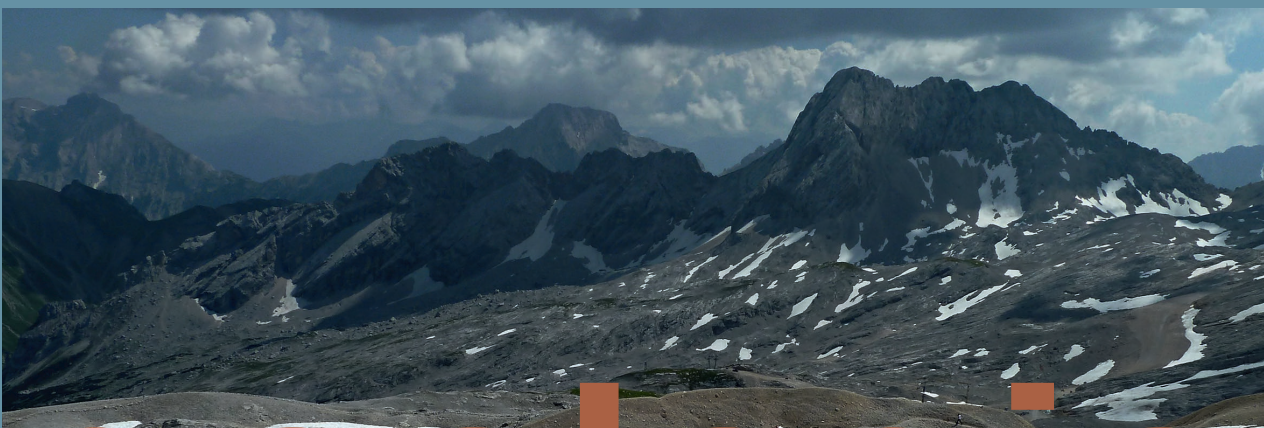




# Permafrost und Böden im Bereich der Zugspitze



geologie





# Permafrost und Böden im Bereich der Zugspitze

Bearbeiter:

Thomas Gallemann, Bernhard Wagner  
Maria Foltyn, Michael Mahr, Hermann Jerz

60 Seiten, 51 Abbildungen, 15 Tabellen, Augsburg 2021

**UmweltSpezial**  
**Geologica Bavarica 120**

## Impressum

Permafrost und Böden im Bereich der Zugspitze

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg  
Tel.: 0821 9071-0  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

### Bearbeitung:

LfU: Thomas Galleman, Dr. Bernhard Wagner  
LfU Klima-Zentrum: Maria Foltyn  
Dr. Mahr Ingenieurbüro, 82499 Wallgau  
Dr. Hermann Jerz, 82031 Grünwald

### Bildnachweis:

Abbildungen Permafrost am Zugspitzgipfel: LfU  
Abbildungen Gebirgsböden im Wettersteingebirge: LfU, Dr. Robert Traidl: 1, 2, 3, 4, 5; Dr. Hermann Jerz: 6, 7

### Titelbild:

Blick auf das Zugspitzplatt.

### Stand:

Juli 2021

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.



## Inhaltsverzeichnis

<b>I. Permafrost am Zugspitzgipfel: Messungen und Modellierung anhand aktueller Klimaprojektionen</b>	<b>5</b>
Kurzfassung	6
Abstract	6
1 Einleitung	7
2 Ergebnisse der Messungen von 2010 bis 2020	8
3 Grundlagen der Klimamodellierung und Bayerisches Klimaprojektionsensemble	13
4 Modellierung und Vergleich der Mess- und Rechenergebnisse 2013 bis 2019	20
5 Modellrechnungen 1971 bis 2100	25
6 Schlussfolgerungen	33
7 Literatur	35
Anhang 1: Stationsdaten	37
Anhang 2: Berechnung der unterschiedlichen Realisationen	40
<b>II. Gebirgsböden im Wettersteingebirge</b>	<b>47</b>
Kurzfassung	48
Abstract	48
1 Einleitung	49
2 Ausgewählte Bodenprofile	50
3 Äolische Beeinflussung der Böden	52
4 Profilbeschreibungen und Analysenwerte	53
5 Literaturhinweise	59
Dank	60



# **I. Permafrost am Zugspitzgipfel: Messungen und Modellierung anhand aktueller Klimaprojektionen**

**Thomas Galleman, Dr. Bernhard Wagner, Maria Foltyn, Dr. Michael Mahr**

<b>Kurzfassung</b>	<b>6</b>
<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2 Ergebnisse der Messungen von 2010 bis 2020</b>	<b>8</b>
<b>3 Grundlagen der Klimamodellierung und Bayerisches Klimaprojektionsensemble</b>	<b>13</b>
<b>4 Modellierung und Vergleich der Mess- und Rechenergebnisse 2013 bis 2019</b>	<b>20</b>
<b>5 Modellrechnungen 1971 bis 2100</b>	<b>25</b>
<b>6 Schlussfolgerungen</b>	<b>33</b>
<b>7 Literatur</b>	<b>35</b>
<b>Anhang 1: Stationsdaten</b>	<b>37</b>
<b>Anhang 2: Berechnung der unterschiedlichen Realisationen</b>	<b>40</b>

## Kurzfassung

*Schlüsselwörter:* Zugspitze, Permafrost, Klimaszenarien, Modellierung, Gebirgstemperatur

Aufbauend auf der Geologica Bavarica 115 (Permafrost-Messstation am Zugspitzgipfel: Ergebnisse und Modellberechnungen) aus dem Jahr 2017 wurden für die Permafrost-Messstation an der Zugspitze die vorhandenen Messdaten bis Ende 2020 aktualisiert und Berechnungen zum weiteren Verlauf des Permafrosts bis Ende des Jahrhunderts auf Grundlage neuer Klimaszenarien durchgeführt.

Die nun für einen Zeitraum von zehn Jahren von 2011 bis 2020 vorliegenden Messdaten zeigen einen deutlich sichtbaren Erwärmungstrend des Gebirges mit entsprechendem Rückgang des Permafrosts, der in etwa dem Trend der Entwicklung der Umgebungstemperaturen in diesem Zeitraum entspricht. Auch ein neu eingeführter Klimaindikator für den Permafrost an der Zugspitze weist in diesem Zeitraum einen weitgehend linearen Trend der Temperaturzunahme auf.

Die Modellberechnungen wurden mit Hilfe von insgesamt 13 Realisationen (Temperaturläufen) des WETTREG2013-Ensembles durchgeführt, wobei 9 Realisationen auf Grundlage von Klimamodellen berechnet wurden, die von einem weiter gleichbleibend linearen Trend der CO<sub>2</sub>-Zunahme in der Atmosphäre ausgehen, sowie 4 Realisationen unter der Annahme einer deutlichen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Modellierung ergibt, dass der Permafrost an der Zugspitze ohne Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Jahrhundert verschwindet, wohingegen bei einer Reduktion der Permafrost in ähnlichem Umfang wie heute erhalten bliebe.

## Abstract

Based on the Geologica Bavarica 115 (Permafrost measuring station Zugspitze: results and measurements) from 2017, measured data for the measurement station Zugspitze were updated until the end of 2020 and model calculations concerning the further state of permafrost until the end of the century were performed on the basis of new climate scenarios.

Measured data, which are now available for a time span of ten years from 2011 to 2020, show a clear trend of a warming of the rock mass and a corresponding decrease of the permafrost, following the increase of mean ambient temperatures. A newly introduced climate indicator for permafrost at the Zugspitze shows a nearly linear temperature increase in the same period.

Model calculations ran for 13 realisations (temperature developments) of the WETTREG2013-ensemble. 9 of these realisations come from climate models assuming a further linear increase in CO<sub>2</sub> emissions, while 4 realisations are based on the assumption of a decrease of CO<sub>2</sub> emissions.

Model results show that without a reduction of CO<sub>2</sub> emissions the permafrost at the Zugspitze will disappear until end of the century, while a reduction of CO<sub>2</sub> emissions results in permafrost persisting at the Zugspitze until end of the century to about the same extent as present.

# 1 Einleitung

Permafrost ist ein empfindlicher Klimaindikator, weil er auf Temperaturveränderungen der Atmosphäre reagiert. Messungen in den Alpen belegen einen deutlichen Rückgang des Permafrosts in den letzten 20 Jahren (Krautblatter et al. 2018). Ein Rückgang des Permafrosts kann durch geringere Hangstabilität eine Zunahme von Geogefahren wie Steinschlag, Setzungen und Rutschungen zur Folge haben (e.g. Ravel & Deline 2011, Krautblatter et al. 2013, Mamot et al. 2020, StMUV 2021), aber auch eine Freisetzung von klimarelevanten Gasen wie Methan und Kohlendioxid bewirken (Hope & Schaefer 2016).

Ein Monitoring des alpinen Permafrosts wird insbesondere in der Schweiz und Österreich als den Ländern mit flächenhaft umfangreicher Ausbildung von hochalpinem Permafrost durchgeführt (e.g. PERMOS 2020). In Deutschland findet sich Permafrost lediglich in den Nördlichen Kalkalpen und aufgrund der Verbreitung der Höhenlagen nur in relativ geringer Ausprägung (Böckli et al. 2011). Ein Monitoring des Permafrosts findet hier nur an der Zugspitze im Gipfelbereich (LfU 2017a) und im Bereich des Kammstollens an der Umweltstation Schneesfernerhaus (USF) (Schröder & Krautblatter 2018) statt.

Um anhand der vorliegenden Klimadaten an der Zugspitze längerfristige Aussagen über den Verlauf des Permafrosts in der Vergangenheit seit Beginn der Klimamessungen des DWD an der Zugspitze im Jahr 1900 und Aussagen zum weiteren Verlauf des Permafrosts auf Grundlage von Klimamodellen machen zu können, wurden mit Hilfe der vorliegenden Messungen ein numerisches Rechenmodell geeicht und entsprechende Modellberechnungen durchgeführt (LfU 2017a). Im Ergebnis zeigte sich anhand einer exemplarischen Berechnung mit dem regionalen Klimamodell WETTREG2010, dass aufgrund der projizierten Temperaturerhöhung mit einem Verschwinden des Permafrosts am Zugspitzgipfel in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zu rechnen ist.

Mittlerweile sind die Temperaturmessungen um weitere fünf Jahre fortgeschritten und es liegen neue Projektionsdaten für die weitere Klimaentwicklung bis Ende des Jahrhunderts vor. Dies wird zum Anlass genommen, um die gemessenen Trends der Entwicklung des Permafrosts um den aktuellen Messzeitraum und die weitere Entwicklung des Permafrosts in Anwendung vorliegender Klimaszenarien zu aktualisieren.

Neu an den verwendeten Klimadaten ist, dass diese auf Grundlage unterschiedlicher Treibhausgas-Szenarien erstellt wurden: zum einen eine Berechnung bei gleichbleibendem Trend der Kohlendioxidemissionen, andererseits unter der Annahme stagnierender Kohlendioxidemissionen. Weiterhin standen nun für jedes der o. g. Szenarien mehrere Realisationen als Stationsmessdaten zur Verfügung, so dass eine Betrachtung zur Bandbreite der Projektionen für das jeweilige Szenario vorgenommen werden kann.

## 2 Ergebnisse der Messungen von 2010 bis 2020

Zur Beobachtung der Permafrostentwicklung im Grat des Zugspitzgipfels wurde 2007 der Fels von Süd nach Nord durchbohrt. An insgesamt 15 in dem Bohrloch installierten Sensoren werden stündlich die Temperaturen gemessen und aufgezeichnet. Diese Stundenwerte bildeten die Grundlage für die Kalibrierung des numerischen Rechenmodells (Kap. 4 und 5). Die weitgehend automatisierte Weiterverarbeitung der Messdaten erfolgt mit einer Standardsoftware für Tabellenkalkulation. In einem ersten Arbeitsschritt werden Tagesmittelwerte berechnet. Kommen neue Messdaten hinzu, erfolgt zudem für jeden Sensor eine automatisierte Neuermittlung der Minimal- und Maximal-Temperaturen während des kompletten Messzeitraums. Mehr Informationen zur Errichtung der Permafrost-Messstation finden sich in LfU (2017a).

Im Zeitraum vom 29.05. bis 05.08.2020 war ein kompletter Ausfall der Messanlage zu beklagen. Grund hierfür war ein zunächst unentdeckter Ausfall der Stromversorgung, der nach kurzer Zeit auch die zwischengeschaltete Pufferbatterie zum Erliegen brachte. Diese Datenlücke ist bei den Diagrammen sichtbar.

Die Ergebnisse werden auf der Homepage des LfU mit Diagrammen visualisiert und veröffentlicht. Diese sollen weitgehend plausibel und selbsterklärend sein. Ein schematischer Profilschnitt durch den Gipfelgrat ist hierfür ein wertvolles Hilfsmittel. Wesentliche Ergebnisse werden in diesem Schnitt entlang der eingetragenen Bohrachse positionsgetreu aufgetragen.

Die Grafik in Abb. 1 gibt einen Überblick zu allen gewonnenen Temperaturinformationen. Für jeden Sensor sind lagerichtig die Minimal- und Maximal-Temperaturen als Balken dargestellt mit der Bohrachse als 0 °C-Linie. Auf diese Weise lässt sich schnell erkennen, in welchem Abschnitt entlang der Bohrachse Permafrost im Gestein gemessen wurde. Als rote Messkurve ist zusätzlich der interpolierte Temperaturverlauf vom 31.12.2020 aufgetragen.

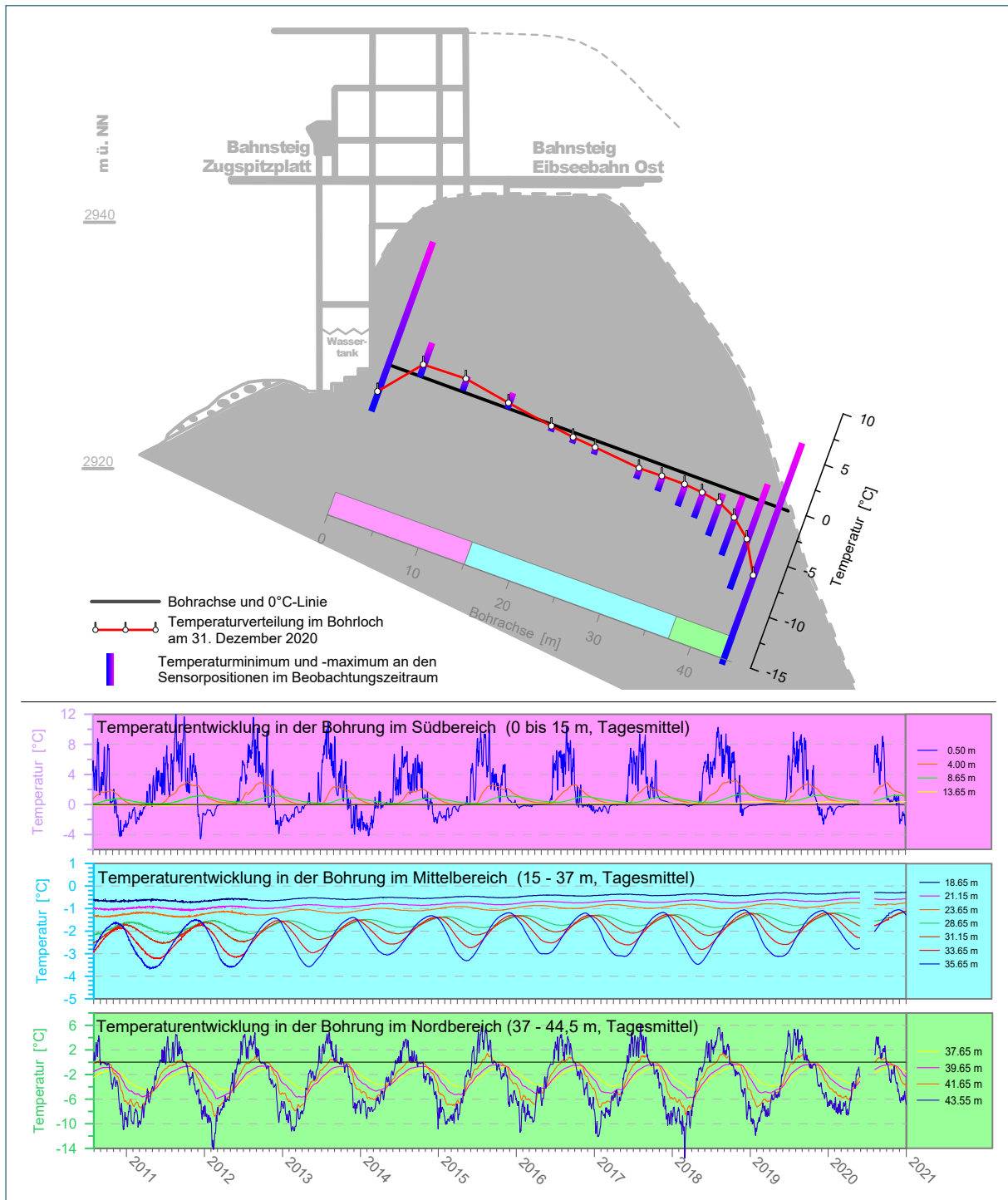


Abb. 1: Profilschnitt durch den Gipfelgrat mit Minimal- und Maximal-Temperaturen und einer Tages-Kennlinie, sowie der Zeit-Temperatur-Entwicklung in allen Sensoren. Die unterschiedliche Skalierung der Temperaturachsen ist zu beachten.

Je tiefer die Sensoren im Fels installiert sind, desto geringer werden die jahreszeitlichen Schwankungen in den Temperaturkurven. Zudem verschieben sich die Scheitelpunkte der Messkurven entlang der Zeitachse analog zur verringerten Amplitude im Berginneren. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Gesteins (Wettersteinkalk) bewirkt, dass die winterliche Abkühlung der Luft erst nach etwa sechs Monaten im Inneren des Gebirges ankommt. Die Minimaltemperatur wird im Zentrum des

Zugspitzgipfels erst im September eines jeden Jahres erreicht, das Temperaturmaximum jedoch im Januar verzeichnet (Abb. 2).

Weiterhin ist ein tendenzielles Ansteigen des Temperaturminimums im Fels im Zeitraum von zehn Jahren festzustellen. Während im September 2010 noch ein Tiefstwert von  $-2,15\text{ °C}$  verzeichnet wurde, konnten im September 2019 lediglich noch  $-1,7\text{ °C}$  ermittelt werden. Das Temperaturmaximum lag im Januar 2011 bei  $-1,6\text{ °C}$ , im Januar 2020 wurde ein Höchstwert von  $-1,2\text{ °C}$  beobachtet.

