

# Bodentemperaturen im Gebirge – eine Analyse ausgewählter Standorte mit praktischen Hinweisen für die Arbeit mit Ankermörtel

## Originalartikel

Gian Cla Feuerstein <sup>1</sup> (gian.cla.feuerstein@awn.gr.ch)

Anita Zuidema <sup>1</sup> (anita.zuidema@awn.gr.ch)

<sup>1</sup> Amt für Wald und Naturgefahren, Graubünden

## Zusammenfassung

In welchem Zeitraum und auf welcher Meereshöhe entsprechen die Bodentemperaturen in einer Tiefe von bis zu 10 m den Vorgaben der Ankermörtelproduzenten für die Vermörtelung von Ankern beim Lawinen- und Steinschlagverbau? Wann erreichen die Bodentemperaturen in verschiedenen Höhenlagen die geforderten 5°C, falls sie es überhaupt tun, und wie ist deren Verlauf im Jahresturnus? Diese Fragen lassen sich mit der vorhandenen Literatur bestenfalls andeutungsweise beantworten. Ein schlüssiges und praxistaugliches Fazit lässt sich aber nicht herleiten, weshalb das Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden (AWN GR) dazu ein eigenes einfaches Messnetzwerk aufgebaut hat. An insgesamt vier Standorten wurden die Bodentemperaturen ganzjährig in verschiedenen Tiefen kontinuierlich gemessen. Zwecks Erweiterung der Datengrundlagen wurden zusätzlich zu den eigenen Messdaten Bodentemperaturdaten ausserhalb des Permafrostgebietes des WSL-Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) ausgewertet.

Die Auswertungen bestätigen den bereits bekannten typischen Jahresgang der Bodentemperatur. Die Ausschläge der sinusähnlichen Kurven nehmen dabei wie erwartet mit zunehmender Bodentiefe ab respektive die Kurven werden flacher. Die Temperaturverläufe zeigen zudem mit zunehmender Bodentiefe einen bis zu ca. viermonatigen Zeitversatz zwischen dem Maximum der Lufttemperatur im Sommer und dem Maximum der Bodentemperatur im Herbst oder gar im Winter. Weiter bestätigen die Untersuchungen die Annahme, dass die Bodentemperaturen in Tiefen von bis zu 5 m mit zunehmender Meereshöhe abnehmen.

Die Auswertungen lassen sich im Sinne von **Hinweisen für die Praxis** wie folgt zusammenfassen:

- Im Lockergestein kann von einem Temperaturgradienten von knapp 2 bis 3°C pro 1000 Höhenmeter ausgegangen werden.
- Bis in Höhenlagen von rund 1000 m ü. M. können Anker bis in 5 m Tiefe typischerweise von Ende Mai bis Ende Dezember problemlos vermörtelt werden. Dieser Zeitraum dürfte bis in eine Höhenlage von maximal 1500 m ü. M. Gültigkeit haben.
- Von einer Höhenlage von 1500 bis rund 2000 m ü. M. bleiben die Bodentemperaturen bis in 5 m Tiefe deutlich länger unter 5°C und die Dauer günstiger Bodentemperaturen nimmt um bis zu 21 Wochen ab.
- In Höhenlagen von rund 2000 bis 2500 m ü. M. sind die Bodentemperaturen markant tiefer und der Zeitraum mit Bodentemperaturen um 5°C bis in eine Tiefe von 5 m ist typischerweise auf die Monate September bis November beschränkt. Deshalb wird empfohlen in diesen Höhenlagen die Vermörtelungsarbeiten sorgfältig zu planen und lokale Messungen der Bodentemperaturen durchzuführen. Gegebenenfalls muss beispielsweise das Anmachwasser in den Monaten Juni bis August vorgewärmt werden.

- Für Bauten über 2500 m ü. M. empfiehlt es sich generell, Spezial-Ankermörtel für die Anwendung im Permafrost einzusetzen, denn die Bodentemperaturen bis in 5 m Tiefe bleiben praktisch ganzjährig deutlich unter 5°C.

## Ausgangslage

Mit der in den 1980er-Jahren erfolgten technischen Weiterentwicklung der bis dahin klassischen Schwergewichts- und Grundplattenfundationen hin zur filigranen Ankerfundation von Schutzbauten ergeben sich neue Fragestellungen, insbesondere im Zusammenhang mit dem Einbringen des chemisch kompliziert zusammengesetzten und vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) typengeprüften Ankermörtels. Nahezu jeder Ankermörtelhersteller weist dabei daraufhin, dass die Bodentemperatur während der Verarbeitungs- und Trocknungsphase nicht weniger als 5°C betragen darf, um den Abbindeprozess und damit die Festigkeitsentwicklung sicherzustellen. Wird Ankermörtel bei zu tiefen Bodentemperaturen eingebracht, entsteht kein tragfähiger Mörtelkörper und der Tragwiderstand der Anker ist ungenügend. Auch die SIA-Norm 262 sowie die europäische DIN EN Norm 13670 (jeweils Angaben für Frischbeton, sinngemässe Anwendung für Ankermörtel im vorliegenden Fall) geben dieselben Werte an. Laborversuche der EMPA haben allerdings gezeigt, dass normaler typengeprüfter Ankermörtel bei Bodentemperaturen von bis zu -2°C genügend hohe Druckfestigkeiten entwickelt, sofern die Frischmörteltemperatur mindestens 20°C beträgt (vgl. Moser, 1999). Speziell für die Anwendung im Permafrost entwickelte Ankermörtel können bei Bodentemperaturen von bis zu -4°C abbinden (Margreth, 2007).

Die Bausaison im Gebirge ist kurz. Mancher Projekt- und Bauleiter fragt sich deshalb, ob der Boden auf einer bestimmten Höhenlage bereits im Juni bis in 5 m Tiefe genügend warm ist, damit normaler Ankermörtel ohne Erwärmung des Zugabewassers die geforderte Festigkeit erreicht. Dies ist eine, wie sich zeigen wird, durchaus berechtigte Frage, auch wenn die Lufttemperaturen im Juni sommerlich erscheinen mögen.

Im Zusammenhang mit dem Waldwachstum wurden in der Vergangenheit etliche Forschungsarbeiten zur Bodentemperatur durchgeführt. Allerdings wurden die Temperaturen des Bodens jeweils entweder an der Bodenoberfläche unmittelbar unterhalb der organischen Streuschicht oder in wenigen Dezimetern unterhalb des Bodenhorizonts gemessen, da dies relativ einfach möglich ist (vgl. Aulitzky & Turner, 1980; Grüll & Kvet, 1976; Pflume, 1997; Schaumberger et al., 2013; Turner et al., 1975). Wahrscheinlich weil die Bodentemperaturen in grösseren Tiefen von 1 bis 10 m nur mit aufwändigen Bohrungen erfasst werden können, liegen nur relativ wenige Untersuchungen dazu vor. Eine Ausnahme stellen die Messungen in Bohrlöchern dar, welche für die Erforschung des Permafrostes vorgenommen wurden (vgl. Bommer et al., 2009; Schrott et al., 2012). Das Interesse im Rahmen dieser Forschungsarbeiten fokussierte sich dabei auf den damals unbekanntem Wärmehaushalt dieser dauernd gefrorenen Böden sowie auf die Rahmenbedingungen beim Bauen in oder auf dauernd gefrorenem Boden (Bommer et al., 2009). Der Wärmehaushalt in Permafrostböden ist jedoch nicht direkt mit nicht gefrorenen Böden vergleichbar, zumindest nicht in Böden mit eisreichem Permafrost.

Um diese Wissenslücke ansatzweise zu schliessen, hat die Region Südbünden des Amts für Wald und Naturgefahren Graubünden (AWN GR) seit 2013 ein Messnetz von Temperaturloggern in jeweils drei verschiedenen Bodentiefen aufgebaut. Das Bodentemperaturmessnetz umfasst vier Standorte, die alle deutlich ausserhalb des Permafrostverbreitungsgebiets liegen, wobei die Temperaturen in den Bohrlöchern das ganze Jahr über automatisch gemessen werden. Die Messung der Bodentemperaturen dient dem vertieften Verständnis der Wärmeverhältnisse im Boden, insbesondere im Zusammenhang mit Vermörtelungsarbeiten für Verankerungen von Lawinen- und Steinschlagverbauungen. Die Erfahrungen aufgrund punktueller, manueller Temperaturmessungen in Bohrlöchern zeigen, dass insbesondere im Hochgebirge die Temperaturschwelle von 5°C nur während sehr kurzer Zeit im Jahr oder überhaupt kaum erreicht werden kann (vgl. Abbildungen 1 und 2).



Abbildung 1: Punktueller Handmessung der Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen mit erfüllten Temperaturbedingungen ( $>5^{\circ}\text{C}$ ) (Quelle: G. C. Feuerstein, 2018).



