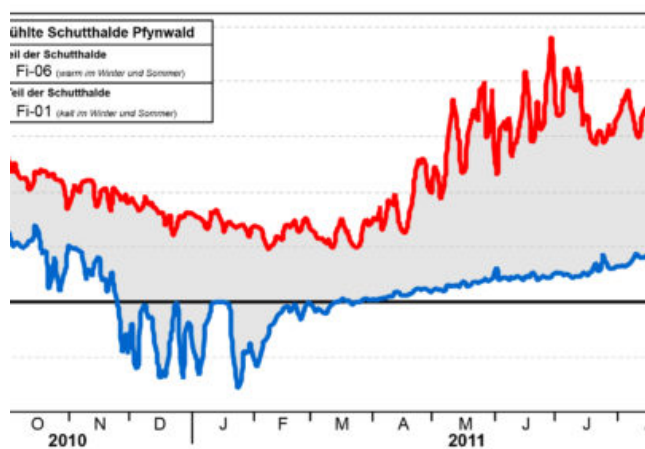


Abb. 1: Temperaturregime in einer belüfteten unterkühlten Schutthalde

Sich stark unterscheidendes Temperaturregime zwischen dem oberen und unteren Teil einer belüfteten unterkühlten Schutthalde (nahe Pfyngwald, 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 Temperaturanomalie von 8°C) (Quelle: Morard, 2011).

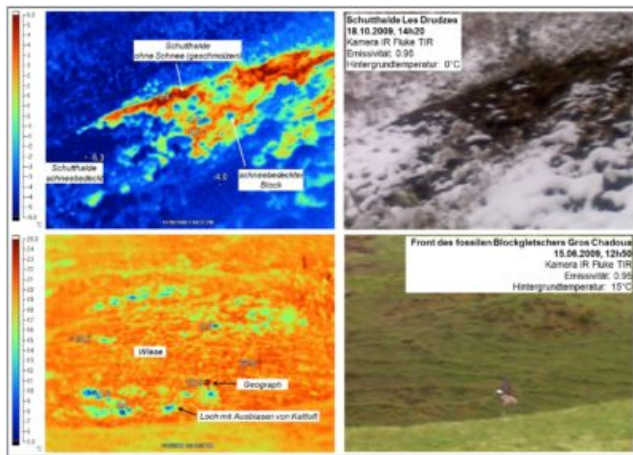


Abb. 2: Bestimmung von warmen Zonen im Frühwinter

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).



Abb. 3: Gefrorener Boden und massives Eis am Ausgang eines Kaltluftlochs

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



Abb. 4: Schutthalden und Luftzirkulation

Links: Unterkühlte Schutthalde des [Chânel 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).



Abb. 5: Apere Flecken im oberen Teil von Schutthalden

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.



Abb. 6: Zwergfichten

Bereich mit Zwergfichten in den Schutthalden des [Creux-du-Van](#) (Neuenburger Jura).