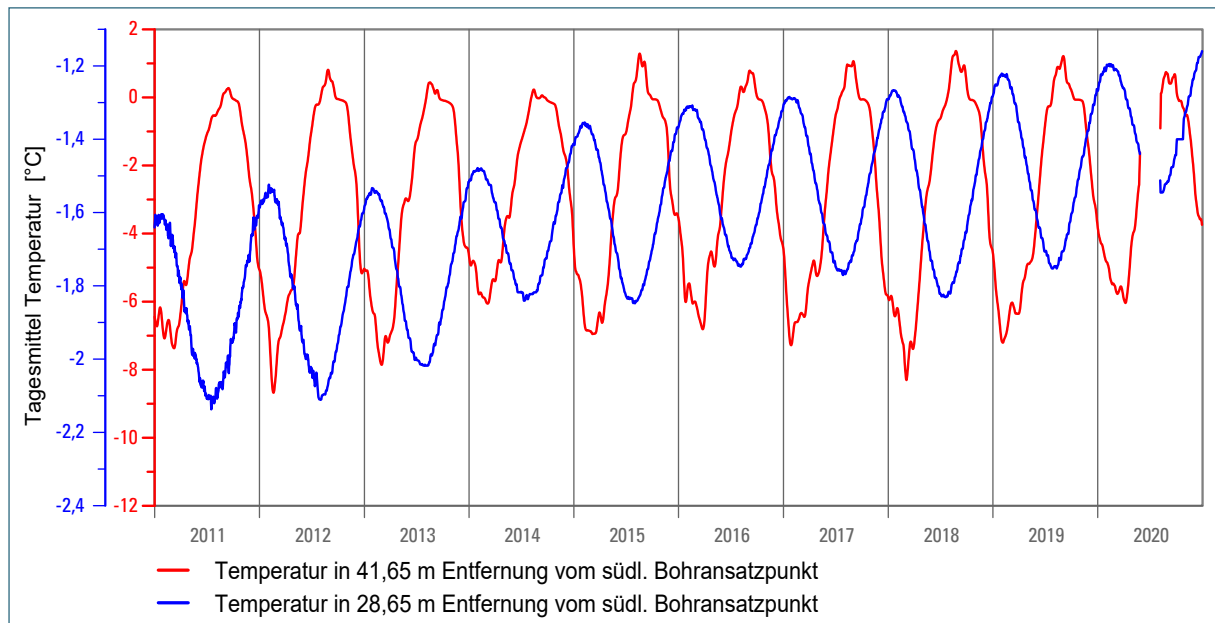


Abb. 2: Jahreszyklen zweier ausgewählter Temperatursensoren im Messzeitraum

Die Verschiebung der Temperatur-Jahreszyklen zeigt sich auch in einer flächigen Visualisierung der Temperaturentwicklungen über die Zeit (Abb. 3). Entlang der im bereits bekannten Profilschnitt eingezeichneten Bohrachse werden die Temperaturen über die Zeit flächig abgerollt. Auf Grundlage einer Interpolation werden für jeden halben Meter entlang der Bohrachse und jeden Einzeltag auf der Zeitachse Temperaturen berechnet und in 33 unterschiedlichen Farbstufen dargestellt. Für die Grafik ergeben sich somit circa 325.000 Rasterpunkte. Die gewählte Interpolation nach der Methode der inversen Distanz muss zusätzlich geglättet werden, um anschauliche Ergebnisse zu erzeugen.

Der Temperaturverlauf über den Messzeitraum zeigt in diesem Diagramm den Erwärmungstrend im Gebirge. Exemplarisch ist dies gut an der grün markierten  $0\text{ °C}$ -Grenze zu erkennen, die sich sowohl von Süden als auch von Norden tendenziell immer mehr in das Gebirgsinnere hinein verschiebt und so die Verkleinerung des Permafrostbereichs in diesem Zeitraum anzeigt.



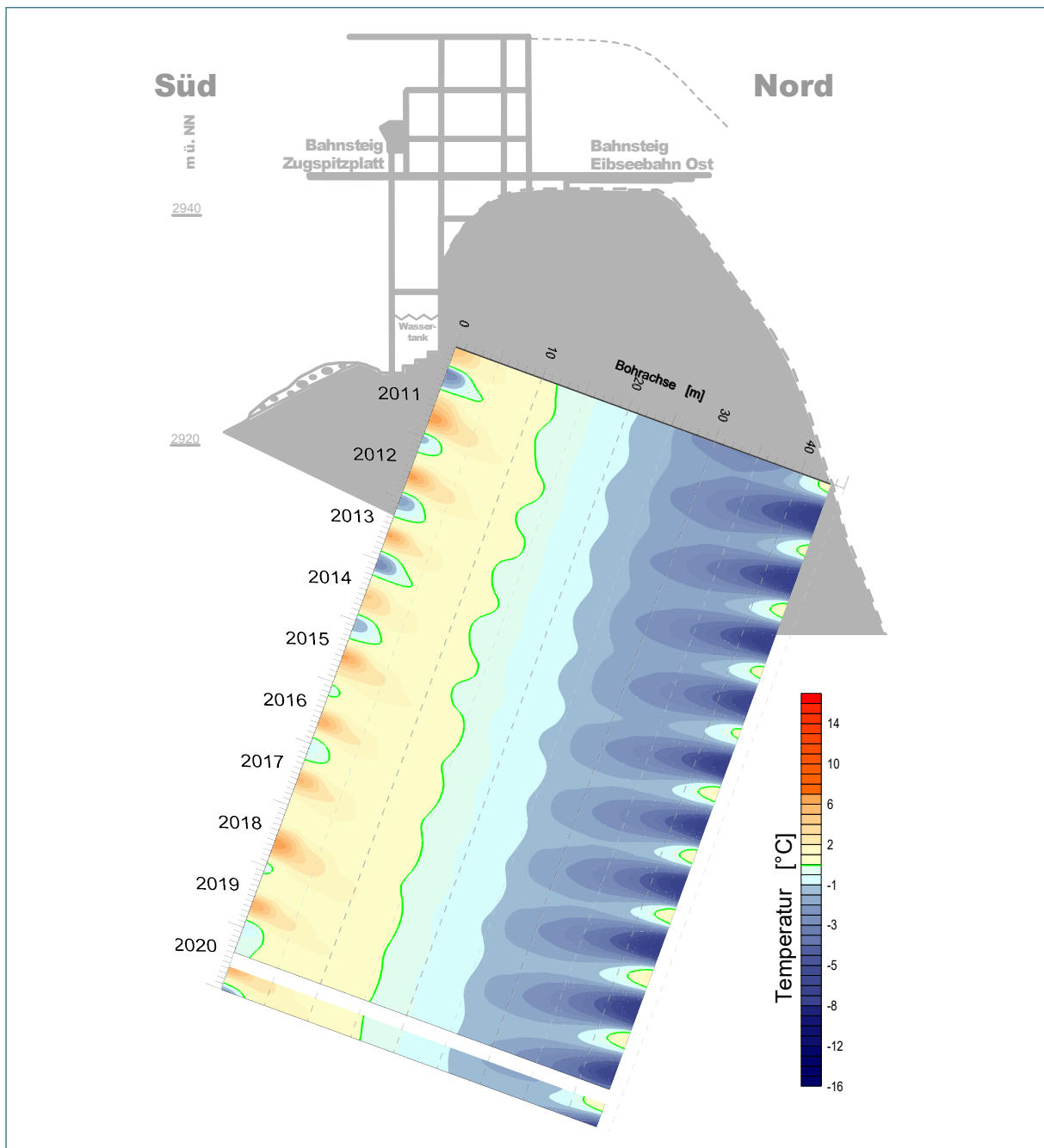


Abb. 3: Gemessene Temperaturentwicklung entlang der Bohrachse über die Zeit

Die Permafrostbohrung auf der Zugspitze wurde mittlerweile in die Liste der Klimaindikatoren für die Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (LfU 2017b) aufgenommen. Als Indikator für das Schwinden von Permafrost wird der Temperatursensor in 23,65 m Distanz von der Südwand des Zugspitzgipfels verwendet, da dieser am besten die Mitte des Zugspitzgrats repräsentiert. Es wird ausschließlich der Maximalwert der gemessenen Temperatur im sogenannten Meteorologischen Jahr betrachtet (1. Dezember bis 30. November des Folgejahres). Bei diesem Sensor findet sich der Scheitelwert um den Monatswechsel März/April. Werden die Temperaturwertewerte in einem XY-Diagramm aufgetragen (Abb. 4), so ist auch hier eine signifikante Erwärmung von 0,4 K innerhalb von zehn Jahren zu verzeichnen. Dies stimmt auch gut mit den beobachteten Trends der Jahrestemperaturverläufe von Abb. 9 überein.

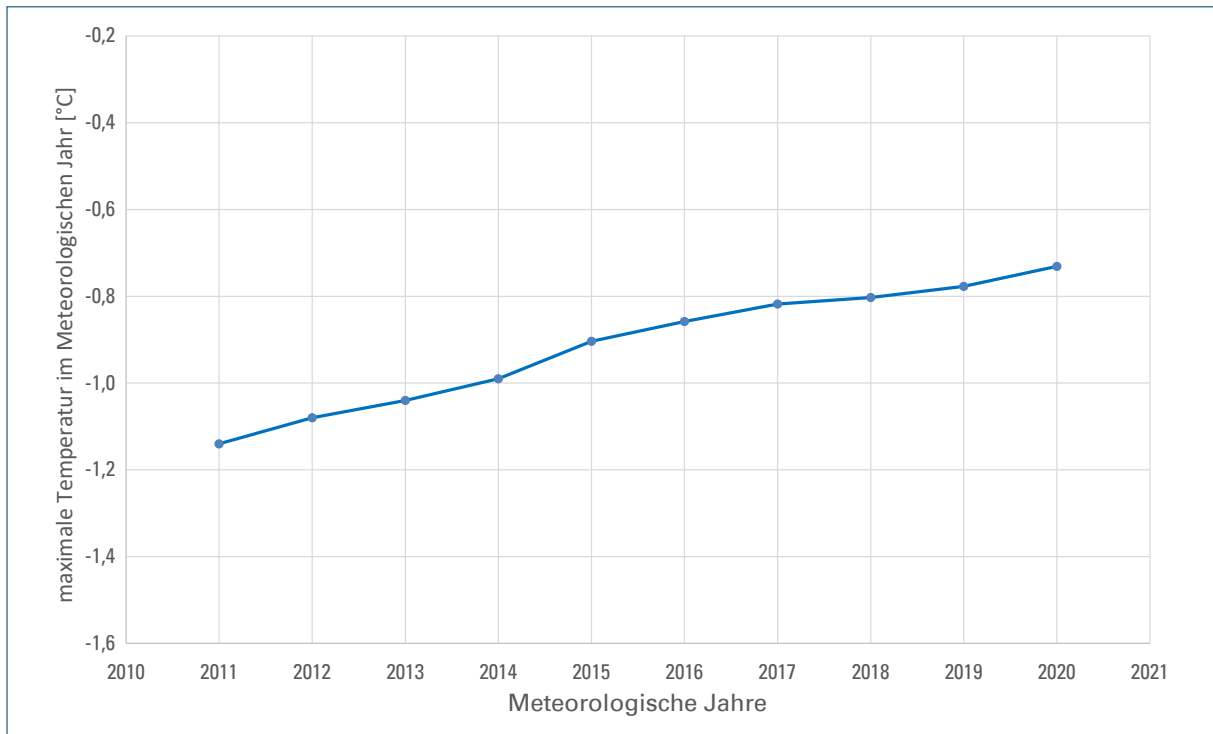


Abb. 4: Maximaltemperaturen in den Meteorologischen Jahren in der Mitte des Zugspitzgrats

Ab dem Jahr 2015 weisen die oberflächennahen Temperatursensoren im Bereich des südlichen Bohransatzpunktes einen gleichmäßigeren Temperaturverlauf in den Wintermonaten auf, als in den Vorjahren. Als Ursache konnte ein Sicherheitsvorbau ermittelt werden, der während der Baumaßnahme des Umbaus der Gipfelstation an der Zugspitze in dieser Zeit aus Schutz- und Sicherheitsgründen errichtet worden war. Offensichtlich können sich durch den Vorbau Schneereste länger halten, die isolierend wirken. Dies wurde bei der Modellierung durch eine entsprechende Anpassung des Rechenmodells berücksichtigt (Kap. 4).

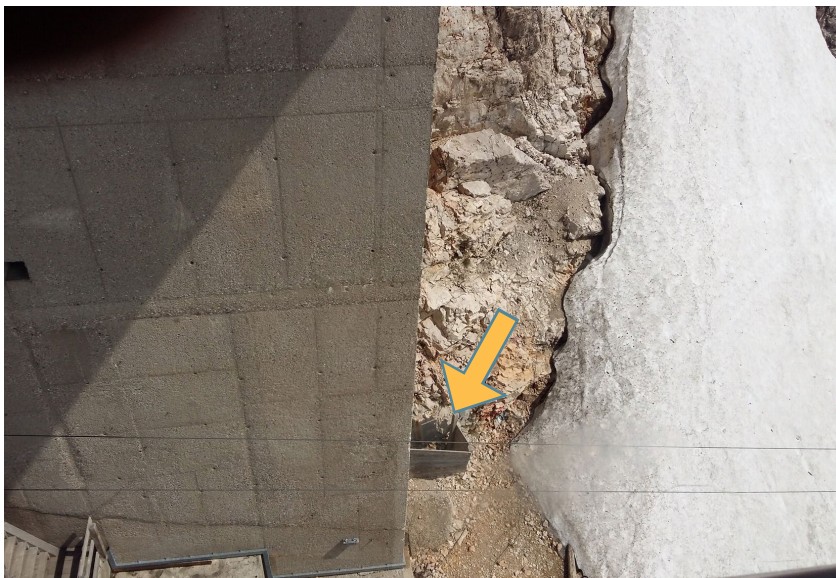


Abb. 5: südlicher Ansatzpunkt der Bohrung mit vorgelagertem Schutzbau am 26. Juli 2019 (Pfeil)

### 3 Grundlagen der Klimamodellierung und Bayerisches Klimaprojektionsensemble

Die Ergebnisse der Permafrostmodellierung in der Zukunft basieren auf Klimaprojektionen. Eine Klimaprojektion ist eine mögliche Entwicklung des zukünftigen Klimas, die mithilfe einer Modellkette von Treibhausgas- bzw. **Antriebsszenario**, **globalem Klimamodell** und **regionalem Klimamodell** bzw. dessen **Realisationen** berechnet wird. Jedes Glied der Modellkette basiert auf Annahmen, die aus physikalischen Zusammenhängen und weiteren wissenschaftlichen Erkenntnissen der Vergangenheit abgeleitet sind. Da nicht bekannt ist, inwiefern diese Annahmen auch in der Zukunft in gleicher Art weiterbestehen und Modelle stets eine bestmögliche, aber nie exakte Abbildung der Realität darstellen, kann eine Klimaprojektion nie eine genaue Vorhersage sein, sondern immer nur eine mögliche Entwicklung der Zukunft. Daher wird immer ein Ensemble von Klimaprojektionen ausgewertet.

Die **RCP-Antriebsszenarien** (RCP = „representative concentration pathways“) des 5. IPCC-Berichtes stellen Szenarien eines zusätzlichen Strahlungsantriebes, also eines zusätzlichen Wärmeinhalts der Atmosphäre dar. Während RCP8.5 als Szenario ohne Klimaschutz interpretiert wird, steht das RCP2.6 für das Szenario zur Einhaltung der 2 °C-Obergrenze. Beide Szenarien finden auch in dieser Studie Anwendung.

**Globale Klimamodelle** simulieren physikalisch basiert das Klima in einem relativ groben Raster für die gesamte Erde und berücksichtigen dabei auch Wechselwirkungen mit der Hydrosphäre oder der Kryosphäre. Sie liefern die Eingangsdaten für **regionale Klimamodelle**, welche kleinräumigere Betrachtungen (z. B. für Mitteleuropa) erlauben. Regionale Klimamodelle werden in einem dynamischen (Knoche & Keuler 2017) oder empirisch-statistischen Skalierungsverfahren (Kreienkamp et al. 2017) in nahezu allen renommierten Klimaforschungsinstituten für verschiedene Teilgebiete der Welt entwickelt. Klimaprojektionen, die auf statistischen regionalen Klimamodellen beruhen, liegen zudem meist in **Realisationen** vor. Diese Modellläufe des Regionalmodells werden entweder mit den Anfangsbedingungen aus derselben globalen Klimaprojektion gestartet oder minimalen Variationen davon. Der Methodik statistischer Regionalmodelle wohnt ein gewisser Anteil von statistischem Zufall inne. Daher erzeugen die Modelle in ihren Realisationen im Rahmen einer vorgegebenen modellinternen Variabilität unterschiedliche Ergebnisse.

Das Bayerische Klimaprojektionsensemble („Bayern-Ensemble“) ist die aktuelle, qualitätsgeprüfte und biasadjustierte Datengrundlage für Aussagen zum zukünftigen Klima in Bayern, bestehend aus 12 Klimaprojektionen beim Antriebsszenario RCP8.5. Hinsichtlich der Modelle setzt es sich aus Kombinationen von fünf Globalmodellen, vier dynamischen regionalen Klimamodellen und zwei Realisationen mit dem statistischen regionalen Klimamodell WETTREG zusammen (Tab. 1). Für das Antriebsszenario RCP2.6 sind es acht Projektionen aus der Kombination von drei Global- und fünf Regionalmodellen. Die Auswahl erfolgte mithilfe des Bayerischen Klimaprojektionsaudits, welches die möglichst plausible Wiedergabe des gemessenen Klimas durch die Modelle zugrunde legt. Genaueres zur Klimamodellierung und zur Zusammensetzung des Bayerischen Klimaprojektionsensembles beschreibt unter anderem die Publikation: „Das Bayerische Klimaprojektionsensemble-Audit und Ensemblebildung“ (LfU 2020).

Tab. 1: Das bayerische Klimaprojektionsensemble (Bayern-Ensemble). Farblich markiert sind die Projektionen, die für die Permafrostmodellierung berücksichtigt werden konnten.

Globalmodell	Regionalmodell	Zeitraum	RCP2.6	RCP8.5
ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1	KNMI-RACMO22E	1951–2100		x
ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1	UHOH-WRF361H	1970–2100		x
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17	1951–2100	x	x
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	KNMI-RACMO22E	1951–2100	x	x
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	SMHI-RCA4	1970–2100	x	x
MIROC-MIROC5_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17	1951–2100	x	x
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CEC-WETTREG2018	1951–2100		x
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	UHOH-WRF361H	1970–2099		x
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CEC-WETTREG2018	1951–2100	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17	1951–2100	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	SMHI-RCA4	1970–2100	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1	UHOH-WRF361H	1970–2100	x	x

## Projektionsauswahl für die Permafrostmodellierung

Folgende zwei Anforderungen sollten die Klimaprojektionen für die Permafrostmodellierung erfüllen:

1. Bestmögliche Übereinstimmung, bzw. Vergleichbarkeit mit dem Bayerischen Klimaprojektionsensemble und
2. Klimadaten auf der räumlichen Auflösung einer Klimastation (hier: DWD-Station am Zugspitzgipfel).