Abbildung 2: Gebirgsbaustelle oberhalb von Zuoz in der Lawinenverbauung Albanas. Mit dem Bohrgerät werden Bohrlöcher mit einer Länge von bis zu 8 m und einem Durchmesser von rund 105 mm abgeteuft. Die erforderliche Bohrlänge hängt von der Tragfähigkeit des Bodens ab und wird objektspezifisch mit Versuchen ermittelt (Quelle: G. C. Feuerstein, 2017).

Nebst den eigenen Messdaten standen zusätzlich Temperaturdaten aus Bohrlöchern des WSL-Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) zur Verfügung. Die Messungen an den SLF-Messstationen sind Teil des Schweizerischen Permafrost-Überwachungs-Netzwerks (Swiss Permafrost Monitoring Network, PERMOS). Die für die vorliegende Arbeit ausgewählten Messstandorte liegen allerdings ausserhalb des Permafrostgebiets. Damit konnte die Datenbasis relevant erweitert werden.

Das Ziel der Datenanalyse war, die gemessenen Bodentemperatur-Werte und deren Verläufe darzustellen und allfällige Zusammenhänge zwischen der Lufttemperatur, den Standortbedingungen und der Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen zu finden. Mit diesen Grundlagen wurde versucht, je nach Höhenlage Faustregeln herzuleiten, um Zeitperioden mit einer Bodentemperatur von mehr als  $5^{\circ}\text{C}$  abschätzen zu können. Dadurch kann einerseits die Qualität der Vermörtelungsarbeit erhöht und andererseits der Bauvorgang vereinfacht werden, indem auf das aufwendige Erwärmen des Anmachwassers respektive auf die vielfach durchgeführten Temperaturmessungen vor Ort (vgl. Abbildung 1) verzichtet werden kann. Wird der Bodentemperatur bei den Vermörtelungsarbeiten keine Beachtung geschenkt, kann der Abbindeprozess des Anker Mörtels im schlimmsten Fall nicht starten. Anstelle eines tragfähigen Anker Mörtels bildet sich im Bohrloch nasser, zementangereicherter Sand mit einer absolut ungenügenden Tragfähigkeit. Dies führt zu einem totalen Versagen der Verankerung. Die Funktionstauglichkeit der Schutzbaute ist nicht erfüllt, die Folgekosten sind sehr hoch und die Projektlaufzeit muss erweitert werden, damit die Verankerungen neu erstellt werden können. Die Bodentemperaturen bei Vermörtelungsarbeiten sind für die Qualitätssicherung der Ankerfundation deshalb ein relevantes Kriterium. Auch wenn Moser (1999) darlegte, dass gewöhnlicher Anker Mörtel mit Umgebungstemperaturen von bis  $-2^{\circ}\text{C}$  in Versuchen der EMPA abzubinden vermochte, sollte dieser Wert mit grosser Vorsicht betrachtet und bestimmt nicht ausgereizt werden. Ob dieses Resultat für die heute verwendeten Anker Mörtel immer noch gilt, ist nicht bekannt. Es wird daher empfohlen, diesen Punkt allenfalls zwischen Projekt- und Bauleitung sowie Mörtelhersteller zu klären. Eigene Erfahrungen haben gezeigt, dass nur knapp gefrorener Boden, also mit Bodentemperaturen höher als  $-2^{\circ}\text{C}$ , in einem konkreten Fall den Abbindeprozess vollumfänglich verunmöglichte.

## Methodik

Die Messungen der Bodentemperaturen an den vier nachfolgenden AWN-Messstandorten erfolgten mit Hilfe der Temperaturlogger UTL-3 der Firma GEOTEST AG (vgl. Abbildung 3 a). Dabei wird eine stündliche Messung der Temperatur in Bodentiefen ab Oberkante (OK) Terrain von 2 m, 3.5 m sowie 5 m vorgenommen. Die Messungen erfolgen in einem Bohrloch mit einem Durchmesser von mindestens 90 mm, welches in den meisten Fällen mit einem Kunststoffinnenrohr inklusive Deckel ausgekleidet ist (vgl. Abbildung 3 b). Das Bohrloch ist zwischen 15° ab der Horizontalen und 90° zum Hang geneigt, damit die Logger bei der Installation problemlos in die Bohrlöcher gleiten (vgl. Abbildung 3 c).

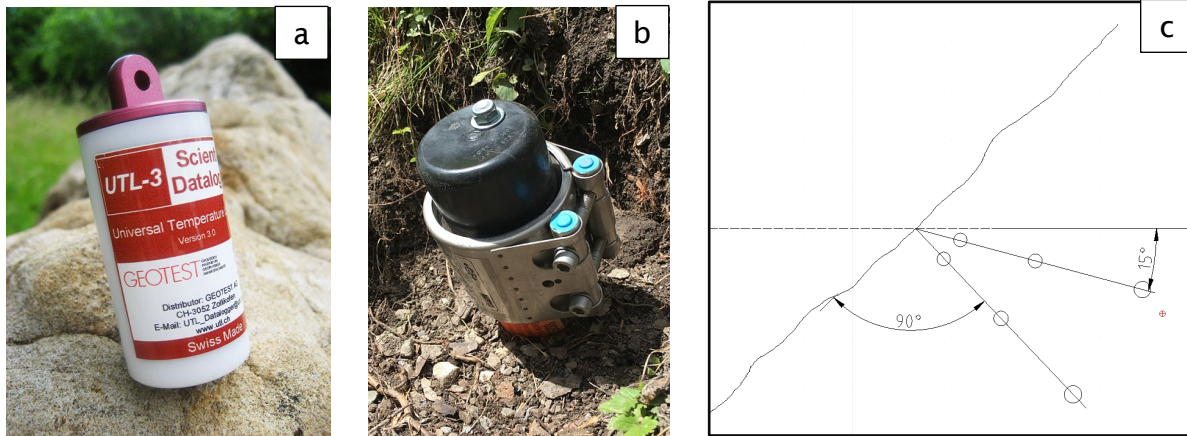


Abbildung 3: (a) UTL-3 Temperaturlogger der Firma GEOTEST AG (Quelle: GEOTEST AG, 2023), (b) ein optimal abgeschlossenes Messrohr (Quelle: G.C. Feuerstein, 2017), (c) Einbauskeizze der Messrohre und Logger (als Kreise symbolisiert) (Quelle: G.C. Feuerstein, 2023).

Es wurden Bodentemperaturmessungen an folgenden vier Standorten vorgenommen (vgl. Tabelle 1 und Abbildung 4).

Tabelle 1: AWN-Messstandorte

| Nr.   | Name                                 | Gemeinde                         | Höhenlage [m ü. M.] | Exposition | Hangneigung | Bodenmaterial |
|-------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------|-------------|---------------|
| AWN 1 | Lawinerverbauung Albanas             | Zuoz (GR)                        | 2'465               | Süd-Ost    | Ca. 33°     | Lockergestein |
| AWN 2 | Steinschlagverbauung Scalascia       | Poschiavo (GR)                   | 975                 | Nord-Ost   | Ca. 80°     | Fels          |
| AWN 3 | Steinschlagverbauung Scalascia       | Poschiavo (GR)                   | 975                 | Nord-Ost   | Ca. 30°     | Lockergestein |
| AWN 4 | Steinschlagverbauung Plan da Petschs | Valsot (GR),<br>Fraktion Martina | 1040                | Süd-Ost    | Ca. 25°     | Lockergestein |

Zusätzlich zu den eigenen Daten wurden in der vorliegenden Untersuchung auch vom SLF zur Verfügung gestellte Messdaten aus dem Projekt PERMOS ausgewertet. Die Messstandorte wurden gemäss Noetzli et al. (2021) installiert. An den Stationen wird einmal täglich die Bodentemperatur in Tiefen von bis zu knapp 35 m gemessen.