der mitten unter so in ihren Tüchern schlief. Das kleine Kind schrie immer im Glanz von tausend Edelsteinen, Gold und Silber. Eines Tages kam es vor, dass die Zwergenkönigin ein kleines Kind heilen sollte. So wandten sie sich an eine weise Frau aus dem Dorf Brülisau. Und wie groß war die Freude des Königspaares, als das Kind wieder in fröhlicher Stimmung war! Als Dank für ihre Hilfe schenkten die Zwerge der Frau einen verschürzten Sack mit der Anweisung, ihn nicht zu öffnen, bis sie wieder zu Hause sei. Doch die Frau war neugierig, und wie enttäuscht war sie, als sie nur tote Blätter darin fand! Vor Wut ließ sie sie liegen, aber ein paar schlüpfen sich in ihre Schürze. Als sie ins Dorf zurückkehrte, hatten sich die Blätter in Goldmünzen verwandelt. Sie beklagte sich, dass sie nicht auf den Rat der Zwerge gehört hatte und dass sie sich nicht an dem Gold erfreuen konnte, das ihr viele Alltagsorgen abgenommen hätte. Sie kehrte zur Höhle zurück, um um neuen Lohn zu betteln, aber es gelang ihr nicht. Am Abend erzählte sie ihrem Mann davon. Schnell versammelte er ein Dutzend Männer um sich, mit dem Vorsatz, Gerechtigkeit zu üben und den Schatz der Zwerge zu erbeuten, notfalls auch mit Gewalt. Der Zwergenkönig warnte sie von der Felswand aus, dass der einzige Lohn für ihre Gier eine Katastrophe sein würde, wenn sie ihre Suche fortsetzten. Doch angesichts von Gold und Edelsteinen sind die Menschen gierig, und so begannen fünf von ihnen, die Wand bis zum Eingang der Höhle zu erklimmen. In diesem Moment zersplitterte ein Teil des Berges und begrub die Angreifer unter sich, während der Rest der Truppe erschrocken davonlief. Der Zwergenkönig hatte einen schrecklichen Fluch ausgesprochen, der auch den umliegenden Wald verschwinden ließ. Seit diesem tragischen Ereignis waren die Räume in ihrem Wachstum ruhmlos. Die Finnhäuser nahten, dass der Wald

Abb. 7: Die »Hexenwäldli«-Sage aus dem Brüeltobel

Die »Hexenwäldli«-Sage aus dem [Brüeltobel](#) (freie Übersetzung nach Baechler, 1946).

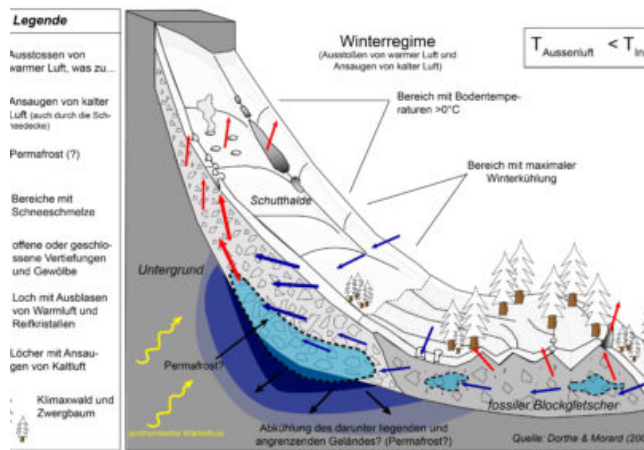


Abb. 8: Luftzirkulation durch Kamineffekt in einem fossilen Schutthalden-Blockgletscher-Komplex

Modell der Luftzirkulation durch Kamineffekt in einem fossilen Schutthalden-Blockgletscher-Komplex im Winter, mit Beschreibung der sichtbaren Merkmale.

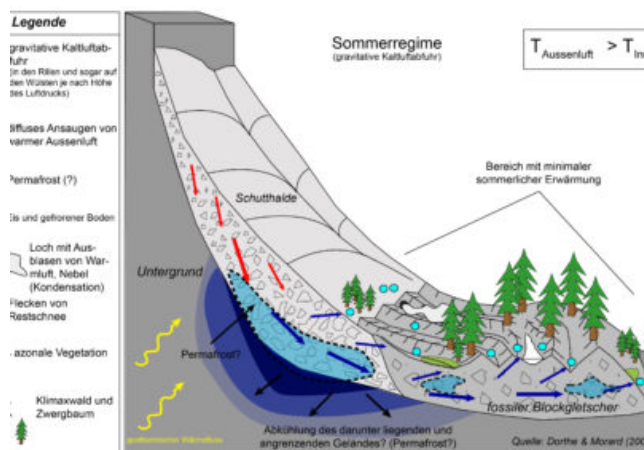


Abb. 9: Modell der Luftzirkulation durch Kamineffekt in einem fossilen Schutthalden-Blockgletscher-Komplex im Sommer

Modell der Luftzirkulation durch Kamineffekt in einem fossilen Schutthalden-Blockgletscher-Komplex im Sommer, mit Beschreibung der sichtbaren 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

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 Bodenflächentemperaturen 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.