Die dynamischen Klimaprojektionen des Bayernensembles sind nur in einem räumlichen Raster von 5×5 km Auflösung verfügbar. Die Temperaturwerte der Rasterzelle, in welcher die Zugspitze liegt, gelten für die mittlere Gebietshöhe dieser Zelle von 2.285 m, sind demnach deutlich wärmer und für den Standort Zugspitze nicht geeignet. Lediglich das regionale Klimamodell WETTREG hat die Möglichkeit der stationsbasierten Ausgabe und erfüllt die zweite Anforderung. Um der ersten Anforderung gerecht zu werden, erfolgte eine Auswahl geeigneter Realisationen (siehe unten).

WETTREG steht für „WETterlagenbasierte REGionalisierungsmethode“ und wurde von dem Büro CEC Potsdam (CEC 2015) entwickelt. Ausgangspunkt sind Zeitreihen in Tageswertauflösung, in denen jeder Tag (v.a. anhand der Leitgröße Temperatur) einer bestimmten Wetterlage zugeordnet wird und über regional spezifische meteorologische Eigenschaften verfügt. Die Tage der Vergangenheit werden mithilfe eines Zufallsgenerators so neu kombiniert, dass sie der Wetterlage des antreibenden Globalmodells entsprechen. Bis zur Modellgeneration WETTREG2010 erfolgte die Modellierung allein auf Stationsbasis, später kam die Simulation auf Rasterbasis hinzu. WETTREG wird nicht mehr weiterentwickelt. Die letzte Modellgeneration ist WETTREG2018.

Der methodische Ansatz von WETTREG gleicht seine Simulation bereits bestmöglich an die modellierten Stationen an. Ein Audit-Verfahren und eine zusätzliche Bias-Adjustierung der hier verwendeten Realisationen fand daher nicht statt.

Die hiesige Modellierung greift auf die Modellgeneration WETTREG2013 zurück, da nur noch für diese Modellgeneration Stationsdaten verfügbar waren. Zwar enthält das Bayern-Ensemble streng genommen zwei Realisationen mit dessen Nachfolger WETTREG2018, doch wurde dort lediglich die Berechnung von Globalstrahlung und Luftdruck verbessert. Alle weiteren Klimagrößen, insbesondere die Zeitreihe der Lufttemperatur, sind nahezu identisch. Daher können die Realisationen beider Modellgenerationen hinsichtlich der Temperatur als gleich angenommen werden.

Insgesamt bietet WETTREG2013 60 Realisationen mit RCP8.5 (je 10 Realisationen mit 6 verschiedenen Globalmodellantrieben) und 10 Realisationen mit RCP2.6 (10 Realisationen mit einem Globalmodellantrieb, Tab. 2). In der folgenden Analyse zur Auswahl der Realisationen wird nur das Kürzel des Globalmodells verwendet und die von „00“ bis „99“ fortlaufende Realisationsnummer des jeweiligen Modelllaufs angehängt. Auf ein zusätzliches Kürzel für das Regionalmodell (WETTREG) wird der Einfachheit halber verzichtet.

Tab. 2: Liste der zugrundeliegenden globalen Klimamodelle und der dazugehörigen Antriebsszenarien bei der Erstellung der WETTREG2013-Realisationen. Die Kürzel gehen auf das Projekt Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-DE) zurück.

Kürzel Globalmodell	Langname Globalmodell	RCP8.5	RCP2.6
CA2	CCCMa-CanESM2_r1	x	
CM5	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r	x	
ECE	ICHEC-EC-EARTH_r12	x	
HG2	MOHC-HadGEM2-ES_r1	x	
MI5	MIROC-MIROC5_r1i1p1	x	
MP1	MPI-M-MPI-ESM-LR_r1	x	x

Alle 70 verfügbaren Realisationen zu verwenden, würde den Rahmen der Untersuchung übersteigen. Um eine geeignete Auswahl zu treffen, welche gleichzeitig die bestmögliche Vergleichbarkeit mit dem Bayerischen Klimaprojektionsensemble erlaubt, wurden folgende Varianten angesetzt:

- **Variante 1:** Realisationen des Bayernensembles mit RCP8.5 (2 Realisationen)
- **Variante 2:** maximale Bandbreite der Temperatur-Änderung des WETTREG2013-Ensembles mit RCP8.5 (7 Realisationen)
- **Variante 3:** Vergleich der Emissionsszenarien RCP8.5 mit RCP2.6 (4 Realisationen)

## Hinweis zu Variante 1

Die beiden WETTREG-Realisationen des bayerischen Klimaprojektionsensembles stellen jeweils die erste Realisation mit den Globalmodellantrieben von MOHC-HadGEM2-ES\_r1 und MPI-M-MPI-ESM-LR\_r1 dar. Die Nummerierung der Realisationen in den Rasterdaten des Bayern-Ensembles (von „r1“ bis „r10“) weicht von der der Stationsdaten (von „00“ bis „99“) ab. Der Abgleich der Verläufe der beiden Varianten ergab aber, dass die jeweils erste Realisation der Rasterdaten auch der ersten Realisation der Stationsdaten entspricht.

## Vorgehen zur Auswahl für Variante 2 und 3

Die Auswahl geeigneter Realisationen geschah anhand des Temperaturänderungssignals gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000. Es wurde zunächst das jeweilige Minimum, Maximum und der Median des RCP8.5- bzw. RCP2.6-Ensembles im hydrologischen Jahr sowie im Winter- und Sommerhalbjahr für die nahe (2021–2050), mittlere (2041–2070) und ferne Zukunft (2071–2100) ausgelesen. Tab. 3 listet die ausgewählten Realisationen entsprechend der o. g. Kriterien auf und gibt zudem die dazugehörigen Temperatur-Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 an. Die Auswahlentscheidung fiel anhand der fernen Zukunft, da dort das stärkste Änderungssignal vorliegt:

- Ausgewählt wurden einerseits die Realisationen mit minimaler bzw. maximaler T-Änderung im jeweiligen Jahresabschnitt. Zeigten mehrere Realisationen ein ähnliches Signal in den Halbjahren bzw. ergänzten sich diesbezüglich, wurde die Vorauswahl ggf. reduziert. Die Auswahl umfasste hier 5 Realisationen mit RCP8.5 und 4 Realisationen mit RCP2.6.
- Für RCP8.5 erfolgte ergänzend die Wahl zweier Realisationen, die im hydrologischen Jahr jeweils am nächsten ober- bzw. unterhalb des Medians liegen.

Tab. 3: Übersicht über ausgewählte WETTREG2013-Realisationen mit dazugehörigen Temperatur-Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000. Abkürzungen der Zukunftszeiträume: nZ – nahe Zukunft (2021–2050), mZ – mittlere Zukunft (2041–2070), fZ – ferne Zukunft (2071–2100).

Farbig hervorgehobene Werte gehören zum jeweiligen fett markierten Auswahlkriterium:

Rot: Maximum, blau: Minimum, grün: Median;

Kürzel der zugrundeliegenden Globalmodelle siehe Tab. 2

## Bayern-Ensemble RCP8.5

Kürzel Globalmodell, Emissionsszenario und Realisationsnummer	Temperaturänderung vs. 1971–2000 [°C]				Bemerkung/ Auswahlkriterium
	Jahresabschnitt	nZ	mZ	fZ	
HG2_RCP85_00	Hyd. Jahr	2,49	3,54	5,25	<b>Member des Bayerischen Klimaprojektionsensembles</b> , näherungsweise auch <b>Maximum</b> RCP8.5,fZ, hyd Jahr + WhJ
	Hyd. WhJ	2,38	3,40	5,20	
	Hyd ShJ	2,60	3,68	5,30	
MP1_rcp85_00	Hyd. Jahr	1,46	2,39	3,79	<b>Member des Bayerischen Klimaprojektionsensembles</b> T-Änderung unterhalb Median, aber nicht minimal
	Hyd. WhJ	1,42	2,30	3,73	
	Hyd ShJ	1,50	2,48	3,85	



### Weitere Realisationen RCP8.5

Kürzel Globalmodell, Emissionsszenario und Realisationsnummer	Temperaturänderung vs. 1971–2000 [°C]				Bemerkung/ Auswahlkriterium
	Jahresabschnitt	nZ	mZ	fZ	
CM5_rcp85_77	Hyd. Jahr	1,17	2,14	3,48	Minimales Temperatur-Signal bis Ende des Jahrhunderts bei RCP8.5 im hyd. Jahr
	Hyd. WhJ	1,21	2,32	3,51	
	Hyd ShJ	1,12	1,96	3,45	
MP1_rcp85_44	Hyd. Jahr	1,40	2,38	3,68	Minimales Temperatur-Signal bis Ende des Jahrhunderts bei RCP8.5 im hyd. WhJ
	Hyd. WhJ	1,35	2,29	3,39	
	Hyd ShJ	1,44	2,47	3,97	
HG2_RCP85_11	Hyd. Jahr	2,55	3,73	5,30	Maximales Temperatur-Signal bis Ende des Jahrhunderts bei RCP8.5 im hyd. WhJ
	Hyd. WhJ	2,59	3,82	5,34	
	Hyd ShJ	2,50	3,64	5,26	
CM5_rcp85_88	Hyd. Jahr	1,12	2,07	3,55	Minimales Temperatur-Signal bis Ende des Jahrhunderts bei RCP8.5 im hyd. ShJ
	Hyd. WhJ	1,42	2,41	3,94	
	Hyd ShJ	0,82	1,73	3,16	
MI_RCP85_55	Hyd. Jahr	2,67	3,61	5,15	Maximales Temperatur-Signal bis Ende des Jahrhunderts bei RCP8.5 im hyd. ShJ
	Hyd. WhJ	2,26	3,12	4,70	
	Hyd ShJ	3,08	4,08	5,59	
CA2_RCP85_77	Hyd. Jahr	2,19	3,11	4,76	Nächste Realisation oberhalb des Medians (Wert = 4,51 °C) im hyd. Jahr fZ
	Hyd. WhJ	2,34	3,12	4,58	
	Hyd ShJ	2,05	3,11	4,93	
ECE_RCP85_88	Hyd. Jahr	1,79	2,71	4,27	Nächste Realisation unterhalb des Medians (Wert = 4,51 °C) im hyd. Jahr fZ
	Hyd. WhJ	2,07	2,95	4,50	
	Hyd ShJ	1,51	2,47	4,04	

### Realisationen RCP2.6

Kürzel Globalmodell, Emissionsszenario und Realisationsnummer	Temperaturänderung vs. 1971–2000 [°C]				Bemerkung/ Auswahlkriterium
	Jahresabschnitt	nZ	mZ	fZ	
MP1_RCP26_88	Hyd. Jahr	0,85	1,09	0,82	Minimales Temperatur-Signal bis Ende des Jahrhunderts bei RCP2.6 im hyd. Jahr + WhJ
	Hyd. WhJ	0,76	1,07	0,75	
	Hyd ShJ	0,94	1,11	0,88	
MP1_RCP26_11	Hyd. Jahr	0,85	1,04	0,87	Minimales Temperatur-Signal bis Ende des Jahrhunderts bei RCP2.6 im hyd. ShJ
	Hyd. WhJ	1,02	1,24	1,05	
	Hyd ShJ	0,68	0,84	0,68	
MP1_RCP26_00	Hyd. Jahr	0,84	1,01	1,06	Maximales Temperatur-Signal bis Ende des Jahrhunderts bei RCP2.6 im hyd. Jahr + WhJ, Member des BY-Ensembles
	Hyd. WhJ	0,95	1,15	1,23	
	Hyd ShJ	0,72	0,87	0,89	
MP1_RCP26_55	Hyd. Jahr	0,79	0,98	1,01	Maximales Temperatur-Signal bis Ende des Jahrhunderts bei RCP2.6 im hyd. ShJ
	Hyd. WhJ	0,81	1,00	1,05	
	Hyd ShJ	0,78	0,96	0,97	

Für alle Jahresabschnitte und Zeiträume wurden ergänzend Änderungs-Thermopluviogramme der ausgewählten Realisationen erstellt (Abb. 6, Abb. 7, Abb. 8, bzw. Anhang 1). Die darin enthaltene Niederschlagsänderung (y-Achse) hatte auf die Bewertung keinen Einfluss, erleichterte aber die optische Unterscheidung der verschiedenen Modellläufe. Die Symbolisierung kennzeichnet, welches Auswahlkriterium auf die Realisation zutrifft (z. B. Dreieck = Minimum/Maximum im hydrologischen

Jahr, Abb. 6). Es zeigt sich, dass diese Realisationen in den Halbjahren nicht zwingend ähnlich starke Änderungen besitzen wie im Gesamtjahr. So liegen die beiden Modellläufe, die im Sommerhalbjahr die geringste bzw. stärkste Änderung besitzen (Abb. 8, Kasten) im Winterhalbjahr eher in der Mitte der Bandbreite.

Die Thermopluviogramme enthalten für das hydrologische Jahr auch die Projektionen des Bayern-Ensembles, um eine Einordnung von WETTREG2013 in dessen Bandbreite zu ermöglichen. Der Vergleich der Temperatur-Änderungen fand auf der räumlichen Ebene der Klimaregion Alpen statt (Abb. 6). Die Bandbreite des WETTREG2013-Ensembles im Antriebsszenario RCP8.5 ergibt mit +3,5 bis +5,3 °C eine etwas stärkere Temperaturzunahme als die des Bayern-Ensembles (+3,4 bis +5,1 °C). Bei RCP2.6 ordnet sich die Auswahl mit +0,8 bis +1,1 °C eher in der unteren bis mittleren Bandbreite des Bayern-Ensembles ein (+0,8 bis +1,6 °C). Grund ist, dass bei diesem Antriebsszenario für WETTREG2013 nur Realisationen eines einzigen Globalmodells mit eher moderatem Temperaturanstieg zugrunde liegen. Diese Einordnung ist vor allem qualitativ zu werten, da sich die räumliche Auflösung unterscheidet: Während die Änderungen des hier verwendeten WETTREG2013-Ensembles für einen Stationspunkt gelten, stellt die Temperaturänderung für die Klimaregion Alpen einen Mittelwert von vielen Rasterzellen dar.

Zusammengefasst haben alle hier dargestellten Projektionen, bzw. Realisationen gemein, dass die Lufttemperatur bis zur fernen Zukunft ansteigt. Besonders stark ist diese Zunahme im Szenario „ohne Klimaschutz“ (RCP8.5), im Szenario der 2 °C-Obergrenze (RCP2.6) bleibt sie moderat. Die Bandbreite der Änderung scheint bei RCP8.5 im Sommerhalbjahr etwas größer zu sein als im Winterhalbjahr, bei RCP2.6 ist dies anders herum.

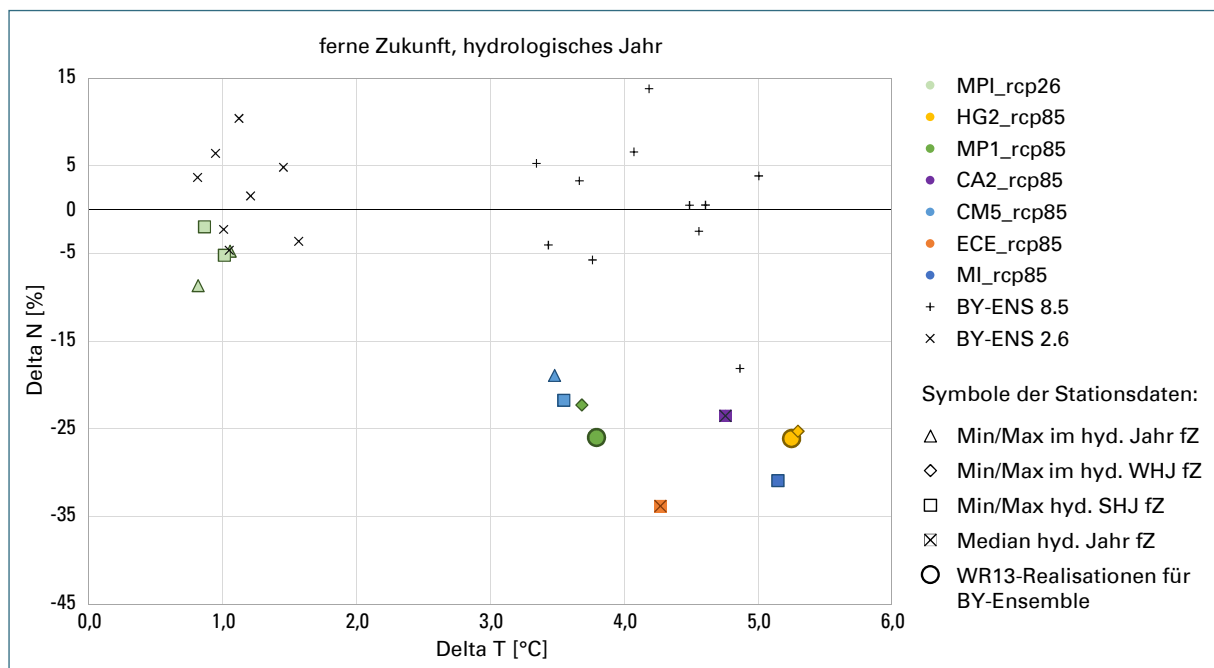


Abb. 6: Verteilung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen der ausgewählten WETTREG2013-Realisationen (farbige Symbole) sowie des Bayern-Ensembles (+ / X) in der fernen Zukunft im hydrologischen Jahr





## 4 Modellierung und Vergleich der Mess- und Rechenergebnisse 2013 bis 2019

Die Berechnung der Gesteinstemperaturen für die Jahre 2013 bis 2019 erfolgt zunächst auf Basis des unveränderten Rechenprogramms, das für die im ersten Projektbericht (LfU 2017a) beschriebenen Berechnungen verwendet wurde. Als Eingabedaten für Umgebungstemperatur, Globalstrahlung, Schneehöhe, etc. dienen wieder die vom DWD veröffentlichten Messdaten für die Zugspitze (DWD 2021). Abb. 9 zeigt den Verlauf der Umgebungstemperaturen 2013 bis 2019 mit den gleitenden Mittelwerten der jeweils vergangenen 365 Tage.