In der vorliegenden Untersuchung wurden folgende vier SLF-Bohrlöcher ausserhalb des Permafrostgebiets ausgewertet (vgl. Tabelle 2 und Abbildung 4):

Tabelle 2: SLF-Messstandorte

| Nr.   | Name       | Gemeinde         | Höhenlage<br>[m ü. M.] | Exposition | Hang-<br>neigung | Bodenmaterial |
|-------|------------|------------------|------------------------|------------|------------------|---------------|
| SLF 1 | Flüela     | Davos (GR)       | 2'500                  | Nord-Ost   | Ca. 35°          | Geröllfeld    |
| SLF 2 | Grächen    | Grächen (VS)     | 2'450                  | Nord-West  | Ca. 20°          | Lockergestein |
| SLF 3 | Herbruggen | St. Niklaus (VS) | 2'846                  | West       | Ca. 35°          | Geröllfeld    |
| SLF 4 | Hirli      | Zermatt (VS)     | 2'773                  | Nord-West  | Ca. 10°          | Lockergestein |

 **Amt für Wald und Naturgefahren**  
**Bodentemperatur-Messstandorte**  
Massstab 1:1'000'000

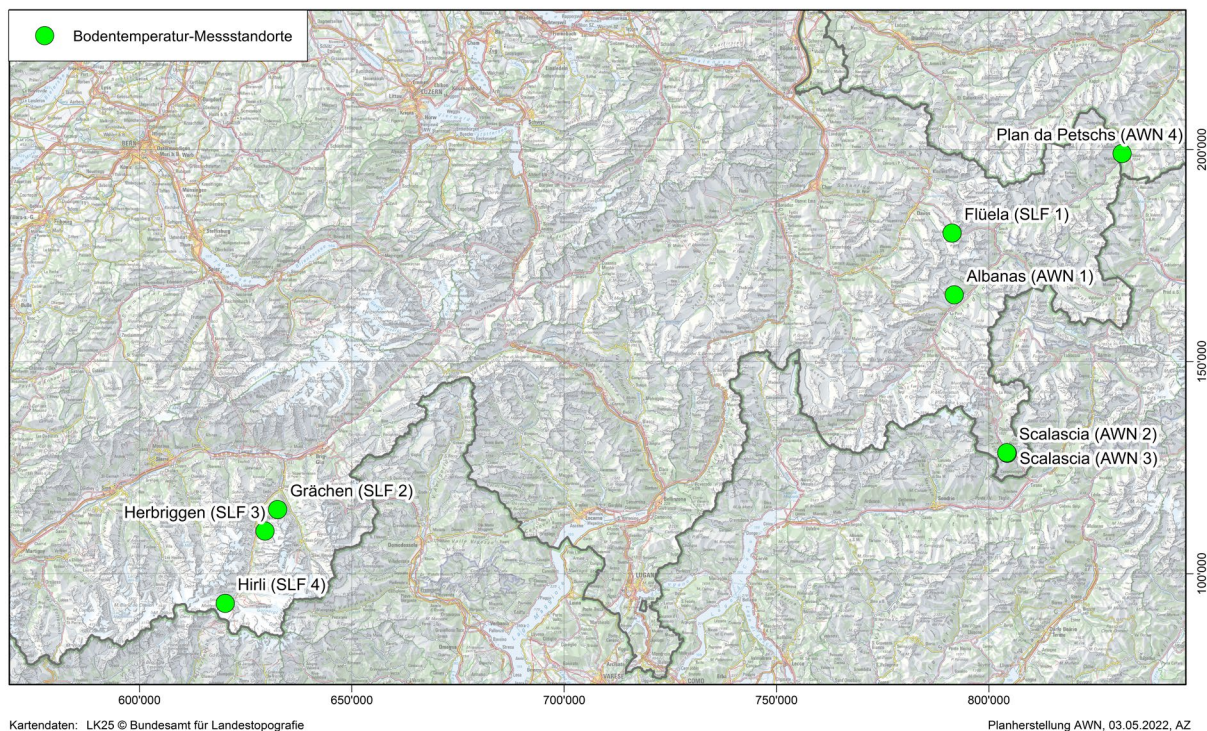


Abbildung 4: Übersicht der Messstandorte des AWNs sowie der zusätzlich ausgewerteten Standorte des SLFs (Quelle: AWN GR, 2022).

Der umfassende Grundlagenbericht (zu beziehen beim AWN) umschreibt im Detail die Auswertungen der Daten inklusive dem für die statistische Analyse verwendeten R-Skript.

## Resultate und Interpretation

Die Verläufe der Bodentemperaturen im Bohrloch der Lawinenverbauung (LV) Albanas (AWN 1), in einem auf rund 2500 m ü. M. hoch gelegenen Südhang oberhalb von Zuoz, die sinnbildlich für die anderen Bohrlöcher stehen, werden im Folgenden analysiert. Die Daten des Bohrlochs zeigen den typischen sinusförmigen Temperaturverlauf, der die Saisonalität der Bodentemperatur widerspiegelt (vgl. Abbildung 5). Mit zunehmender Tiefe nehmen die Ausschläge grundsätzlich ab und der Jahresgang ist im Vergleich zur Lufttemperatur verzögert (vgl. Abbildung 6). Die maximalen Lufttemperaturen werden im Juli erreicht, während die Bodentemperaturen ihr Maximum je nach Tiefe erst im Verlauf des Septembers bzw. Oktobers erreichen.

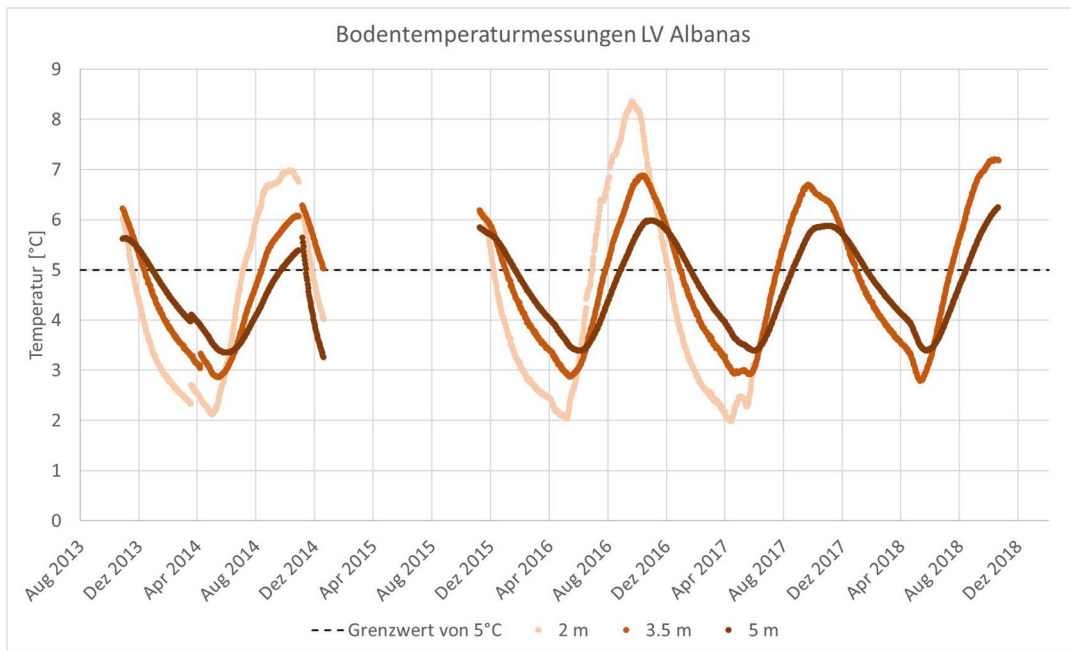


Abbildung 5: Bodentemperaturmesskurven des Bohrloches LV Albanas (AWN 1: Höhenlage 2465 m ü. M., Südhang) in den Tiefen ab OK Terrain von 2.0 m, 3.5 m und 5.0 m. Die Datenlücken sind auf Ausfälle des Dataloggers zurückzuführen (Quelle: AWN GR, 2021).

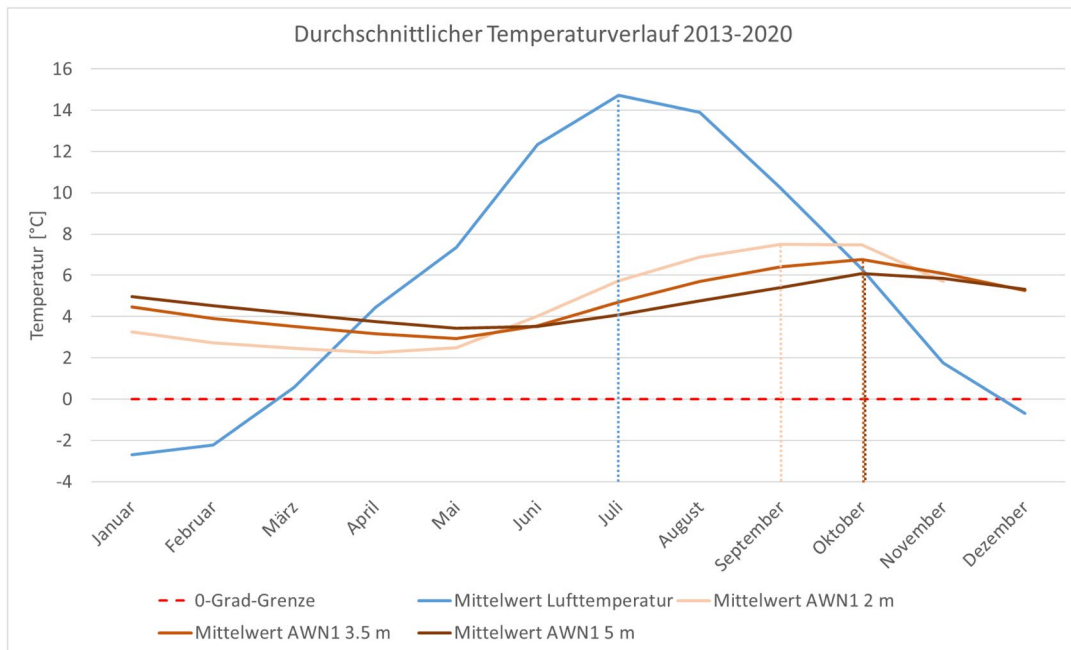


Abbildung 6: Durchschnittlicher Jahresverlauf der Lufttemperatur (monatliche Temperaturmittelwerte der Südschweiz, MeteoSchweiz, 2020) und der Bodentemperaturen beim Standort AWN1 (LV Albanas) zwischen 2013 und 2020 (Quelle: AWN GR, 2021).