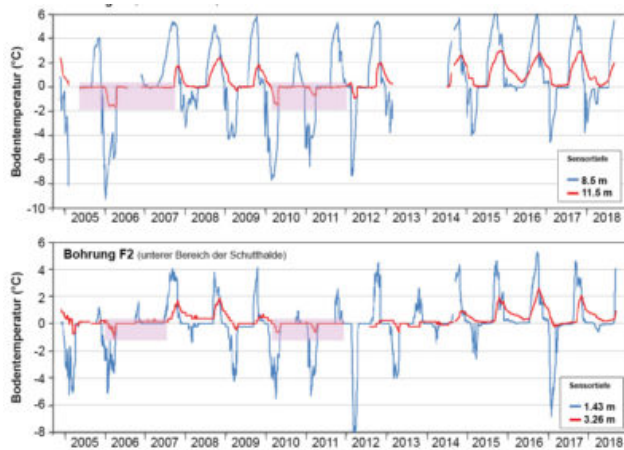


Abb. 3: Entwicklung der durchschnittlichen täglichen Bodentemperaturen in einer Schutthalde

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 UNIFR Forschungsgruppe für alpine Geomorphologie abgerufen werden.](#)

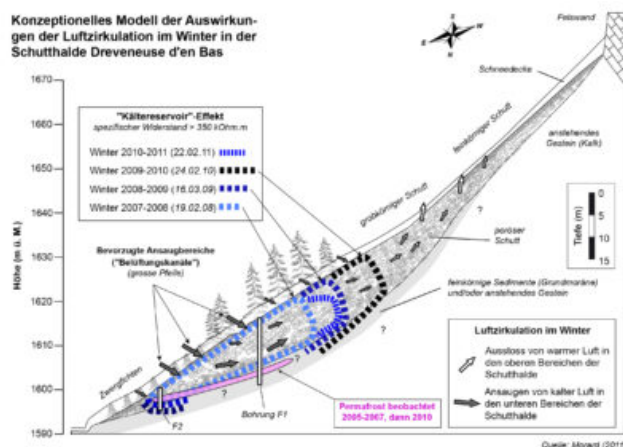


Abb. 2: Luftzirkulation in einer Schutthalde

Modell der Luftzirkulation im Winter und der Bildung eines Kältereservoirs 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 Kältereservoirs interpretiert werden, das sich in der Schutthalde entwickelt.

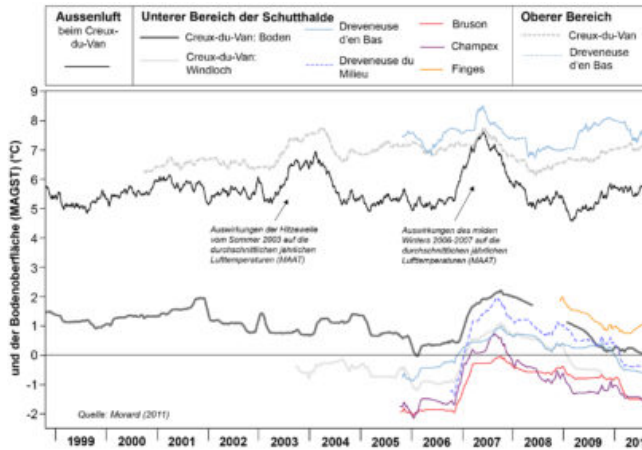


Abb. 1: Entwicklung der mittleren jährlichen Lufttemperatur (MAAT) und der Bodenoberflächentemperatur in Schutthalden

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](#) 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.