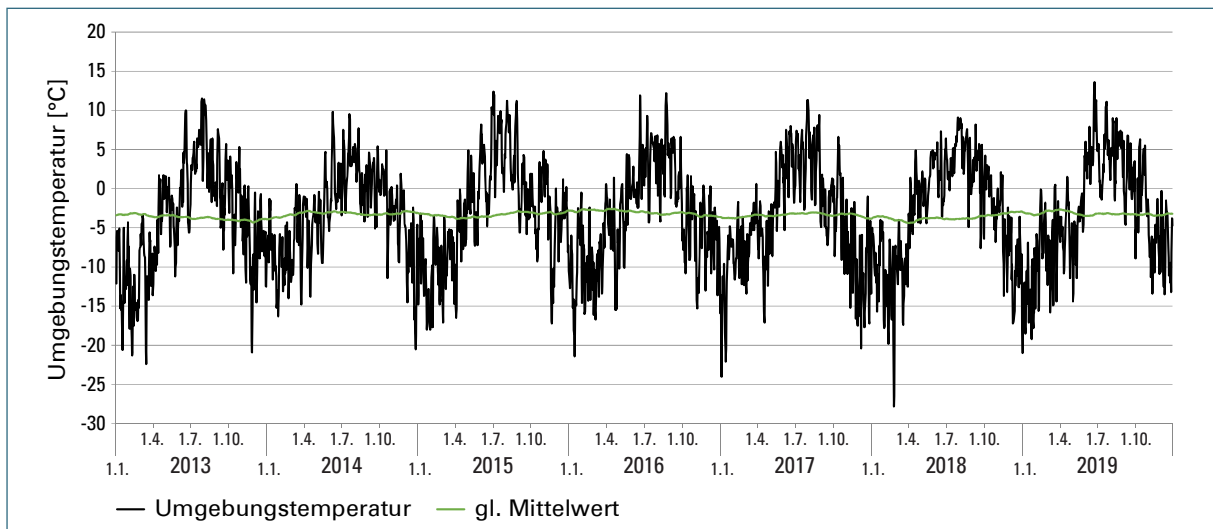


Abb. 9: Gemessene Umgebungstemperaturen 2013 - 2019 mit gleitenden Mittelwerten (365 Tage)

Der Verlauf der Schneehöhen im Betrachtungszeitraum geht aus Abb. 10 hervor, deutlich erkennbar ist das Maximum im ersten Halbjahr 2019, das die „Schneekatastrophe“ in der Region zu Anfang des Jahres 2019 widerspiegelt.

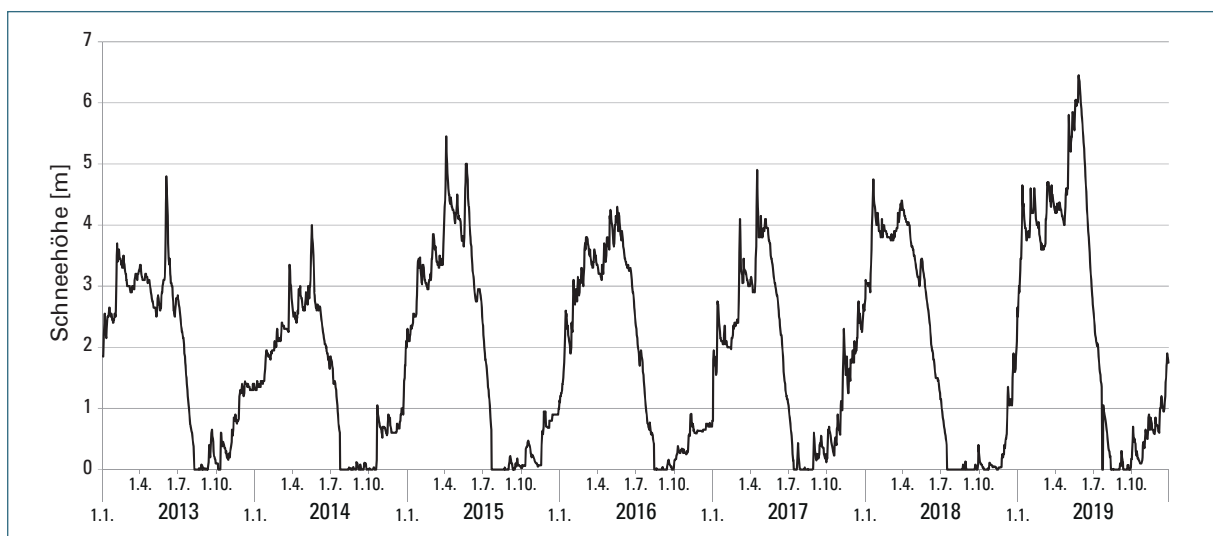


Abb. 10: Gemessene Schneehöhen auf der Zugspitze 2013 bis 2019

Die Messwerte der Gesteinstemperaturen in 0,5 m Entfernung von der südlichen Oberfläche (Abb. 11) zeigen ab Winter 2015/16 deutlich verminderte Schwankungen im Winterhalbjahr, was sich allerdings nicht in den Berechnungen niederschlägt (Linie „Rechnung A“). Es ist anzunehmen, dass die Veränderung durch den Schutzbau (siehe Abb. 5) am südlichen Ende des Bohrlochs hervorgerufen wird, hinter dem sich in der kalten Jahreszeit eine stabile dämmende Schneeschicht bildet. Im Rechenmodell wird dies durch eine alternative Schneemodellierung berücksichtigt: anstatt relativ schneller Abschmelzungen bei gemessenen Verringerungen der Schneehöhe wird von einer langanhaltenden Dämmwirkung durch Schnee von November bis April ausgegangen. Die entsprechenden Rechenergebnisse (Linie „Rechnung B“) zeigen eine verbesserte Übereinstimmung mit den Messwerten im Winterhalbjahr.

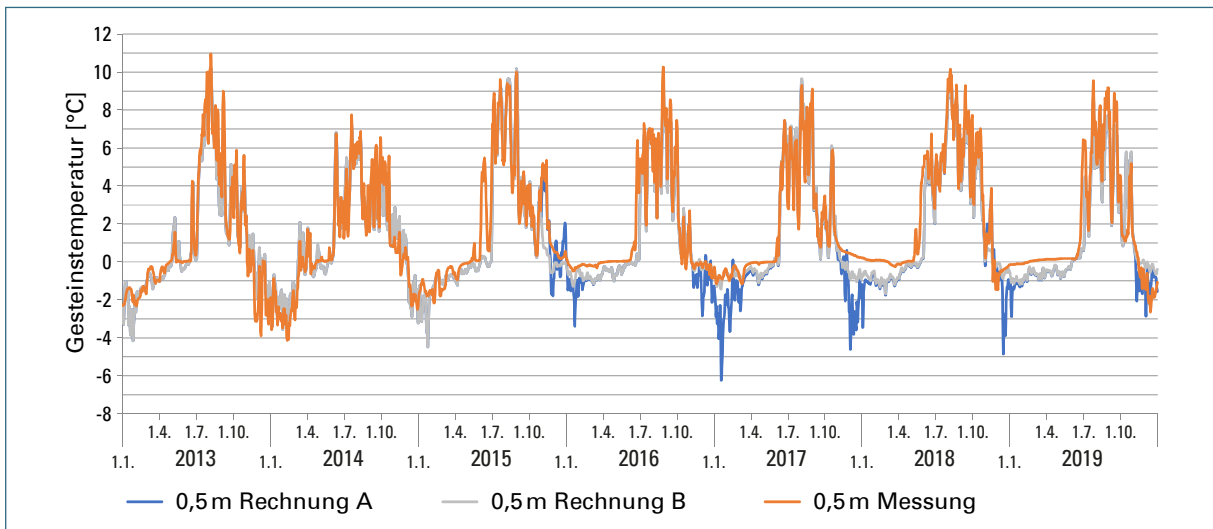


Abb. 11: Mess- und Rechenergebnisse der Gesteinstemperaturen in 0,5 m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt

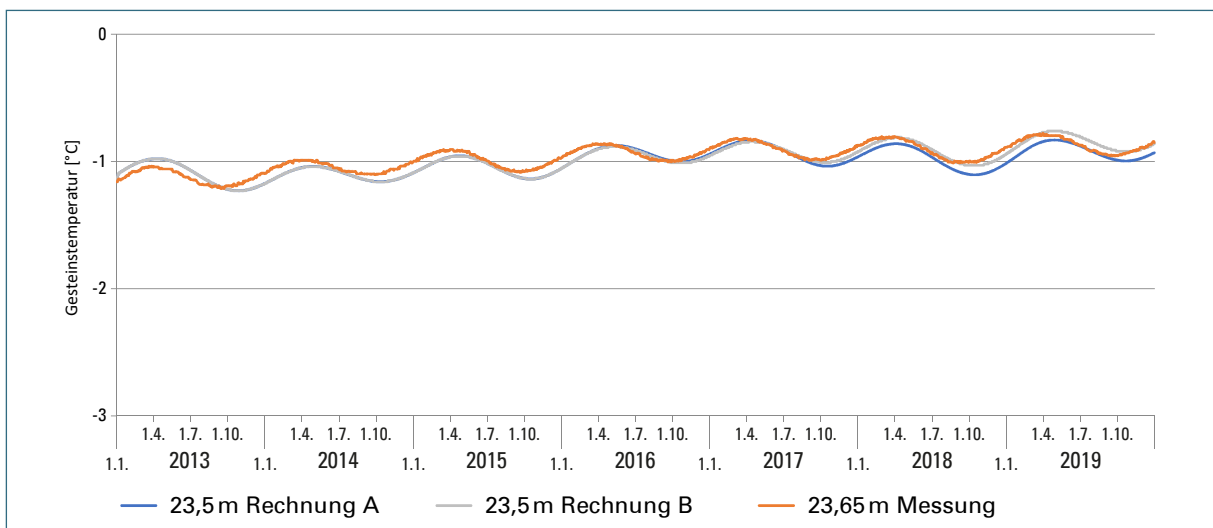


Abb. 12: Mess- und Rechenergebnisse der Gesteinstemperaturen in 23,65 / 23,5 m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt

Angesichts der in Kapitel 2 beschriebenen Definition des Klimaindiktors für das Schwinden des Permafrosts als „Jahres-Maximum der Tagesmitteltemperaturen im Permafrostbereich in 23,65 m Distanz von der Südwand des Zugspitzgipfels“ werden die entsprechenden Messwerte mit den relevanten Rechenergebnissen in 23,50 m Entfernung verglichen. Es zeigt sich eine etwas bessere Übereinstimmung der Rechenwerte mit angepasstem Schneemodell (Rechnung B) mit den Messergebnissen bei insgesamt geringen Unterschieden zwischen den Ergebnissen der beiden Rechnungen.

Die in Tab. 4 wiedergegebenen Mess- und Rechenergebnisse für den Klimaindikator zeigen einen deutlichen Aufwärtstrend bei diesen Gesteinstemperaturen, allerdings liegen sie immer noch klar unter dem Gefrierpunkt. Die Differenzen zwischen Mess- und Rechenwerten liegen bei maximal 0,06 K und damit im Bereich der Messgenauigkeit.

Tab. 4: Mess- und Rechenergebnisse der Jahresmaxima der Gesteinstemperaturen in 23,65 / 23,5 m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt, Angaben in °C.

Jahr	Messung	Rechnung A (ohne Vorbau)	Rechnung B (mit Vorbau)
2013	-1,04	-0,98	-0,98
2014	-0,99	-1,04	-1,04
2015	-0,90	-0,96	-0,96
2016	-0,86	-0,87	-0,88
2017	-0,82	-0,84	-0,84
2018	-0,80	-0,86	-0,81
2019	-0,78	-0,83	-0,76

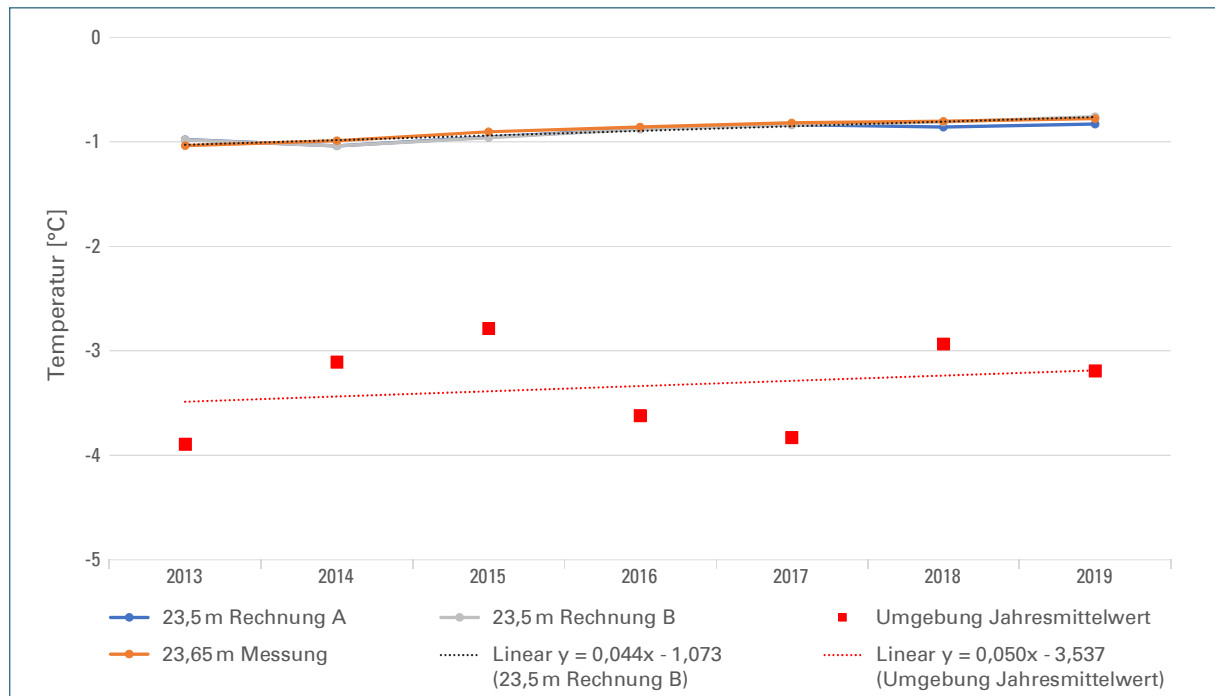


Abb. 13: Mess- und Rechenergebnisse der Jahresmaxima der Gesteinstemperaturen in 23,65 / 23,5 m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt sowie Jahresmittelwerte der Umgebungstemperaturen mit Trendlinien

Die grafische Darstellung (Abb. 13) verdeutlicht die verringerte Differenz zwischen Mess- und Rechenwerten in den Jahren 2018 und 2019 durch die Anpassung des Schneemodells (Rechnung B). Die Jahresmittelwerte der Umgebungstemperaturen zeigen in der Trendlinie eine leichte Aufwärtstendenz, ihre Steigung ist etwas höher als die Steigung der Trendlinie des Klimaindikatoren (in Abb. 13 am Beispiel der Ergebnisse von Rechnung B dargestellt). Dabei ist allerdings zu beachten, dass sich die Steigung der Trendlinie der Jahresmittelwerte der Umgebungstemperaturen in dem relativ kurzen Betrachtungszeitraum verändert, wenn ein vom Kalenderjahr abweichender Jahreszeitraum für die Mittelwertberechnung gewählt wird.

Wie in LfU (2017a) beschrieben, wird der Permafrost voraussichtlich in etwa 30 m Entfernung von der Südseite am längsten erhalten bleiben. Dies kann durch die Betrachtung der berechneten Jahresmaxima der Gesteinstemperaturen entlang der Bohrachse (für 2019 siehe Abb. 14) untermauert werden, die niedrigsten Werte treten demnach bei etwa 31 m Entfernung von der Südseite auf.

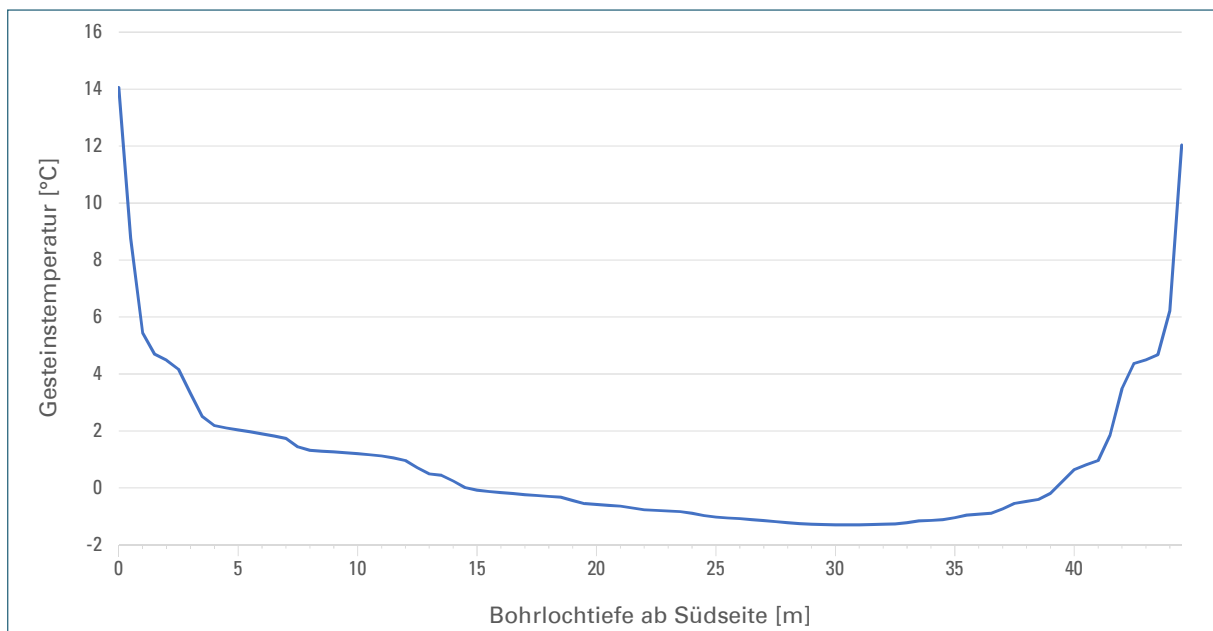


Abb. 14: Berechnete maximale Temperaturwerte über die Bohrlöchtiefe für das Jahr 2019

Die relevante Temperaturmessstelle in diesem Bereich befindet sich in 31,15 m Entfernung von der Südseite. Für die weiteren Untersuchungen zur Rückbildung des Permafrosts werden daher die betreffenden Messwerte und die entsprechenden Rechenwerte bei 31,0 m herangezogen. Abb. 15 zeigt den Aufwärtstrend der Gesteinstemperaturen im Betrachtungszeitraum und den nur geringen Einfluss des gewählten Schneemodells auf die Rechenergebnisse an dieser Stelle. Über den gesamten betrachteten Zeitraum liegen die Temperaturen hier deutlich unter dem Gefrierpunkt.