Die Bodentemperaturen in einer Tiefe von 2 m weisen erwartungsgemäss die grössten Ausschläge auf, da sie am stärksten von der Lufttemperatur beeinflusst werden. Das Maximum der Bodentemperatur wird jeweils zwischen Mitte September und Mitte Oktober erreicht und betrug im Jahr 2014 rund 7°C und im Jahr 2016 rund 8.5°C. Das Temperaturminimum mit rund 2°C findet sich hingegen zwischen Mitte April und Mitte Mai. Zudem sind die Temperaturanstiege tendenziell steiler im Vergleich zum Temperaturabfall. Temperaturen unter 5°C sind in einer Tiefe von 2 m ab

circa Ende November zu erwarten. Erst ungefähr anfangs Juli überschreitet die Bodentemperatur die 5°C-Grenze wieder. Die theoretische Bausaison für Vermörtelungsarbeiten in einer Tiefe von bis zu 2 m beträgt im Gebiet Albanas folglich knapp fünf Monate (ca. Juli bis November).

In einer Tiefe von 3.5 m weisen die Bodentemperaturen im Vergleich zu den Temperaturen in einer Tiefe von 2 m weniger grosse Ausschläge auf. Das Temperaturmaximum von rund 7°C wird zudem etwa zwei Wochen später erreicht im Vergleich zu einer Tiefe von 2 m, und zwar jeweils zwischen Ende September und Ende Oktober. Das Temperaturminimum findet sich erst zwischen Mitte Mai und Anfang Juni, wobei dieses rund 3°C beträgt. Die Temperaturanstiege sind wiederum tendenziell steiler im Vergleich zu den Temperaturabfällen. Die Bodentemperaturen steigen in einer Tiefe von 3.5 m erst zwischen Mitte Juli und Mitte August über 5°C. Dafür verbleibt die Temperatur bis ungefähr Ende Dezember auf über 5°C. Die potentielle Bausaison für Vermörtelungsarbeiten in einer Tiefe von 3.5 m beträgt theoretisch ebenfalls ungefähr vier bis fünf Monate, ist aber im Jahresverlauf nach hinten verschoben (ca. Mitte August bis theoretisch Ende Dezember, wobei auch die Umgebungstemperatur zu beachten ist).

Die Bodentemperaturen in einer Tiefe von 5 m weisen die am wenigsten ausgeprägten Ausschläge auf. Das Temperaturmaximum mit einem Wert von rund 6°C wird wiederum ca. zwei Wochen später erreicht im Vergleich zur Messung in 3.5 m Bodentiefe und zwar jeweils zwischen Mitte Oktober und Mitte November. Das Temperaturminimum von rund 3.5°C wird erst zwischen Ende Mai und Mitte Juni erreicht. Die Temperaturanstiege sind in 5 m Tiefe ähnlich steil wie die Temperaturabfälle. Die 5°C-Marke wird in einer Tiefe von 5 m erst zwischen Mitte August und Mitte September überschritten. Die Temperaturen fallen allerdings erst zwischen Ende Dezember und Mitte Januar wieder unter 5°C. Die potentielle Bausaison für Vermörtelungsarbeiten in 5 m Tiefe dauert folglich rund vier Monate (ca. Mitte September bis theoretisch Mitte Januar, wobei wiederum auch die Umgebungstemperatur zu beachten ist).

Werden alle untersuchten Tiefen berücksichtigt, ergibt sich eine potentielle Bausaison für Vermörtelungsarbeiten von rund zwei Monaten. Dabei befindet sich die geeignete Zeitspanne zwischen September beziehungsweise Oktober und November.

Aufgrund zwei weiterer direkt benachbarter Bohrlöcher (AWN 2 und 3, SSV Scalascia, Luftliniendistanz von 195 m) auf tieferer Höhenlage über Meer, allerdings das eine im Lockergestein und das andere im Fels gebohrt, soll aufgezeigt werden, dass die Bodenart und damit die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/(m\*K)] einen relevanten Einfluss auf das Verhalten der Bodentemperaturen im Jahresverlauf hat. Gemäss Schweizer (2023) haben Gneise beispielsweise eine Wärmeleitfähigkeit von 3.5 W/(m\*K), Kiese hingegen 0.7 W/(m\*K), was sehr deutlich aus der Abbildung 7 hervorgeht.

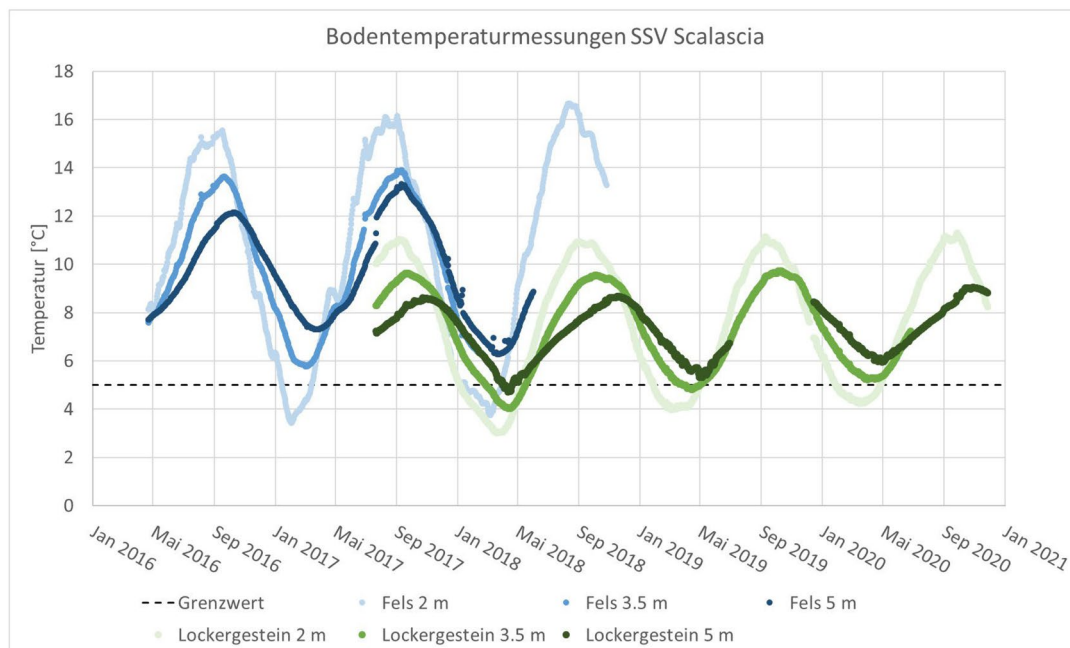


Abbildung 7: Temperaturverläufe am Standort Scalascia, in blauer Farbe im Fels, in Grün im Lockergestein. Auch hier fielen zeitweise einzelne Datenlogger aus, weshalb die Datenreihen nicht durchgehend komplett sind (Quelle: AWN GR, 2021).

Beim Vergleich zeigt sich, dass im Fels das Temperaturminimum und das -maximum früher erreicht werden im Vergleich zum Lockergestein. Zudem sind die Differenzen zwischen Minimal- und Maximaltemperatur im felsigen Untergrund verglichen mit Lockergestein deutlich höher und die Ausschläge entsprechend grösser. Die Differenz zwischen dem Minimum und dem Maximum der Bodentemperatur beträgt am Standort im Fels rund 6°C in einer Tiefe von 5 m und 12°C in einer Tiefe von 2 m. Das Bohrloch im Lockergestein weist hingegen Temperaturspannweiten von nur 4°C in einer Tiefe von 5 m und 7.5°C in einer Tiefe von 2 m auf. Die Temperaturanstiege und -abfälle sind folglich im Fels stärker ausgeprägt. Wie erwartet widerspiegeln die Auswertungen somit die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit von Fels im Vergleich zum Lockergestein.

Weiter weisen die Jahresmittel im Fels im Vergleich zum Lockergestein einen um knapp 3°C höheren Wert auf (vgl. Tabelle 3). Zudem sind die Temperaturminima insbesondere in den Tiefen von 3.5 m und 5 m im Fels höher. Entsprechend verkürzt sich die Zeitperiode mit Temperaturen unter 5°C um rund einen Monat im Vergleich zum Standort im Lockergestein.

Der Messstandort AWN 3 (SSV Scalascia, Lockergestein) kann zu einem weiteren Vergleich herbeigezogen werden, da sich ein anderer Messstandort (AWN 4, Plan da Petschs) auf einer sehr ähnlichen Höhenlage befindet. Beide Bohrlöcher liegen im Lockergestein. Erwartungsgemäss müssten die Daten der Messstationen ähnliche Resultate zeigen. Diese Erwartungen werden durch den beinahe deckungsgleichen Verlauf der Bodentemperaturkurven bestätigt (vgl. Abbildung 8).

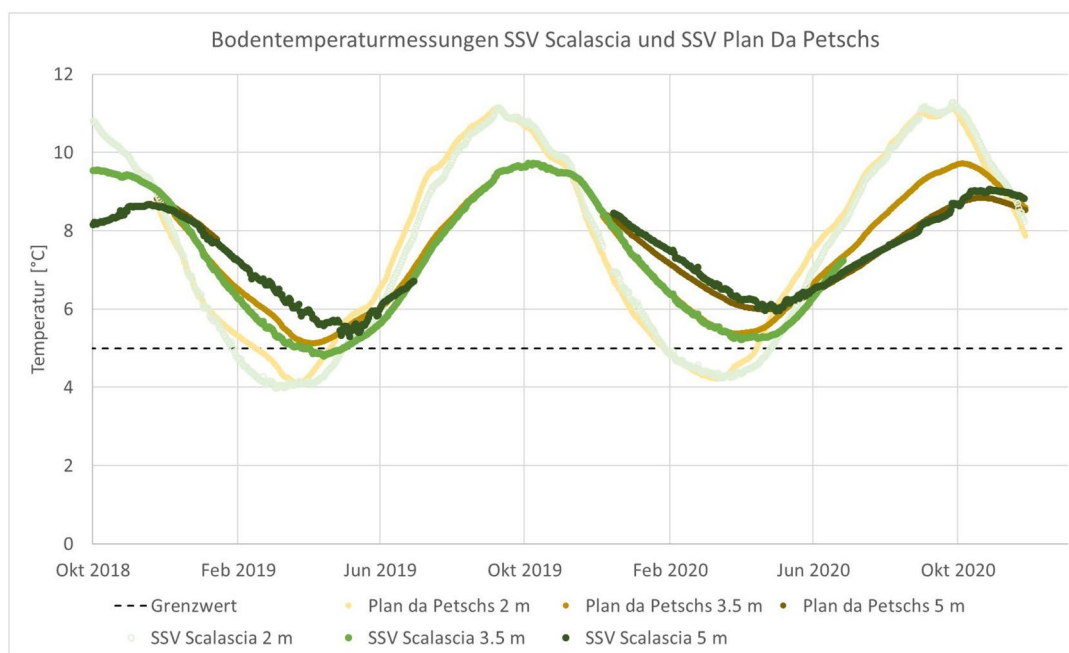


Abbildung 8: Temperaturverläufe am Standort Scalascia (Lockergestein), in grüner Farbe, und am Standort Plan da Petschs, in Gelb. Auch hier sind die Datenreihen teilweise unvollständig, da zeitweise einzelne Datenlogger ausfielen (Quelle: AWN GR, 2021).

In dieser Weise wurden die Bodentemperaturmessungen aller Bohrlöcher einzeln ausgewertet. Erst die Korrelation zwischen den Bodentemperaturen und den einzelnen unterschiedlichen Faktoren wie bspw. der Höhenlage bringt allerdings interessante Zusammenhänge an den Tag, so beispielsweise die Berechnung der durchschnittlichen Jahresmittel in Tabelle 3.

Tabelle 3: Durchschnittliche Jahresmitteltemperaturen (°C) nach Standort und Tiefe ab OK Terrain. Die Datenreihen sind aufgrund der unterschiedlichen Messtiefen nicht komplett. Nur diejenigen Jahre mit Messwerten an mehr als 330 Tagen flossen in die Auswertung ein (Quelle: AWN GR, 2021).



|           | LV Albanas (AWN 1)<br>2465 m ü. M., SO, 33°,<br>Lockergestein | SSV Scalascia (AWN 2),<br>975 m ü. M., NO, 80°,<br>Fels | SSV Scalascia<br>(AWN 3), 975 m ü. M.,<br>NO, 30°, Lockergestein | SSV Plan Da Petschs<br>(AWN 4), 1040 m ü. M.,<br>SO, 25°, Lockergestein | Flüela (SLF 1),<br>2500 m ü. M., NO, 35°,<br>Geröllfeld | Grächen (SLF 2),<br>2450 m ü. M., NW, 20°,<br>Lockergestein | Herbruggen (SLF 3),<br>2846 m ü. M., W, 35°,<br>Geröllfeld | Hirli (SLF 4),<br>2773 m ü. M., NW, 10°,<br>Lockergestein |
|-----------|---|---|--|---|---|---|--|---|
| 1.5 Meter | -   | -   | -  | -   | -   | -   | 2.8  | -   |
| 2 Meter   | 4.5   | 10.0  | 7.4  | 7.6   | 3.0   | 3.0   | -  | 1.6   |
| 3 Meter   | -   | -   | -  | -   | 3.0   | 2.9   | -  | 1.7   |
| 3.5 Meter | 4.6   | 9.9   | 7.1  | 7.4   | -   | -   | 2.5  | -   |
| 4 Meter   | -   | -   | -  | -   | 3.0   | 3.4   | -  | 1.8   |
| 5 Meter   | 4.6   | 10.0  | 7.2  | 7.3   | -   | -   | -  | -   |
| 5.5 Meter | -   | -   | -  | -   | -   | -   | 2.3  | -   |
| 6 Meter   | -   | -   | -  | -   | 3.4   | 2.5   | -  | 1.8   |

Hier zeigt sich, dass die Jahresmittel des jeweiligen Standorts in den verschiedenen Bodentiefen sehr ähnlich, wenn nicht sogar nahezu identisch, ausfallen. Das heisst, je tiefer im Boden der Messpunkt liegt, desto flacher, dafür aber breiter verlaufen die Schwankungen der Bodentemperatur.

Es liegt auf der Hand, dass die Bodentemperaturen mit zunehmender Höhe über Meer abnehmen. Abbildung 9 zeigt die Zusammenhänge zwischen der Höhenlage und der Bodentemperatur im Sommer (Messung jeweils am 01. Juli) in den drei Messtiefen 2 m, 3.5 m sowie 5 m im Lockermaterial. Bis auf die Korrelation der Messungen in 2 m Tiefe mit einem verhältnismässig tiefen Korrelationsfaktor  $R^2$  scheinen die Zusammenhänge ab einer Tiefe von 3.5 m robust zu sein. Dies dürfte auf den kleineren Einfluss der Schwankungen der Lufttemperatur zurückzuführen sein. Die Messungen in Tiefen von 3.5 m und 5 m zeigen, dass von einem Gradienten von rund  $-0.2^{\circ}\text{C}$  bis  $-0.3$  pro 100 Höhenmetern ausgegangen werden kann. Tendenziell scheint der Gradient zudem mit abnehmender Bodentiefe grösser zu werden. Vergleicht man diesen mit dem Lufttemperaturgradienten von  $-0.6$  bis  $-1.0^{\circ}\text{C}$  pro 100 Höhenmeter (in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit, vgl. MeteoSchweiz, 2023), wird der Isolationseffekt des Bodens im Lockergestein im vorliegenden Fall mit einem Faktor von mindestens 3 deutlich ersichtlich.

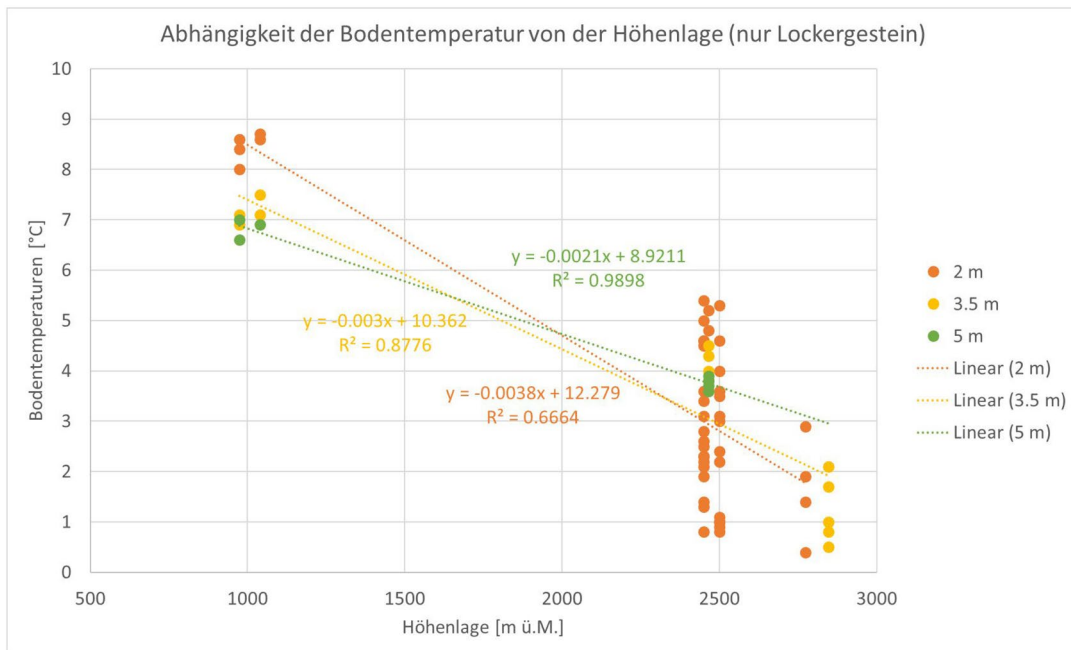


Abbildung 9: Abhängigkeit der Bodentemperatur im Lockergestein im Sommer (jeweils Temperaturmessung am 01. Juli) in verschiedenen Tiefen von der Höhenlage und die entsprechenden Korrelationsfaktoren. Anzahl Messungen: n 2m=41, n 3.5m=10, n 5m=9<sup>1</sup> (Quelle: AWN GR, 2023).