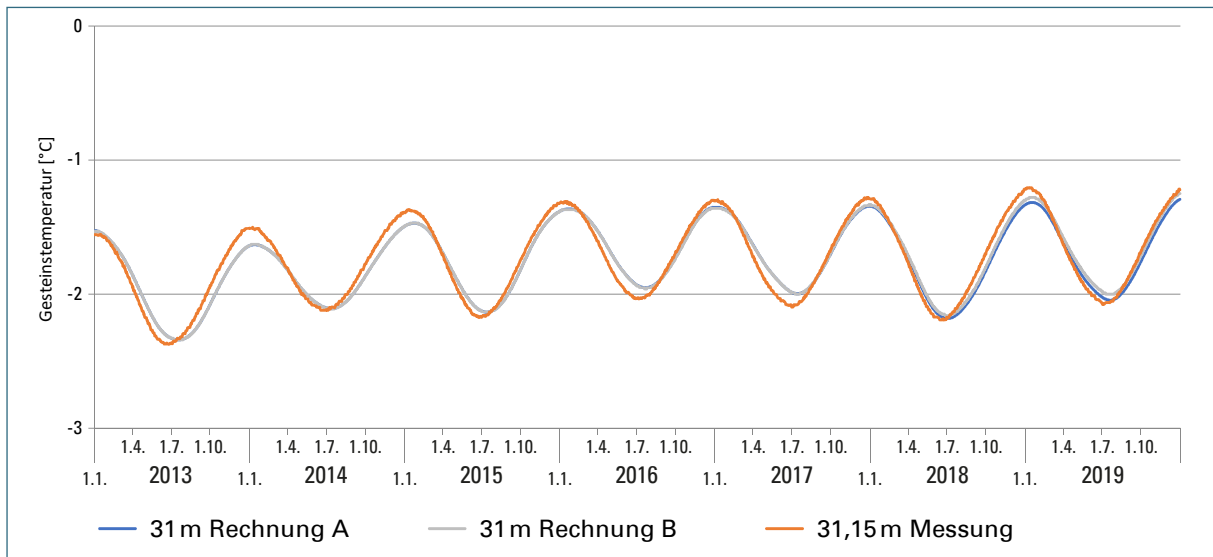


Abb. 15: Mess- und Rechenergebnisse der Gesteinstemperaturen in 31,15 / 31,00 m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt

## 5 Modellrechnungen 1971 bis 2100

Die Berechnungen der Gesteinstemperaturen bis zum Jahr 2100 erfolgen auf Basis der in Kapitel 3 vorgestellten Realisationen der Umgebungstemperaturen, bereitgestellt als Tagesmittelwerte. Als weitere Eingabedaten wie z. B. Globalstrahlung und Schneehöhen werden wieder - wie in den entsprechenden Berechnungen für LfU (2017a) - durchgehend die relevanten DWD-Messdaten für das Jahr 2015 verwendet. Zudem kommt das ursprüngliche Schneemodell zur Anwendung, der derzeit vorhandene Schutzbau an der Südseite wird in der langfristigen Betrachtung also nicht berücksichtigt.

Alle Rechenläufe starten zu Beginn des Jahres 1955 auf der Grundlage des in LfU (2017a) berechneten Profils der Gesteinstemperaturen zu diesem Zeitpunkt. Verwendet werden die Rechenergebnisse ab Anfang 1971, da der Einfluss der Starttemperaturen nach 15 Jahren nicht mehr von Bedeutung ist (wie in LfU (2017a) gezeigt).

Gemäß den Darstellungen in Kapitel 4 konzentriert sich die Analyse auf die berechneten Gesteinstemperaturen in 23,5 m und 31,0 m Entfernung von der Südseite des Zugspitzgipfels. Die entsprechenden Rechenergebnisse werden für alle 13 Realisationen in Bezug zu den gleitenden Mittelwerten der Umgebungstemperatur gesetzt (Mittelwerte der zurückliegenden 365 Tage). Abb. 16 zeigt die Verläufe für die Realisation HG2\_RCP85\_00, einer Realisation mit besonders starkem Temperaturanstieg. Deutlich erkennbar folgen die Gesteinstemperaturen starken Veränderungen der gemittelten Umgebungstemperaturen. Die Gesteinstemperaturen in 31,0 m Entfernung von der Südseite erreichen die Nullgradgrenze im vorliegenden Fall erstmals in den Vierzigerjahren, womit das Ende der Permafrostperiode erreicht wäre.

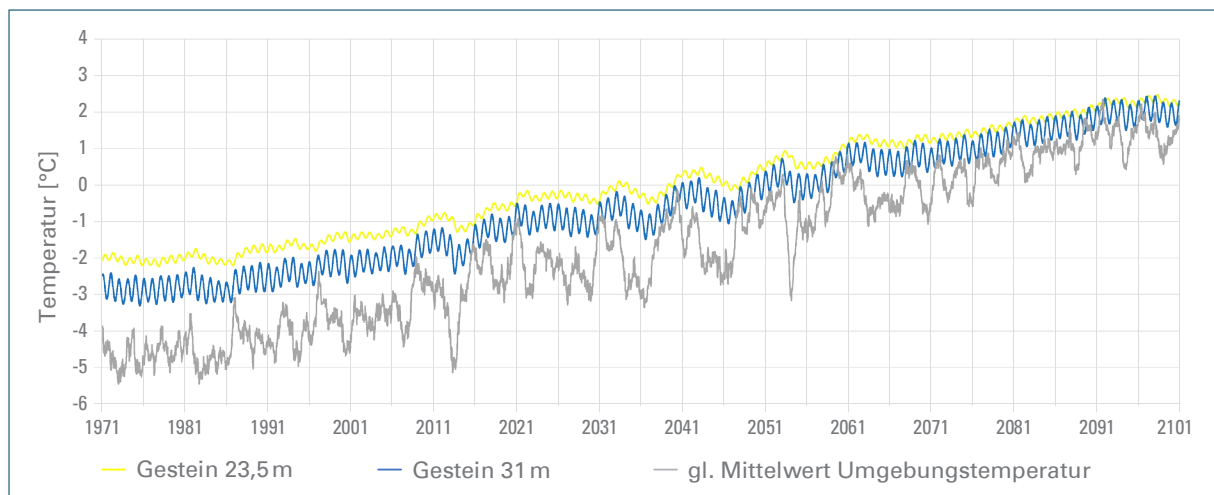


Abb. 16: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 m und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (HG2\_RCP85\_00)

In Anlage 2 sind die entsprechenden Diagramme für die zwölf weiteren Realisationen beigefügt.

Die als Klimaindikator definierten Jahresmaxima der Gesteinstemperatur in 23,5 m Entfernung von der Südseite zeigen für alle Realisationen RCP8.5 einen klaren Aufwärtstrend im Zeitraum 1971 bis 2100. Abb. 17 macht deutlich, dass die Werte zum Ende des Zeitraums klar über der Nullgradgrenze liegen.

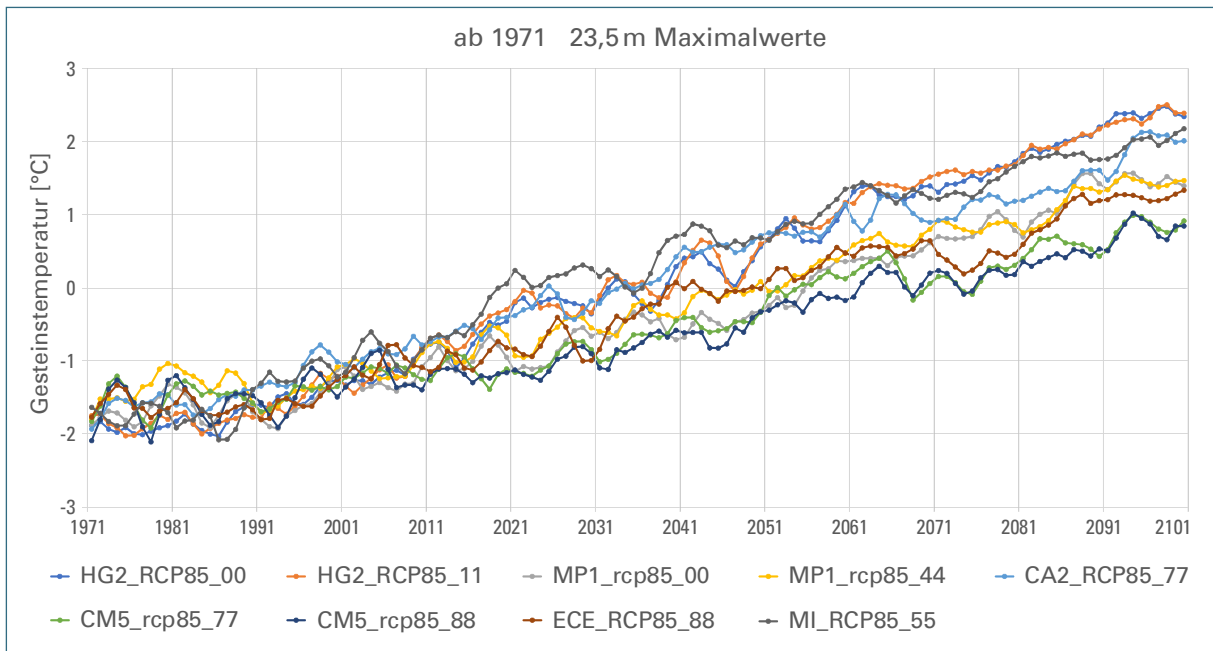


Abb. 17: Jahresmaxima der Gesteinstemperaturen (23,5m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt, RCP8.5)

Für die Realisationen RCP2.6 ergeben sich nach steigenden Gesteinstemperaturen bis Anfang der 50er-Jahre annähernd gleichbleibende Temperaturniveaus in 23,5m Entfernung von der Südseite. In keinem Fall erreichen die Maximaltemperaturen bis 2100 die Nullgradgrenze (Abb. 18).

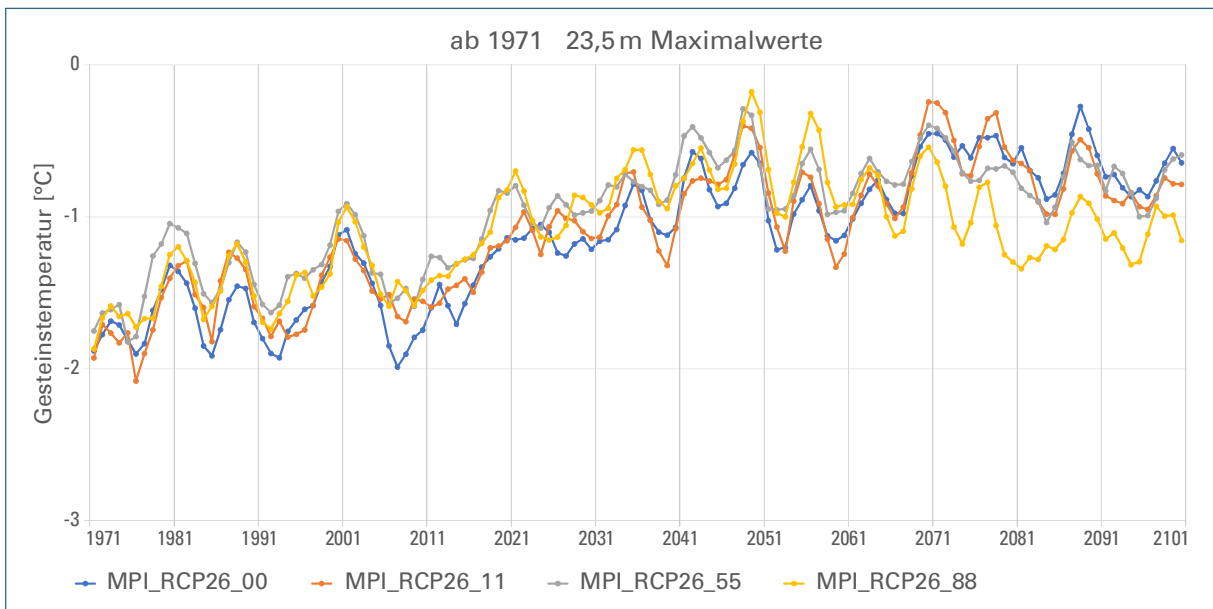


Abb. 18: Jahresmaxima der Gesteinstemperaturen (23,5m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt, RCP2.6)



Zur Beurteilung der Entwicklung des Permafrosts in der Zugspitze dient, wie bereits beschrieben, der berechnete Verlauf der Gesteinstemperaturen in 31 m Entfernung von der Südseite. Vom Ende des Permafrosts ist auszugehen, wenn die jährlichen Maximaltemperaturen über 0 °C ansteigen. Abb. 19 zeigt, dass dies je nach Realisation RCP8.5 zwischen den Dreißiger- und Siebzigerjahren dieses Jahrhunderts eintreten würde. Dabei ist zu beachten, dass die von 2013 bis 2019 gemessenen Gesteinstemperaturen etwa im Mittelfeld der Temperaturen liegen, wie sie auf Basis der Realisationen berechnet wurden.

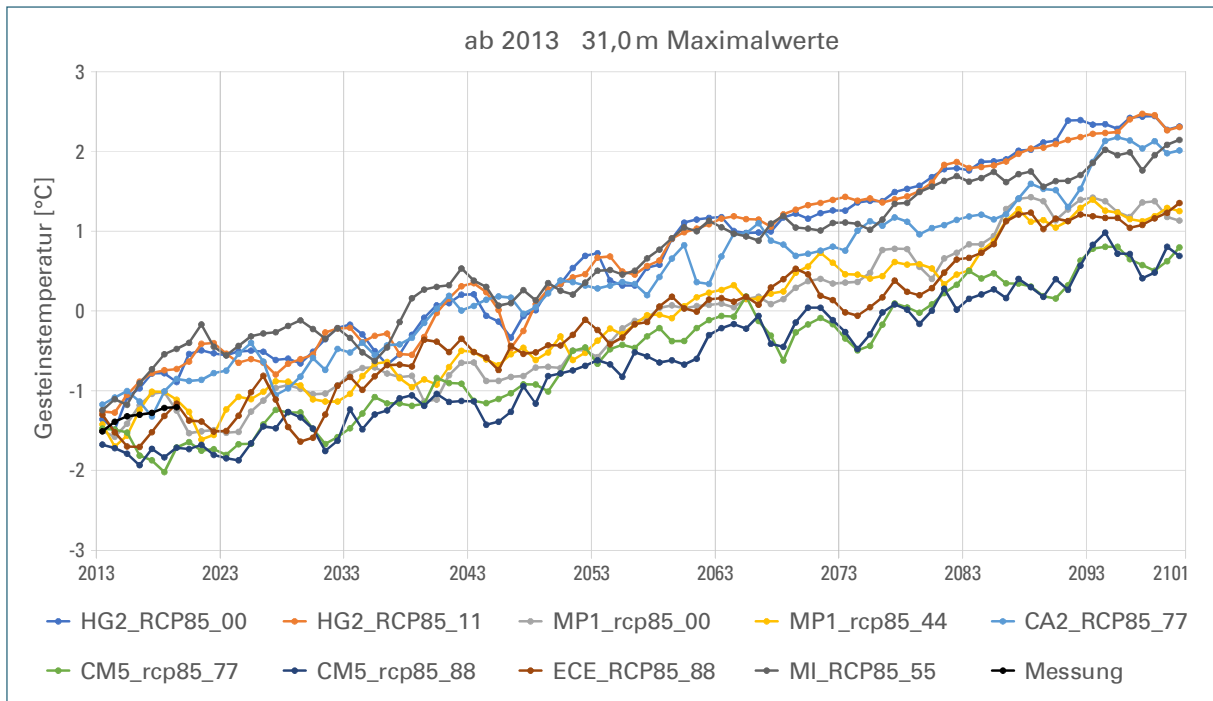


Abb. 19: Jahresmaxima der Gesteinstemperaturen (31,0 m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt, RCP8.5)

Die entsprechende Betrachtung für die Realisationen RCP2.6 zeigt in diesen Fällen kein Auftauen des Permafrosts bis zum Jahr 2100. Allerdings ist auch hier der Vergleich mit den Temperaturmesswerten zu beachten: sie liegen im Messzeitraum über den auf Basis der Realisationen berechneten Temperaturen.

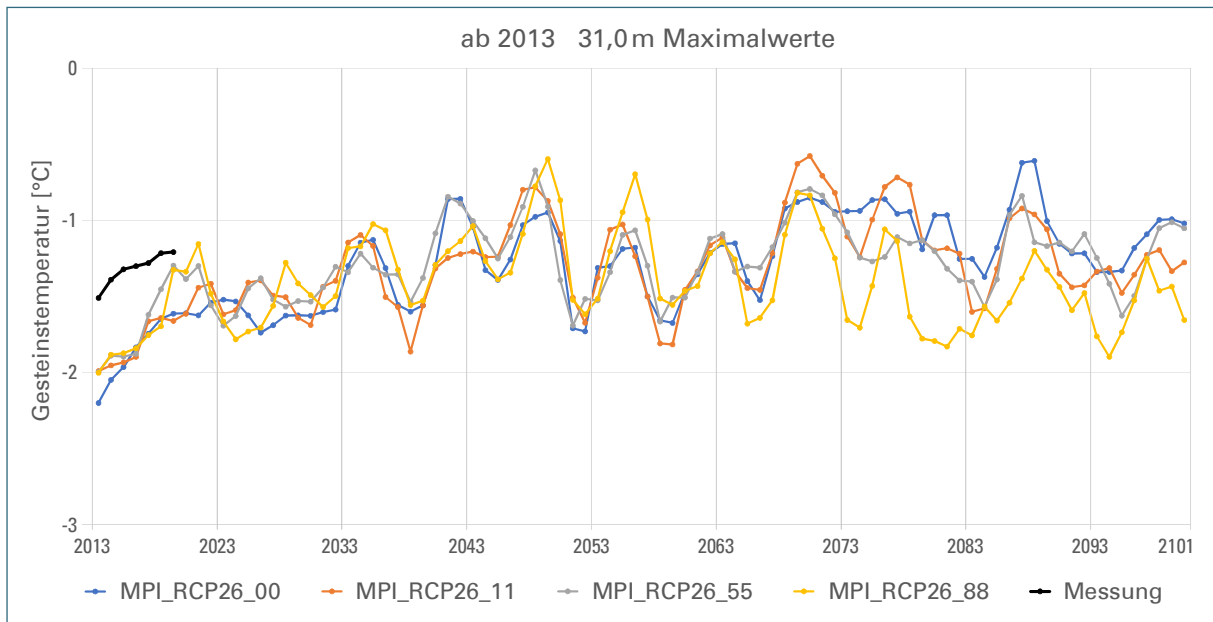


Abb. 20: Jahresmaxima der Gesteinstemperaturen (31,0 m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt, RCP2.6)

Im Folgenden werden die Temperaturentwicklungen in den in Kapitel 3 vorgestellten 30-Jahres-Zukunftszeiträumen 2021–2050 (nZ - nahe Zukunft), 2041–2070 (mZ - mittlere Zukunft) und 2071–2100 (fZ - ferne Zukunft) sowie im Referenzzeitraum 1971–2000 analysiert. In Tab. 5 sind die Mittelwerte der Umgebungs- und Gesteinstemperaturen (23,5 m) für die drei Zeiträume und die einzelnen Realisationen aufgelistet. Auch hier wird die Erwärmung insbesondere bei den Realisationen RCP8.5 deutlich.