Robustere Zusammenhänge zeigen sich, wenn man anstelle der Sommertemperatur die Jahresmittelttemperaturen in Abhängigkeit der Höhenlage aufzeigt (vgl. Abbildung 10). Dabei wird zudem der Gradient von rund -0.2 bis -0.3 pro 100 Höhenmeter bestätigt.

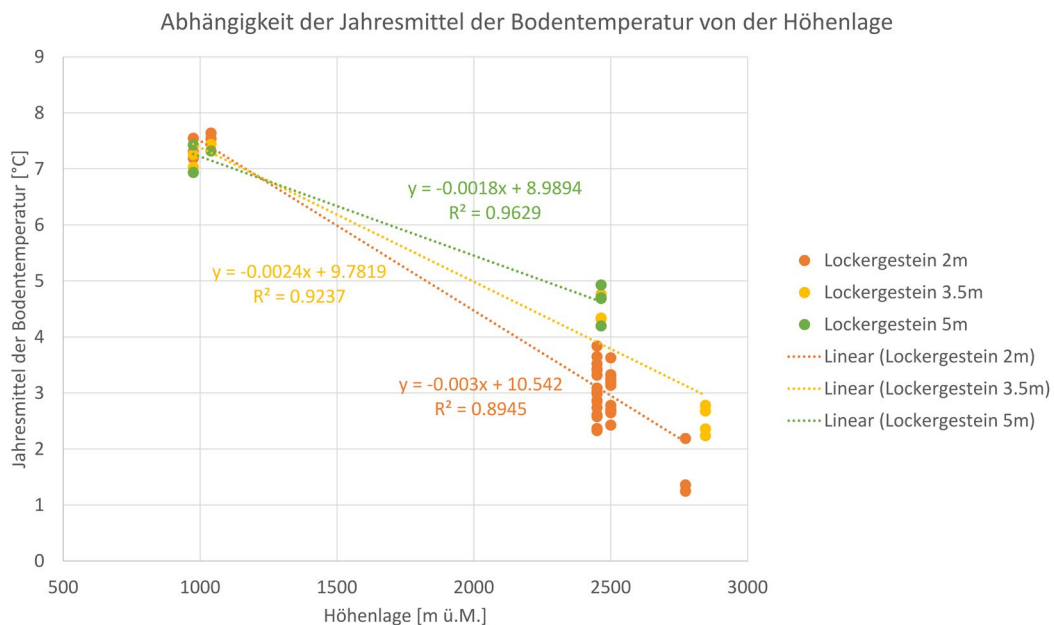


Abbildung 10: Abhängigkeit der Jahresmittel der Bodentemperatur in 2 m, 3.5 m und 5 m Tiefe von der Höhenlage und die entsprechenden Korrelationsfaktoren R<sup>2</sup>. Dargestellt sind ausschliesslich die Temperaturmittel derjenigen Jahre, welche an mindestens 330 Tagen eine Messung vorweisen. Anzahl Messungen: n 2m=39, n 3.5m=10, n 5m=7<sup>2</sup> (Quelle: AWN GR, 2023).

<sup>1</sup> Daten für 2 m: AWN 1,3,4 und SLF 1,2; Daten für 3.5 m: AWN 1,3,4; Daten für 5 m: AWN 1,3,4

<sup>2</sup> Daten für 2 m: AWN 1,3,4 und SLF 1,2,4; Daten für 3.5 m: AWN 1,3,4 und SLF 3; Daten für 5 m: AWN 1,3,4

Auch mit der Auswertung der Jahresmittel der Bodentemperaturen ist es schwierig, allgemeingültige Angaben für die zeitliche Planung von Vermörtelungsarbeiten zu machen. In der Praxis ist es jedoch wichtig, den richtigen Zeitpunkt der Mörtelarbeiten zu wählen. Es interessiert also insbesondere, ab wann und für wie lange die Bodentemperaturen über dem Grenzwert von 5°C liegen, und zwar über die gesamte Verankerungslänge. In Abbildung 11 sind die Anzahl Wochen mit einer Bodentemperatur von über 5°C dargestellt. Obwohl die Streuung relativ gross ist, bestätigt sich der Zusammenhang mit der Höhenlage. In einer Höhenlage von rund 1000 m ü. M. liegen die Bodentemperaturen in 5 m Tiefe durchgehend über 5°C (vgl. auch Abbildung 8). In einer Tiefe von 3.5 m sind es noch zwischen rund 40 und 50 Wochen und in einer Tiefe von 2 m schliesslich noch ca. 35 bis 45 Wochen. Mit einer Zunahme von rund 1000 Höhenmetern verkürzt sich die Anzahl der Wochen mit einer Bodentemperatur über 5°C in einer Tiefe von 2 m um rund 17 Wochen, also um ca. vier Monate. Die Abnahme der Anzahl Wochen mit Bodentemperaturen von mehr als 5°C mit der Höhenlage scheint in einer Tiefe von 3.5 m und 5 m etwas schneller zu erfolgen. Dort verkürzt sich die Dauer bei einer Zunahme von rund 1000 Höhenmetern um rund 21 Wochen. Aufgrund der geringen Datenmenge ist jedoch Vorsicht bei der Interpretation geboten. Allerdings zeigt sich ziemlich deutlich, dass das Zeitfenster für die Anwendung von gewöhnlichem Ankermörtel oberhalb von rund 2500 m ü. M. teils gar unter 10 Wochen fällt. Die Wahrscheinlichkeit, dass man dieses Zeitfenster ohne zusätzliche objektspezifische Temperaturmessungen genau trifft, ist relativ klein. Deshalb wird generell empfohlen, oberhalb von 2500 m ü. M. auf den Einsatz von nicht permafrosttauglichem Mörtel zu verzichten, falls keine objektspezifischen Temperaturmessungen durchgeführt werden und das Anmachwasser nicht vorgewärmt wird.

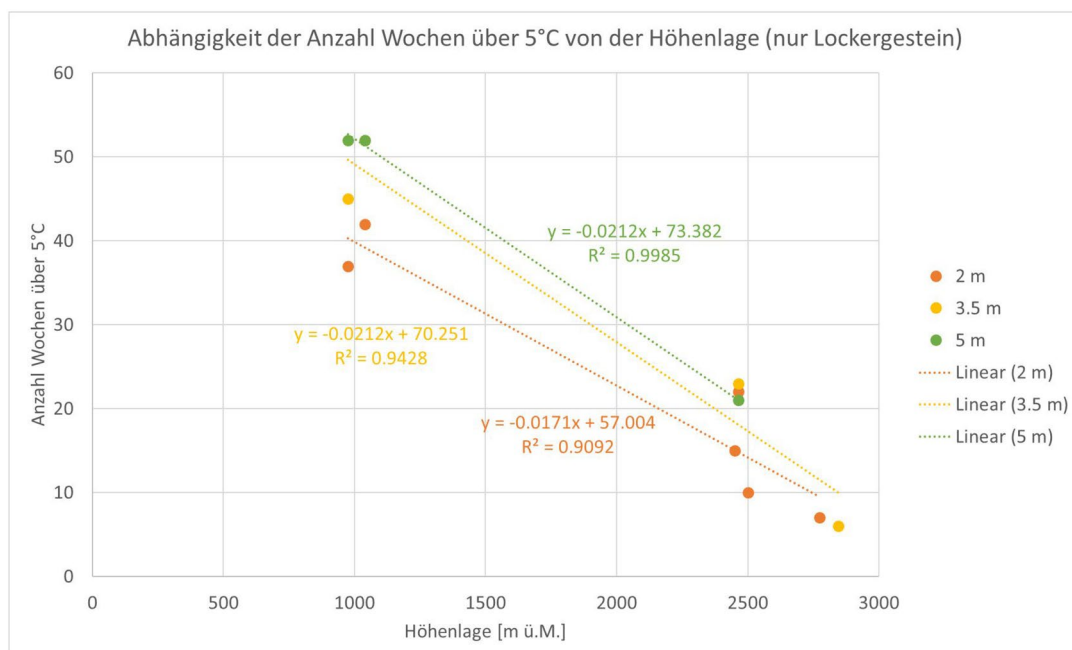


Abbildung 11: Anzahl Wochen über 5°C in Abhängigkeit von der Höhenlage und die entsprechenden Korrelationsfaktoren. Anzahl Messungen: n 2m=6, n 3.5m=4, n 5m=3 <sup>3</sup> (Quelle: AWN GR, 2023).