Tab. 5: 30-Jahres-Mittelwerte von Umgebungs- und Gesteinstemperaturen (23,5 m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt), alle Angaben in [°C].

Kürzel Globalmodell, Emissionsszenario und Realisationsnummer	1971–2000		2021–2050		2041–2070		2071–2100	
	Umgebung	Gestein 23,5 m	Umgebung	Gestein 23,5 m	Umgebung	Gestein 23,5 m	Umgebung	Gestein 23,5 m
HG2_RCP85_00	-4,30	-1,36	-1,79	-0,07	-0,74	0,72	0,97	1,88
HG2_RCP85_11	-4,42	-1,35	-1,86	-0,05	-0,68	0,79	0,90	1,89
MP1_rcp85_00	-4,14	-1,42	-2,64	-0,72	-1,73	-0,08	-0,31	1,06
MP1_rcp85_44	-4,05	-1,22	-2,65	-0,48	-1,66	0,17	-0,37	1,04
CA2_RCP85_77	-4,11	-1,06	-1,90	0,04	-0,99	0,72	0,67	1,40
CM5_rcp85_77	-4,25	-1,31	-3,06	-0,81	-2,09	-0,16	-0,75	0,44
CM5_rcp85_88	-4,26	-1,36	-3,13	-0,90	-2,20	-0,32	-0,71	0,38
ECE_RCP85_88	-4,34	-1,34	-2,55	-0,46	-1,62	0,18	-0,06	0,79
MI_RCP85_55	-4,40	-1,14	-1,73	0,29	-0,78	0,90	0,75	1,64
MPI_RCP26_00	-4,14	-1,64	-3,29	-1,07	-3,13	-0,96	-3,07	-0,73
MPI_RCP26_11	-4,16	-1,60	-3,31	-1,01	-3,11	-0,91	-3,28	-0,79
MPI_RCP26_55	-4,14	-1,40	-3,33	-0,84	-3,15	-0,77	-3,13	-0,82
MPI_RCP26_88	-4,13	-1,49	-3,29	-0,86	-3,04	-0,80	-3,31	-1,16

Die grafische Darstellung (Abb. 21) dieser Temperaturdaten mit den entsprechenden Trendlinien für die Zukunftszeiträume zeigt, dass ein Anstieg der mittleren Umgebungstemperaturen im 30-Jahres-Zeitraum um 1 K zu einer Erhöhung der Gesteinstemperaturen in 23,5 m Entfernung von der Südseite in der Größenordnung von 0,65 bis 0,7 K führt. Die Daten für den Referenzzeitraum 1971–2000 stützen die Aussagekraft der Trendlinien für die Zukunftszeiträume.

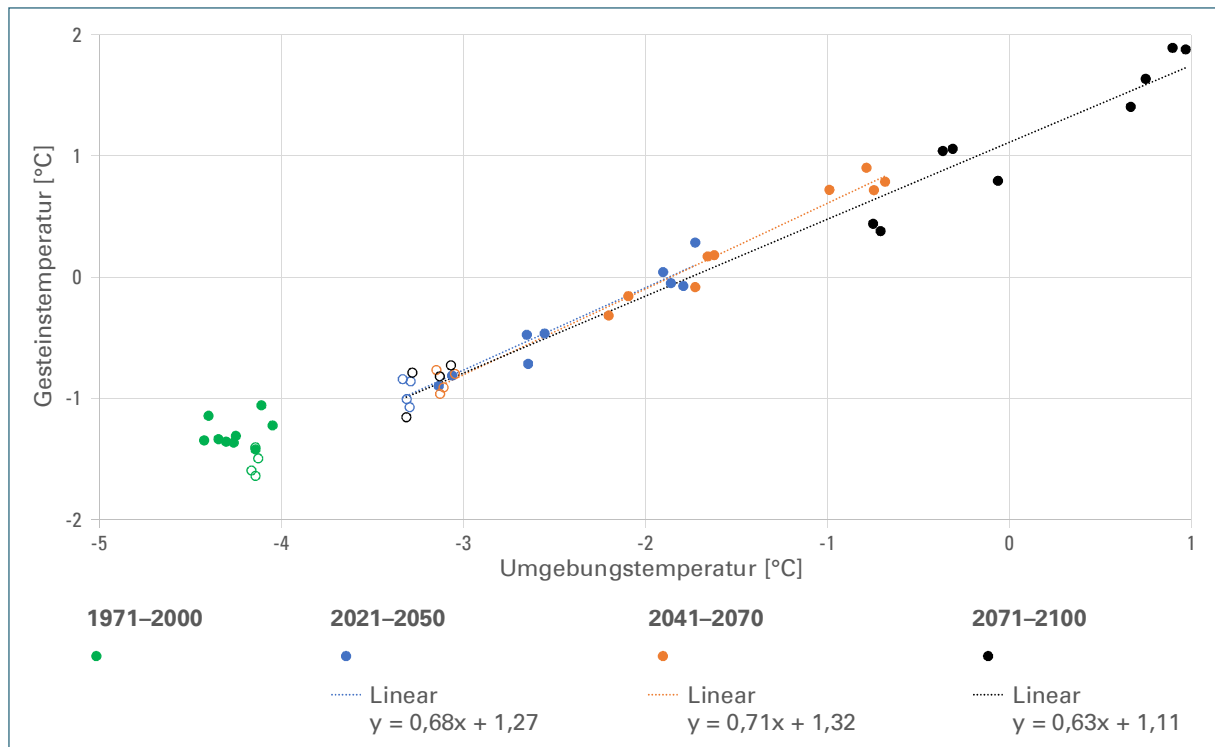


Abb. 21: Mittlere Gesteinstemperaturen (23,5 m Entfernung vom südlichen Bohransatzpunkt) als Funktion der mittleren Umgebungstemperaturen über 30-Jahres-Zeiträume (Realisationen RCP8.5 als Punkte, RCP2.6 als Kreise)

Im folgenden Abschnitt wird die Entwicklung der Gesteinstemperaturen entlang der Bohrachse im Vergleich von Jahresende 2019 und Jahresende 2100 dargestellt. In 31 m Entfernung von der Südseite ergeben sich am 31.12.2019 für die Realisationen RCP8.5 Temperaturwerte im Bereich von  $-2,05$  bis  $-0,68$  °C, der Messwert (bei 31,15 m) liegt bei  $-1,22$  °C (Abb. 22). Beim Vergleich dieser Zahlen ist zu beachten, dass die Daten aus den Klimamodellen eigentlich über einen gewissen Zeitraum gemittelt betrachtet werden müssten. Davon wird hier abgewichen, da so die unmittelbaren Auswirkungen der einzelnen Realisationen auf die Gebirgstemperaturen zu den Betrachtungszeitpunkten besser visualisiert werden können. Weiterhin ist die Temperaturentwicklung des Gesteins immer das Ergebnis eines längerfristigen Klimageschehens, so dass die hier dargestellten Temperaturen im Gebirge bereits das Ergebnis eines mehrjährigen Verlaufs der jeweils zugrunde gelegten Realisationen darstellen.

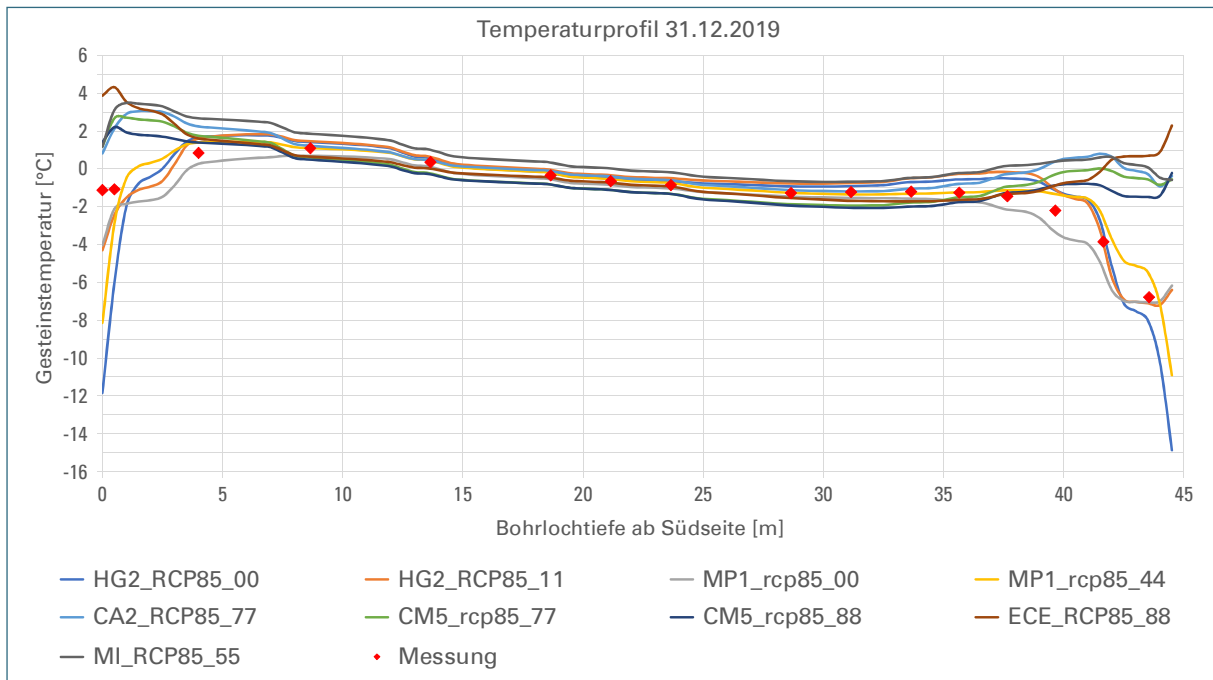


Abb. 22: Gemessene und berechnete Gesteinstemperaturen (RCP8.5) entlang der Bohrachse - 31.12.2019

Die entsprechende Darstellung der berechneten Gesteinstemperaturen zum Ende des Jahres 2100 weist bei 31 m keinen Permafrost mehr auf, die Werte liegen zwischen 0,49 und 2,31 °C.

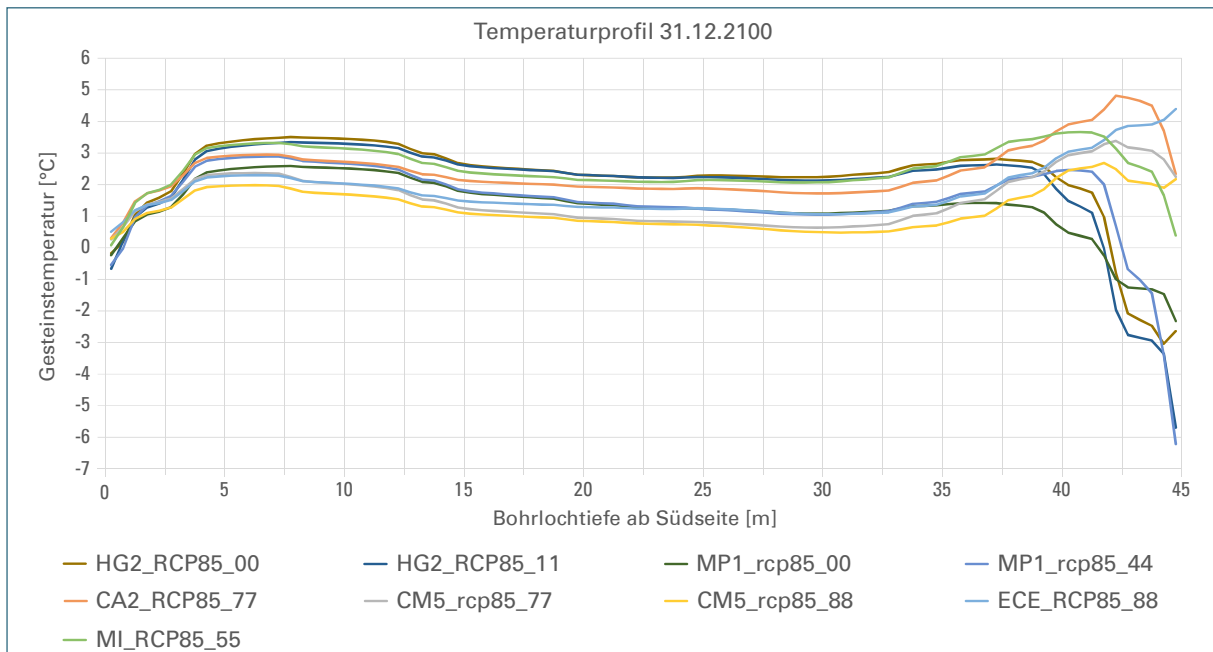


Abb. 23: Berechnete Gesteinstemperaturen (RCP8.5) entlang der Bohrachse zum 31.12.2100

Für die Realisationen RCP2.6 ergeben sich zum Ende des Jahres 2019 berechnete Gesteinstemperaturen in 31 m Entfernung von der Südseite zwischen -1,55 und -1,79 °C, sie liegen damit unter dem relevanten Messwert von -1,22 °C.

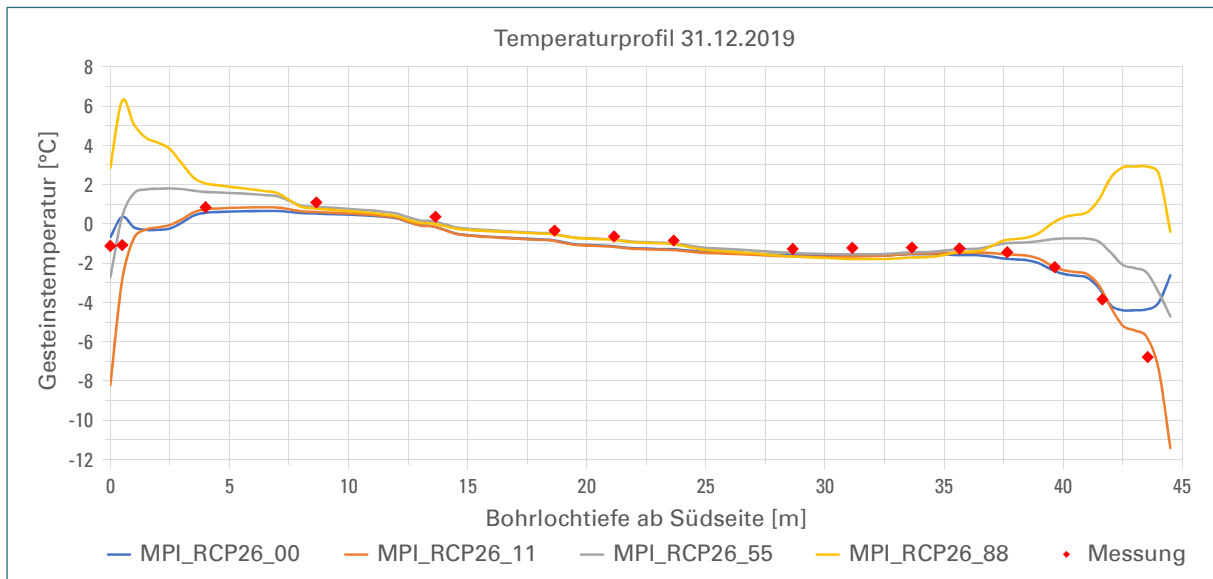


Abb. 24: Gemessene und berechnete Gesteinstemperaturen (RCP2.6) entlang der Bohrachse zum 31.12.2019

Zum Ende des Jahres 2100 ergeben die Berechnungen bei 31 m Werte zwischen  $-1,02$  und  $-1,90$  °C. Wie oben beschrieben, ist bei diesen Realisationen kein Auftauen des Permafrostes zu erwarten (siehe Abb. 20).

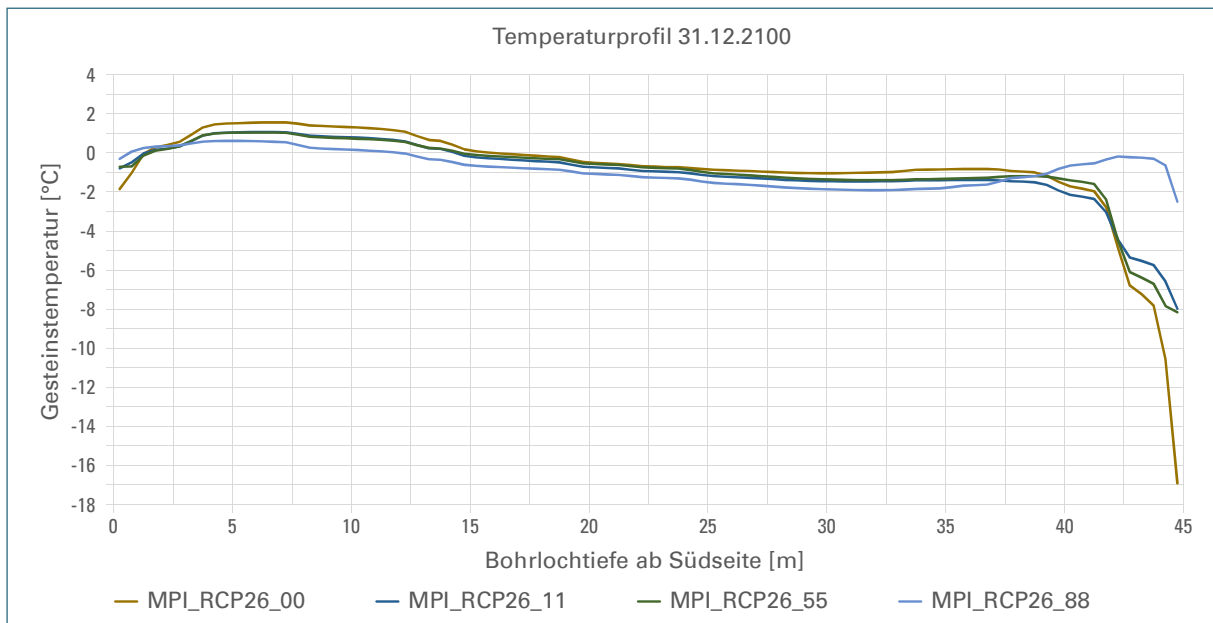


Abb. 25: Berechnete Gesteinstemperaturen (RCP2.6) entlang der Bohrachse zum 31.12.2100

Einen Anhaltspunkt für die Abschätzung des Ausmaßes der Permafrostzone zum Ende des Betrachtungszeitraumes liefert die Anzahl der Tage im Jahr 2100, an denen die berechneten Tagesdurchschnittstemperaturen im jeweiligen Wegsegment die Nullgradgrenze übersteigen (Abb. 26). Je nach Realisation erstreckt sich der Permafrost über etwa 22 m entlang der Bohrachse für die höheren Umgebungstemperaturen gemäß RCP2.6\_00 bzw. über rund 29 m für die niedrigeren Umgebungstemperaturen gemäß RCP2.6\_88. Auch hier gilt wie oben angemerkt, dass eigentlich ein

mehrjähriges Mittel der Realisationen betrachtet werden müsste, so dass die berechneten Daten für das Ende der Simulationsläufe zum 31.12.2100 lediglich als Hinweis auf die ermittelten Trends zu verstehen sind.