Neben der Anzahl Wochen pro Jahr mit einer Bodentemperatur von mehr als 5°C interessiert insbesondere auch, in welchem Zeitraum diese Temperaturen erreicht werden. Abbildung 12 zeigt **ansatzweise**, in welchen Monaten in Tiefen bis 5 m mit Bodentemperaturen über 5°C gerechnet werden kann. Es ist allerdings anzumerken, dass die Datengrundlage für eine fundierte, abschliessende Empfehlung zu klein ist. Neben der Höhenlage haben auch weitere Faktoren wie die Hangexposition, die Bodenbeschaffenheit, die Abschattung, der Winterverlauf oder die Hangneigung einen Einfluss. Trotzdem kann die Grafik als Hinweis genutzt werden und in Zukunft mit weiteren Messungen ergänzt und präzisiert werden.

<sup>3</sup> Daten für 2 m: AWN 1,3,4 und SLF 1,2,4; Daten für 3.5 m: AWN 1,3,4 und SLF 3; Daten für 5 m: AWN 1,3,4

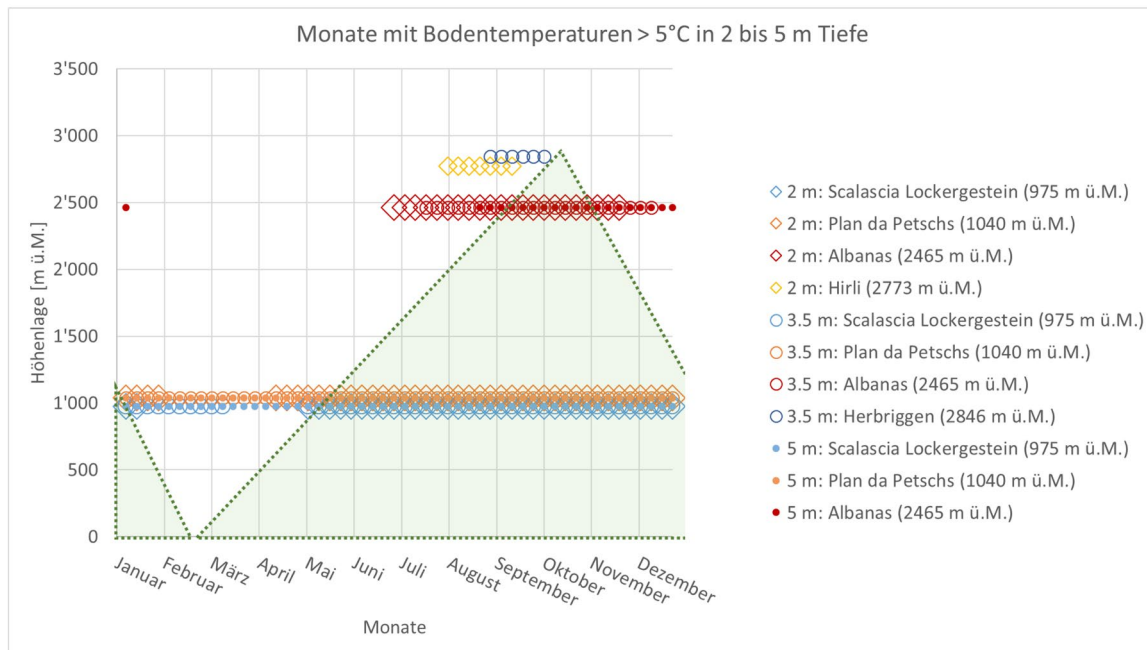


Abbildung 12: Monate mit Bodentemperaturen > 5°C in 2 bis 5 m Tiefe, berechnet aus den Wochenmitteln. Das grün hinterlegte Dreieck zeigt **ansatzweise**, in welchen Zeiträumen auf welchen Höhenlagen mit Temperaturen über 5°C in Tiefen von 2 bis 5 m gerechnet werden kann. Der Temperaturgrenzwert von 5°C wird bis in eine Tiefe von 5 m erreicht bzw. übertroffen, falls alle drei Symbole (Punkt, Kreis, Viereck) übereinander dargestellt sind (Quelle: AWN GR, 2023).

Unsere weiteren Versuche, Zusammenhänge zwischen den Bodentemperaturen und Lufttemperaturen, Strahlungsenergie, Bodenmaterial und Exposition zu finden, ergaben teils Tendenzen, aber aufgrund der eingeschränkten Datenlage kaum statistisch verwertbare Aussagen. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass insbesondere die Exposition eine relevante Rolle für den Verlauf der Bodentemperaturen spielt. Böden in schattigen Nordhängen werden höchst wahrscheinlich tiefere Bodentemperaturen aufweisen, als jene an Südhängen in gleicher Höhenlage. Grund dafür ist die unterschiedliche Bilanz der Strahlungsenergie.

## Schlussfolgerungen und praktische Hinweise

Die Verläufe der Bodentemperatur-Messwerte zeigen den typischen sinusförmigen Temperaturverlauf, der die Saisonalität der Bodentemperatur widerspiegelt. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Ausschläge grundsätzlich ab und der Jahresgang ist im Vergleich zur Lufttemperatur zunehmend nach hinten versetzt respektive retardiert. Die maximalen Lufttemperaturen werden im Juli erreicht, während die Bodentemperaturen ihr Maximum je nach Tiefe erst im Verlauf des Septembers bzw. Oktobers erreichen.

Die Auswertungen der Messdaten aus den untersuchten Bohrlöchern zeigen weiter, dass die Bodentemperaturen mit zunehmender Höhe über Meer abnehmen. Die Bohrlöcher SSV Scalascia (AWN 3) und SSV Plan da Petschs (AWN 4) auf einer ähnlichen Höhenlage bestätigen dies mit einem beinahe deckungsgleichen Verlauf der Bodentemperaturkurven. Dabei kann im Lockergestein aufgrund der Datenlage von einem Gradienten von knapp 2 bis 3°C pro 1000 Höhenmeter respektive knapp 0.2 bis 0.3°C pro 100 Höhenmeter ausgegangen werden. Dieser entspricht somit knapp einem Drittel des Lufttemperaturgradienten von ca. 0.6°C pro 100 Höhenmeter. Auch die Anzahl Wochen mit einer Bodentemperatur von mehr als 5°C nimmt mit zunehmender Höhenlage und abnehmender Bodentiefe erwartungsgemäss ab.

In einer Bodentiefe von 5 m kann bis zu einer Höhenlage von rund 1000 m ü. M. angenommen werden, dass die Temperatur über das ganze Jahr nicht unter 5°C fällt. In einer Tiefe von 3.5 m betragen die Bodentemperaturen auf dieser Meereshöhe während 40 bis 50 Wochen pro Jahr mehr als 5°C. In einer Tiefe von 2 m sind es schliesslich noch 35 bis 45 Wochen. In Höhenlagen um rund 1000 m ü. M. könnte daher theoretisch bis auf eine Zeitspanne zwischen Januar und spätestens

Mai rein aus Sicht der Bodentemperatur gemörtelt werden, da die Temperaturen in allen Tiefen jeweils über 5° C liegen (vgl. Abbildung 8 und 12). Zu beachten ist jedoch, dass im November und Dezember die Lufttemperatur für Vermörtelungsarbeiten zu tief sein kann oder kostenintensive zusätzliche Massnahmen zu treffen sind (Mörtelpumpe in isoliertem Baucontainer und isolierte Mörtelschläuche, die vor der Kälte schützen, Erwärmung des Anmachwassers). Weiter ist der Bodenfrost zu beachten.

In Höhenlagen zwischen 1500 bis 2000 m ü. M. muss die Bodentemperatur bis in eine Tiefe von 5 m berücksichtigt werden, da diese deutlich länger unter 5°C fällt als auf einer Höhe von 1000 m ü. M.. Mit einer Zunahme von rund 1000 Höhenmetern verkürzt sich die Anzahl der Wochen mit einer Bodentemperatur von über 5°C in einer Tiefe von 2 m um rund 17 Wochen, also um ca. 4 Monate. In einer Tiefe von 3.5 m und 5 m scheint die Anzahl Wochen leicht schneller abzunehmen. Dort verkürzt sich die Dauer bei einer Zunahme von rund 1000 Höhenmetern um rund 21 Wochen. Objektspezifische Messungen sind in diesen Höhenlagen empfehlenswert.