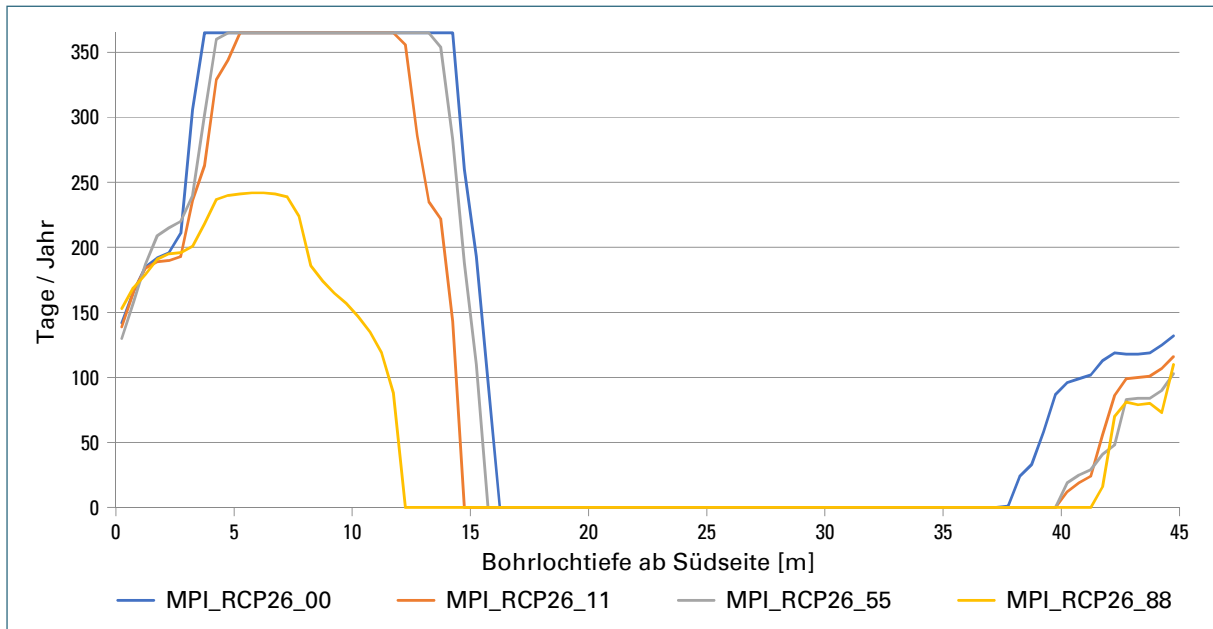


Abb. 26: Berechnete Anzahl der Tage im Jahr 2100 mit Gesteinstemperaturen über 0 °C im jeweiligen Wegsegment entlang der Wegstrecke der Zugspitzbohrung

## 6 Schlussfolgerungen

### Trendbetrachtung der Messungen

Messungen der Temperaturentwicklung der Permafrost-Messstation Zugspitze liegen mittlerweile über einen Zeitraum von über zehn Jahren vor. Im Zeitraum von 2011 bis 2020 ist der Jahresmittelwert der Umgebungstemperatur der Station Zugspitze um einen Betrag von etwa 0,3 K gestiegen. Dies führte korrespondierend zu einem Anstieg der gemessenen Gesteinstemperaturen, der sich exemplarisch gut anhand des Klimaindikatoren (jeweils höchste Temperatur im Jahr des Temperaturfühlers in 23,65 m Abstand vom Süden) zeigen lässt: in den Jahren 2011 bis 2020 stieg die Temperatur weitgehend linear von  $-1,14\text{ °C}$  auf  $-0,73\text{ °C}$ , also um etwa 0,4 K an. Bei einer gleichbleibenden Fortsetzung dieses Trends würde die  $0\text{ °C}$ -Grenze und damit das Ende des Permafrosts in diesem Bereich etwa in 20 Jahren, also um das Jahr 2040 eintreten. Permafrost wäre dann allerdings immer noch im kältesten Bereich der Bohrung (etwa 31 m Entfernung von der Südseite) zu finden.

Anhand der durchgeführten Berechnungen zeigt sich, dass 1 K Erhöhung der mittleren Umgebungstemperatur der Atmosphäre mittelfristig zu ungefähr 0,7 K Erhöhung der Gesteinstemperatur als weitgehend linearem Trend führt, d.h. die Differenz von Umgebungs- und Gesteinstemperatur wird bei höheren Temperaturen immer geringer. Gut zu erkennen ist dies an den entsprechenden Kurvenverläufen der Abb. 16 bzw. Anhang 2, die sich mit fortschreitender Erwärmung immer mehr aneinander annähern.

Erklärbar ist dies daraus, dass die neben der Umgebungstemperatur die Gesteinstemperaturen beeinflussenden Faktoren, insbesondere aus dem Strahlungsantrieb (vor allem der solare Strahlungseinput), weitgehend gleichbleiben, so dass der Beitrag des Energieinputs der Umgebungstemperatur auf die Gesteinstemperatur bei einem Temperaturanstieg bedeutender wird. Zusätzlich nimmt mit zunehmender Gesteinstemperatur der Abstrahlungseffekt nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz überproportional zu, was tendenziell ebenfalls zu einer Angleichung der (wärmeren) Gesteinstemperaturen gegenüber der (kühleren) mittleren Umgebungstemperatur führt.

### Berechnung der Projektionen

Ein Vergleich der Messungen mit den Berechnungen zeigt eine weiterhin sehr gute Übereinstimmung der Modellierung mit den Messdaten; daher wird davon ausgegangen, dass die Berechnungen der Entwicklungen des Permafrosts in die Zukunft bei Eintreten der Szenarien sehr gut mit der jeweiligen Reaktion des Permafrosts auf das Klimageschehen übereinstimmen.

Ein Vergleich der Auswirkungen der jahreszeitlich unterschiedlichen Klimaänderungssignale der Projektionen auf die berechneten Änderungen der Gesteinstemperaturen in den verschiedenen Bohrtiefen zeigt, dass diese im Wesentlichen von der Änderung der mittleren Jahrestemperaturen beeinflusst werden und die jahreszeitliche Differenzierung nach Winter- und Sommerhalbjahr eine eher geringe Rolle spielt. Dies erscheint dahingehend plausibel, als der massive Gesteinskomplex gegenüber dem Temperatugeschehen aufgrund der großen Pufferung stark gedämpft reagiert und damit in Bezug auf saisonale Temperaturschwankungen wenig sensitiv ist. In LfU (2017a) wurde gezeigt, dass ein vollständiger Temperaturengleich für die vorhandene Messtrecke einen Zeitraum von etwa 10 Jahren benötigt. Dieser Wert gilt allerdings nur für die untersuchte Messtrecke in Gipfelnähe der Zugspitze und kann nicht generell auf den alpinen Permafrost übertragen werden, da die Gesteinstiefe und damit die Lage des Permafrosts im Gebirge eine bedeutende Rolle spielt: oberflächennaher Permafrost mag durchaus auf kurzfristige Temperaturänderungen re-

agieren, wohingegen bei oberflächenfernen Permafrostbereichen im Hochgebirge auch sehr langfristige Temperaturänderungssignale bis hin zu Eiszeitzyklen eine Rolle spielen können (Hoelzle et al. 2001).

Hinsichtlich der beiden Realisationen des Bayernensembles zeigt sich, dass diese sich sehr gut in den Kontext der anderen hier ausgewählten Realisationen des WETTREG-Szenarios einfügen: das Szenario HG2\_RCP85\_00 im Bereich des Maximums des Gesamtjahres-Änderungssignals liegt auch hier am oberen Rand, wohingegen das MP1\_RCP85\_00 unterhalb des Medians im Vergleich aller betrachteten Szenarien eine mittlere Position einnimmt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die Ergebnisse des Bayernensembles, wenn man es analog als Modellierungsgrundlage nutzen könnte, gegenüber denen des WETTREG-Ensembles nicht stark unterscheiden dürften. Dies ist wichtig, um die hier vorwiegend mit den Temperaturverläufen des WETTREG-Szenarios erzielten Ergebnisse in den Kontext der bayerischen Klimaprojektionsensembles (LfU 2020) stellen zu können.

## Resümee

Die WETTREG2013-Realisationen zeigen für das Szenario ohne Klimaschutz ein Ende des Permafrosts im Zeitfenster von – je nach Realisation – ungefähr 2040 bis 2080 an. Dies bestätigt die in LfU (2017a) anhand einer einzigen exemplarisch gerechneten Realisation aus dem WETTREG2010-Ensemble getroffene Aussage, dass ein Verschwinden des Permafrosts in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts zu erwarten sei, wobei anhand der aktuellen Modelldaten bei Eintreten einer eher wärmeren Realisation ein etwas früheres Auftauen bereits in den vierziger Jahren dieses Jahrhunderts ebenfalls möglich ist.

Interessant sind die Ergebnisse des RCP2.6 Szenarios, das von einer signifikanten Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgeht. Bei der daraus projizierten Verringerung des Anstiegs der Umgebungstemperaturen wird kein Auftauen des Permafrosts beobachtet. Die berechnete verbleibende Länge des Permafrosts im Bohrloch liegt hier dann bei etwa 22 bis 29 m, was etwa im Bereich der heutigen Permafrostausdehnung liegt (rund 25 m), allerdings gegenüber 1915 (LfU 2017a) mit damals etwa 35 m Permafrost einer Reduzierung um 10 m (rund 30 %) entspricht.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass eine Änderung der CO<sub>2</sub>-Emissionsszenarien im vorliegenden Fall des Permafrosts an der Zugspitze einen deutlichen Einfluss hat: ohne Änderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist – wie schon in LfU (2017a) beschrieben – spätestens im Lauf der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts mit dem Verschwinden des Permafrosts an der Zugspitze zu rechnen, wohingegen bei einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen der Permafrost im etwa gleichen Umfang wie heute erhalten bliebe.



## 7 Literatur

- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2017a): Permafrost-Messstation am Zugspitzgipfel: Ergebnisse und Modellberechnungen. – Bearbeiter: Galleman, T., Haas, U., Teipel, U., von Poschinger, A., Wagner, B., Mahr, M. & Bäse, F., *Geologica Bavarica* **115**: 77 S., Augsburg.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2017b): Indikatoren zu Klimafolgen und Klimaanpassung in Bayern. – *UmweltSpezial*, 66 S., Augsburg.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2020): Das Bayerische Klimaprojektionsensemble. Audit und Ensemblebildung. – Bearbeiter: Zier, C., Müller, C., Komischke, H., Steinbauer, A., Bäse, F., *UmweltSpezial*, 52 S., Augsburg.
- Böckli, L., Nötzli, J. & Gruber, S. (2011b): PermaNET-BY, Untersuchungen des Permafrosts in den Bayerischen Alpen, Schlussbericht Projekt PermaNET im AlpineSpace Programm. – 60 S., im Internet unter: [www.lfu.bayern.de/geologie/permafrost/permanetby/doc/permanet\\_by\\_schlussbericht\\_v2komprimiert.pdf](http://www.lfu.bayern.de/geologie/permafrost/permanetby/doc/permanet_by_schlussbericht_v2komprimiert.pdf) (abgerufen 11.03.2021).
- CEC, CLIMATE & ENVIRONMENT CONSULTING POTSDAM GMBH (2015): WETTREG. Online verfügbar unter [www.cec-potsdam.de/wettreg.html](http://www.cec-potsdam.de/wettreg.html), zuletzt geprüft am 11.11.2020.
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2021): online veröffentlichte Wetterdaten Zugspitze ([www.dwd.de](http://www.dwd.de))
- Hoelze, M., Mittaz, C., Etzelmüller, B. & Haerberli, W. (2001): Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain areas: an overview of current developments. – *Permafrost Periglacial Process*, **12**: 53–68.
- Hope, C. & Schaefer, K. (2016): Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost. *Nature Clim Change* **6**, 56–59. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2807>.
- Knoche, R. & Keuler, K. (2017): Dynamische Regionalisierung. In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.): Regionale Klimamodellierung I. Offenbach am Main, Deutscher Wetterdienst Fachinformationsstelle und Deutsche Meteorologische Bibliothek (promet - Meteorologische Fortbildung, 99), 29–40 S.
- Krautblatter, M., Funk, D. & Günzel, F.K. (2013): Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice mechanical model in time and space. – *Earth Surface Processes and Landforms* **38**: 876–887.
- Krautblatter, M., Kellerer-Pirklsbauer, A. & Gärtner-Roer, I. (2018): Permafrost in den Alpen: Erscheinungsformen, Verbreitung und zukünftige Entwicklung. – *Geographische Rundschau* **11**: 22–29. DOI: <https://doi.org/10.5167/uzh-170231>.
- Kreienkamp, F., Spekat, A. & Hoffmann, P. (2017): Empirisch-Statistisches Downscaling. Eine Übersicht ausgewählter Methoden. – In: Deutscher Wetterdienst (DWD) [Hrsg.]: Regionale Klimamodellierung I - Grundlagen, Deutscher Wetterdienst Fachinformationsstelle und Deutsche Meteorologische Bibliothek, promet - Meteorologische Fortbildung **99**: 20–28 S., Offenbach am Main.
- LfU: siehe Bayerisches Landesamt für Umwelt

- Mamot, P., Weber, S., Eppinger, S. & Krautblatter, M. (2020): Stability assessment of degrading permafrost rock slopes based on a coupled thermo-mechanical model. – *Earth Surface Dynamics, Discussions*, Preprint: 1–45, DOI: <https://doi.org/10.5194/esurf-2020-70>.
- PERMOS (2020): *Swiss Permafrost Bulletin 2018/2019*. – Pellet, C. & Noetzli, J. (eds.), 20 S., DOI: <https://doi.org/10.13093/permos-bull-2020>.
- Ravel, L. & Deline, P. (2011): Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the ‚Little Ice Age‘.– *The Holocene*, 21/2: 357–365, DOI: <https://doi.org/10.1177/0959683610374887>.
- Schröder, T. & Krautblatter, M. (2018). One decade of permafrost monitoring at the Zugspitze (Germany/Austria). – *Geophysical Research Abstracts*, 20, EGU General Assembly 2018.
- StMUV – Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz [Hrsg.] (2021): *Klima-Report Bayern 2021 – Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten*. – Bayerisches Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz (StMUV), 195 S., München.

## Anhang 1: Stationsdaten

Ergänzend zu den Abb. 6 bis Abb. 8 werden hier die Stationsdaten der ausgewählten Realisationen für die mittlere Zukunft (2041 bis 2070) und für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) gezeigt.

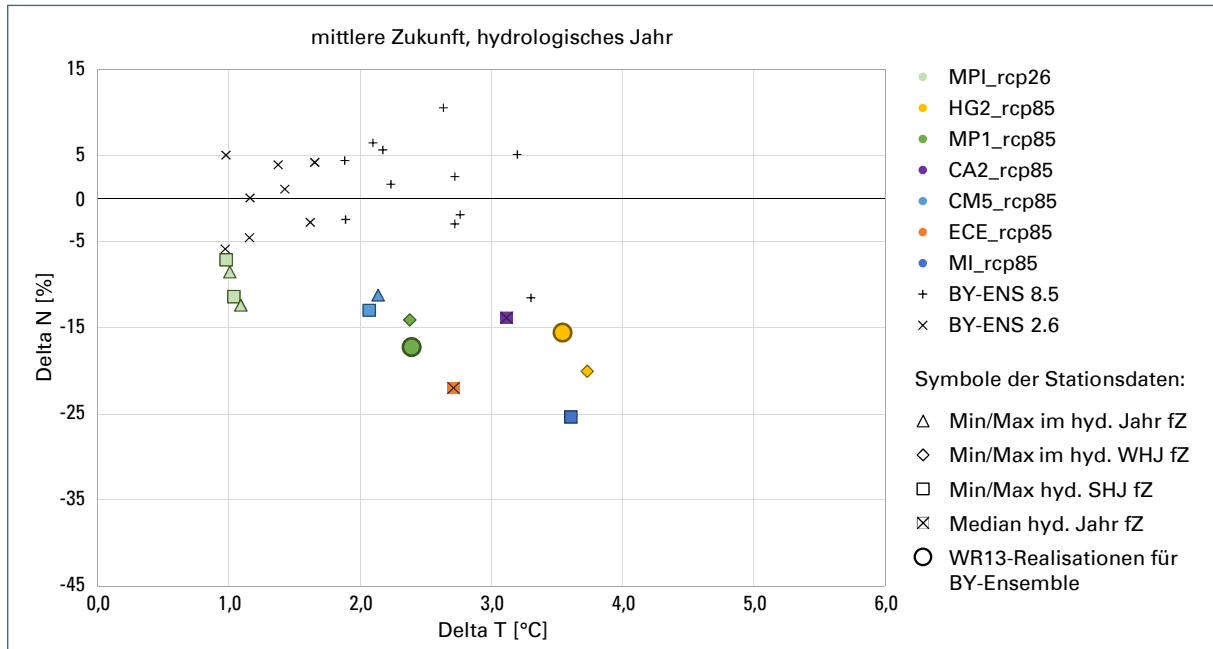


Abb. 27: Verteilung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen der ausgewählten WETTREG2013-Realisationen (farbige Symbole) sowie des Bayern-Ensembles (+ / X) in der mittleren Zukunft im hydrologischen Jahr