In Höhenlagen zwischen 2000 und ca. 2500 m ü. M. ist bei der Anwendung von normalem Ankermörtel ohne Temperaturmessungen und ohne Erwärmen des Anmachwassers generell Vorsicht walten zu lassen, da die Bodentemperaturen auch in den Sommermonaten unter 5°C liegen können. In Tiefen bis 5 m kann nur in den Monaten September bis Oktober bzw. November von Temperaturen über 5°C ausgegangen werden. Normale Ankermörtel können gemäss den Untersuchungen der EMPA (Moser, 1999, Thalparpan et al., 2002) maximal bis zu einer Bodentemperatur von -2°C eingebaut werden, sofern die Frischmörteltemperatur mindestens 20°C beträgt. Ob dieses Resultat für die heute verwendeten Ankermörtel immer noch gültig ist, ist nicht bekannt. Es wird daher empfohlen, diesen Punkt allenfalls zwischen Projekt- und Bauleitung sowie Mörtelhersteller zu klären. In jedem Fall muss das Anmachwasser vorgeheizt und der Trockenmörtel vor eindringender Kälte geschützt werden. Im Zweifelsfall und insbesondere in den frühen Sommermonaten ist der Einsatz von speziellem Permafrostmörtel empfehlenswert, welcher gemäss Herstellerangaben bis zu einer Bodenumgebungstemperatur von -4° C zuverlässig abbildet. Hierzu gelten die Angaben aus Margreth (2007), nämlich, dass insbesondere die Temperatur des flüssigen Mörtels am Schlauchende zwischen mindestens 20°C und maximal 30°C betragen muss, damit der Abbindeprozess gewährleistet ist.

Für Bauten über 2500 m ü. M. ist generell nur der Einsatz von Spezial-Ankermörtel für die Anwendung im Permafrost zu empfehlen. Sonst ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass der Abbindeprozess des Ankermörtels aufgrund der fehlenden Initialwärme ausbleibt. Zudem steigt mit zunehmender Höhenlage und insbesondere in schattigen Nordhängen die Wahrscheinlichkeit, permafrostdurchsetzte Böden zu tangieren, stetig an.

Im Felsbereich scheinen die Temperaturen zumindest auf 1000 m ü. M. generell höher zu liegen als im Lockergestein. Ankermörtelarbeiten im Fels und in diesen Höhenlagen sind daher eher weniger problematisch als im Lockergestein. Dies zeigt sich auch beim Vergleich der Standorte SSV Scalascia Lockergestein (AWN 3) und SSV Scalascia Fels (AWN 2), welche trotz direkt benachbarter Lage und ähnlicher Exposition unterschiedliche Bodentemperaturkurven und Jahresmitteltemperaturen zeigen. Diese Resultate lassen sich mit der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit begründen. Die vorliegende Datenlage lässt jedoch keine Schlüsse für den Verlauf der Felstemperaturen in grösseren Meereshöhen zu.

Der Lufttemperaturverlauf ist saisonal zwar relevant und die jährlichen Unterschiede können einen leichten Einfluss auf die Bodentemperaturen haben. Dieser spielt aber für die Abschätzung der Perioden mit einer Bodentemperatur von über 5°C nur eine unwesentliche Rolle. Weitere entscheidende Faktoren, die in unseren Untersuchungen nicht berücksichtigt wurden, sind die Charakteristik des Winters (schneeärmer Winter = tiefere Bodentemperaturen), die Hangneigung und Exposition (Sonnen- resp. Schattenhang, Strahlungsbilanz). In Jahren, in welchen bereits früh im Winter eine isolierende Schneedecke von mindestens 50 cm, sicher aber 80 cm, vorhanden ist, wirkt die Sommerwärme länger, da die Temperaturen zwischen Schnee und Boden dann um 0°C betragen und nicht ins Negative fallen. Eine geringmächtige Schneedecke wirkt hingegen kühlend auf die Bodentemperaturen (Herbstschneeeffekt, siehe Schrott et al., 2012).

Wichtig ist, dass bei Vermörtelungsarbeiten nicht nur dem Anmischen und Einbringen des Mörtels die notwendige Beachtung geschenkt wird, sondern auch die Bodentemperaturen berücksichtigt werden, um die geforderten Mörtel Eigenschaften erreichen zu können

## Dank

Wir bedanken uns beim WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) für die Zurverfügungstellung ihrer Temperaturmessdaten sowie namentlich bei Dr. Marcia Phillips und Stefan Margreth (beide SLF) für ihre beratende Tätigkeit sowie Stefan Margreth zusätzlich für das Review.

## Autoren

Gian Cla Feuerstein, dipl. Forsting. ETH/SIA, Regionalleiter und Spezialist Schutzbauten in der Region Südbünden des Amtes für Wald und Naturgefahren Graubünden.

Anita Zuidema, MSc Umweltnaturwissenschaften mit Vertiefung Wald und Landschaftsmanagement, technische Sachbearbeiterin im Naturgefahrenbereich der Region Mittelbünden des Amtes für Wald und Naturgefahren Graubünden.

## Literatur

Aulitzky, H. & Turner, H. (1980). Bioklimatische Grundlagen einer standortsgemässen Bewirtschaftung des subalpinen Lärchen-Arvenwaldes. Hrsg: Dr. W. Bosshard, Direktor der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen. Gebirgsprogramm: 17. Beitrag, Bd. 58, Heft 4, 1982.

Bommer, C., Phillips, M., Keusen, H.-R. & Teyssere, P. (2009). Bauen im Permafrost: Ein Leitfaden für die Praxis. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 126 S.

GEOTEST AG, 2023. UTL-3 Temperaturdatenlogger. Abgerufen am 27.10.2023 von <https://www.geotest.ch/de/innovation/utl-temperaturdatenlogger>.

Grüll, F. & Kvet, J. (1976). Charakteristik der Bodentemperaturen in natürlichen Pflanzengesellschaften des Mährischen Karstes mit Anwendung der Invertzuckermethode. Preslia, Praha. Nr. 48, S. 247 – 258.

Margreth, S. (2007). Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Technische Richtlinie als Vollzugshilfe. Umwelt-Vollzug Nr. 0704, Bundesamt für Umwelt, Bern, WSL Eidgenössisches Institut für Schnee- u. Lawinenforschung SLF, Davos. 137 S.

MeteoSchweiz (2023). Die Bora. MeteoSchweiz-Blog. 03. April 2023. Abgerufen am 29.10.2023 von <https://www.meteoschweiz.admin.ch/ueber-uns/meteoschweiz-blog/de/2023/04/diebora.html>.

MeteoSchweiz (2020). Schweizer Temperaturmittel. Abgerufen am 08.02.2021 von <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/schweizer-temperaturmittel/daten-schweizer-temperaturmittel.html>.

Moser, K. (1999). Ankermörtel im Permafrost. Untersuchungsbericht Nr. 200229. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Dübendorf, 101 S.

Noetzli, J., Arenson, L.U., Bast, A., Beutel, J., Delaloye, R., Farinotti, D., Gruber, S., Gubler, H., Haerberli, W., Hasler, A., Hauck, C., Hiller, M., Hoelzle, M., Lambiel, C., Pellet, C., Springman, S. M., Vonder Muehll, D. & Phillips, M. (2021). Best Practice for Measuring Permafrost Temperature in Boreholes Based on the Experience in the Swiss Alps. *Front. Earth Sci.* 9:607875. doi: 10.3389/feart.2021.607875

Pflume, S. (1997). Laubwaldgesellschaften im Harz und Bodentemperaturen in unterschiedlichen Waldbeständen, Ber. Naturhis. Ges. Hannover, Nr. 139, S. 63-73

Schaumberger, A., Schaumberger, J., Eitzinger, J. & Grabenweger, P. (2013). Räumliche Modellierung von Bodentemperaturen für Österreich. 14. Österreichischer Klimatag, 4. - 5. April 2013, Wien.

- Schrott, L., Otto, J.-C., Keller, F. & Rosner, M.-L. (2012). "Permafrost in den Hohen Tauern – Abschlussbericht", Uni Salzburg, Academia Engiadina, 34 S.
- Schweizer, A. (2023). "Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagebau". Formel u. Werte der Wärmeleitfähigkeit. Abgerufen am 18.10.2023 von [www.schweizer-fn.de](http://www.schweizer-fn.de).
- Thalparpan, P., Moser, K., Phillips, M. (2002). Bauen auf bewegtem Boden: Problematik von Lawinenverbauungen im Permafrost. Tec21, 128, S. 19-24.
- Turner, H., Rochat, P. & Streule, A. (1975). Thermische Charakteristik von Hauptstandortstypen im Bereich der oberen Waldgrenze (Stillberg, Dischmatal bei Davos). 27 S.