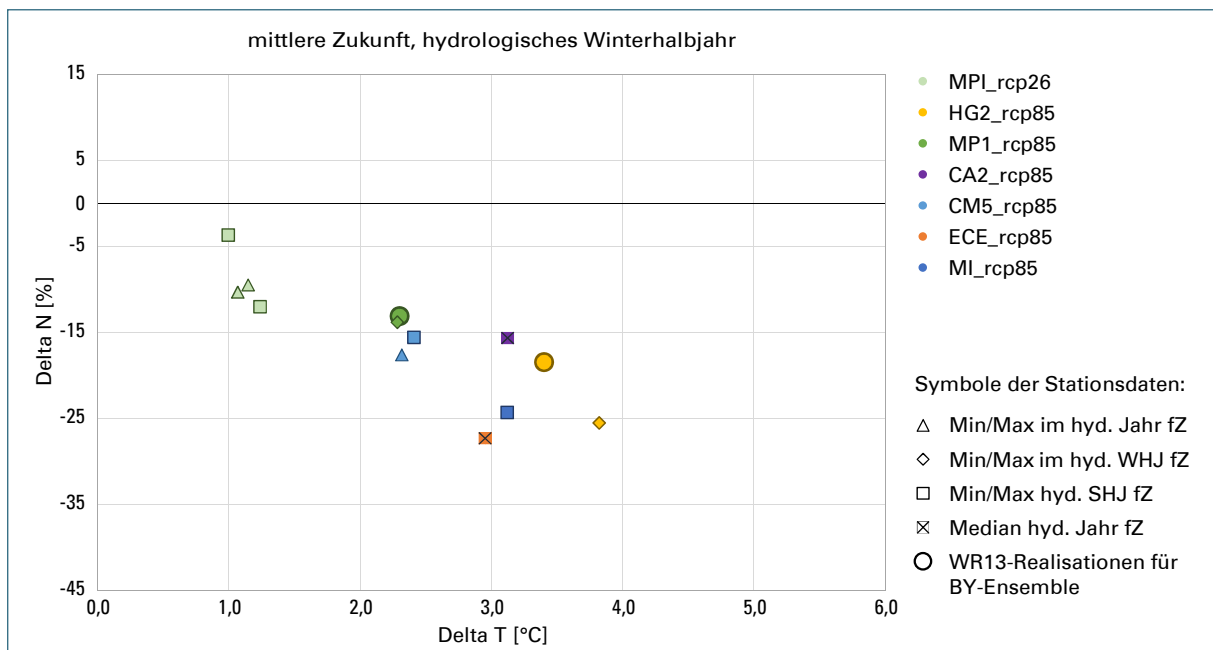


Abb. 28: Verteilung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen der ausgewählten WETTREG2013-Realisationen (farbige Symbole) in der mittleren Zukunft im hydrologischen Winterhalbjahr

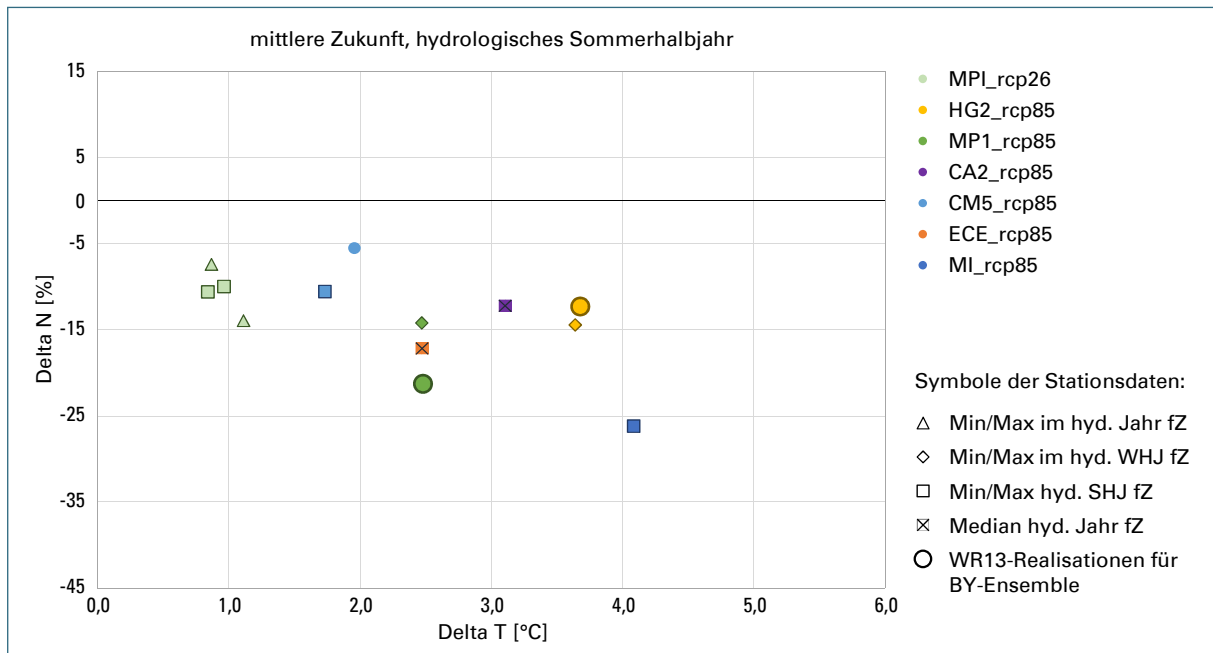


Abb. 29: Verteilung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen der ausgewählten WETTREG2013-Realisationen (farbige Symbole) in der mittleren Zukunft im hydrologischen Sommerhalbjahr

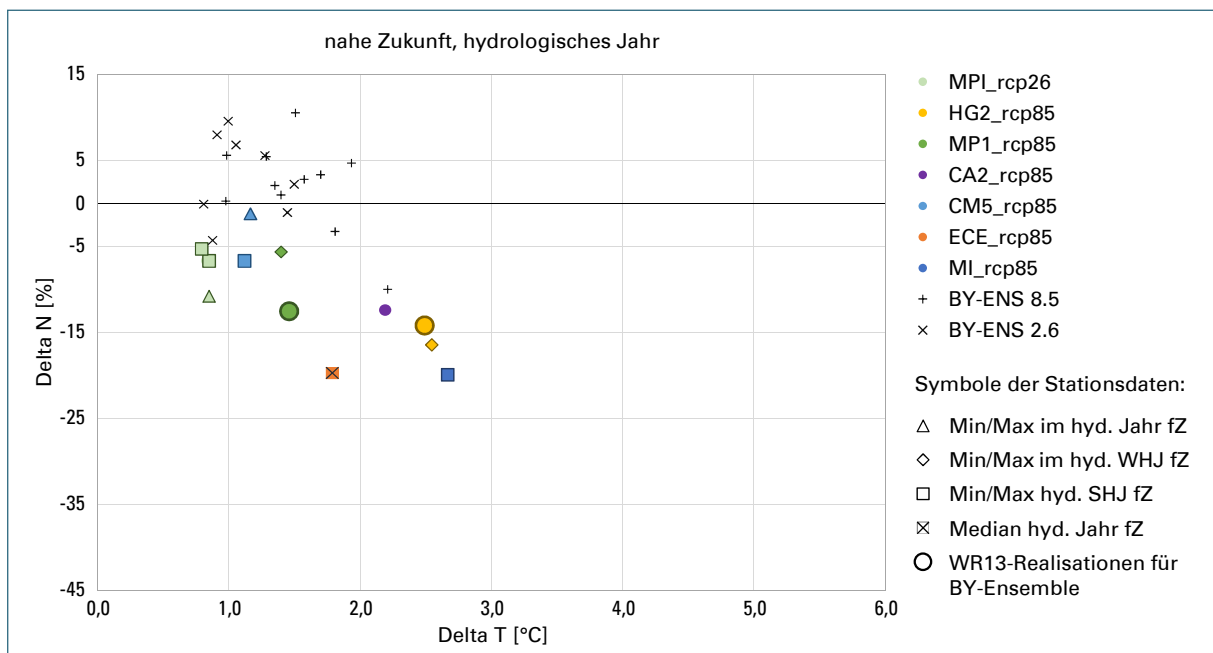


Abb. 30: Verteilung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen der ausgewählten WETTREG2013-Realisationen (farbige Symbole) sowie des Bayern-Ensembles (+ / x) in der nahen Zukunft im hydrologischen Jahr

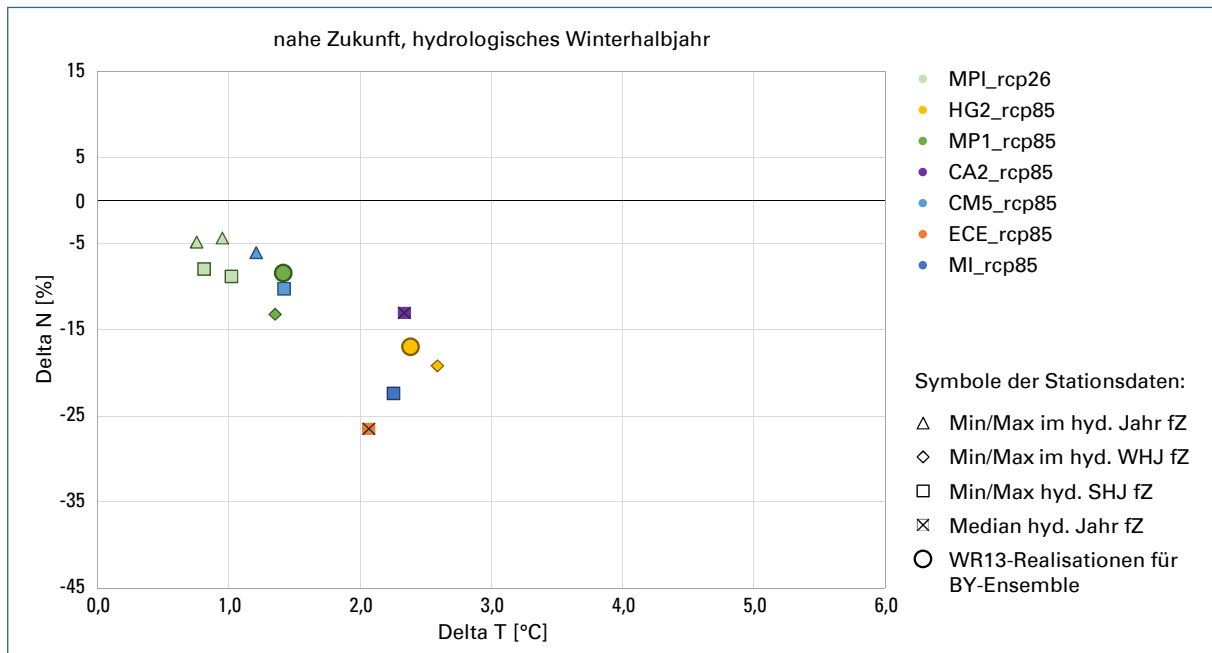


Abb. 31: Verteilung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen der ausgewählten WETTREG2013-Realisationen (farbige Symbole) in der nahen Zukunft im hydrologischen Winterhalbjahr

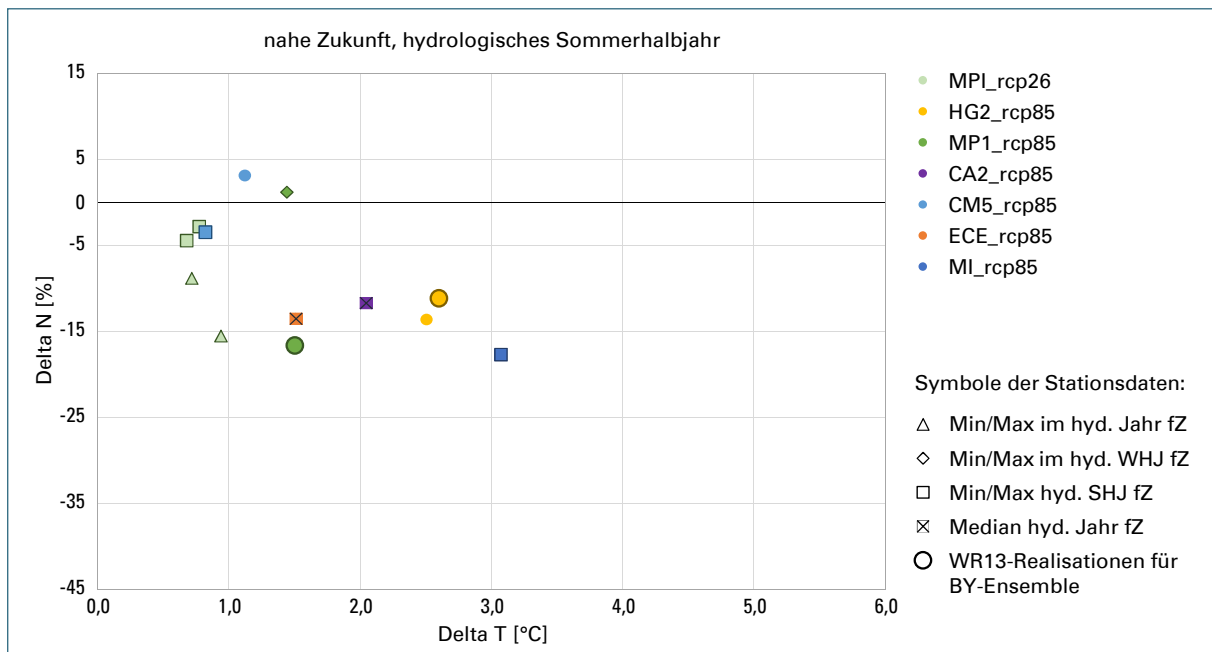


Abb. 32: Verteilung der Temperatur- und Niederschlagsänderungen der ausgewählten WETTREG2013-Realisationen (farbige Symbole) in der nahen Zukunft im hydrologischen Sommerhalbjahr

## Anhang 2: Berechnung der unterschiedlichen Realisationen

Im Folgenden sind die Diagramme mit den berechneten Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite des Zugspitzgipfels und den gleitenden Mittelwerten der Umgebungstemperaturen für den Zeitraum von 1971 bis 2100 ergänzend zu Abb. 16 für die restlichen zwölf hier betrachteten Realisationen dargestellt. Die Diagramme sind nach der Reihenfolge der in Tab. 3 beschriebenen Realisationen sortiert.

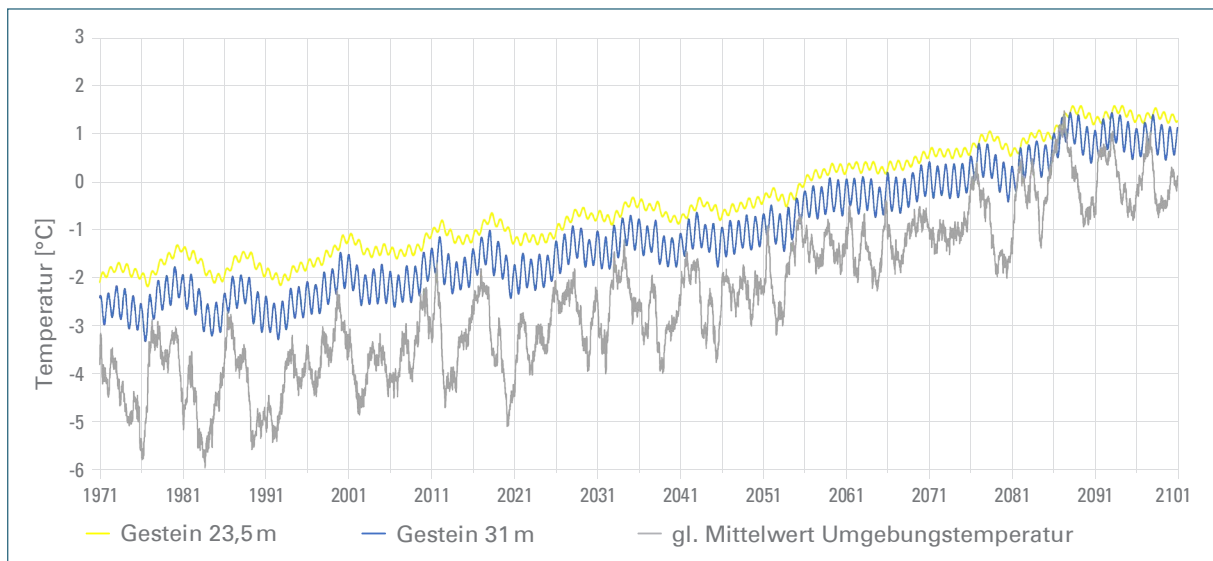


Abb. 33: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (MP1\_rcp85\_00)

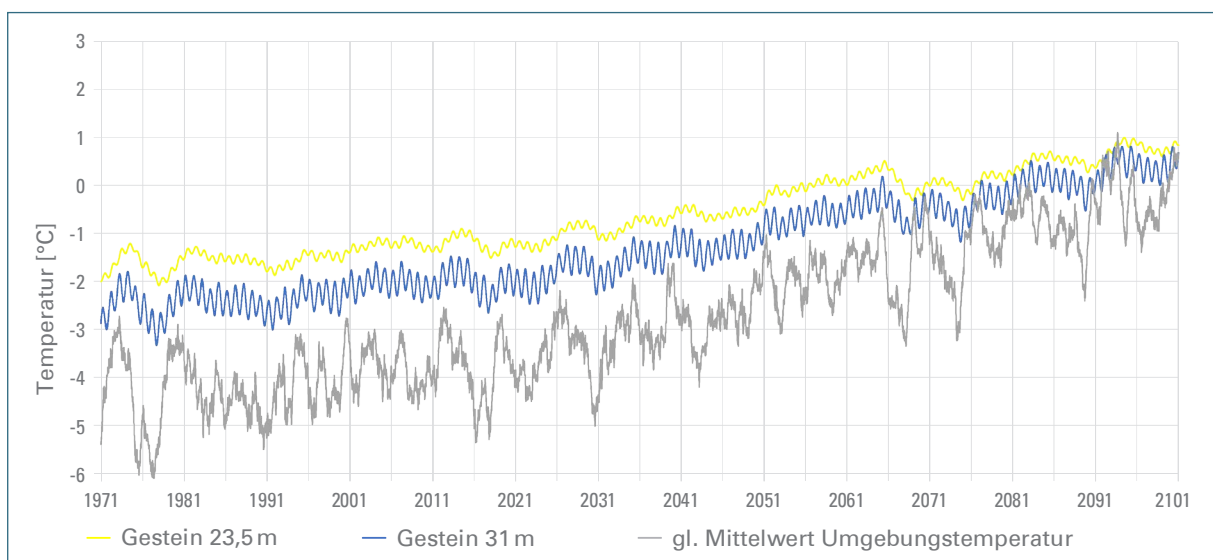


Abb. 34: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (CM5\_rcp85\_77)

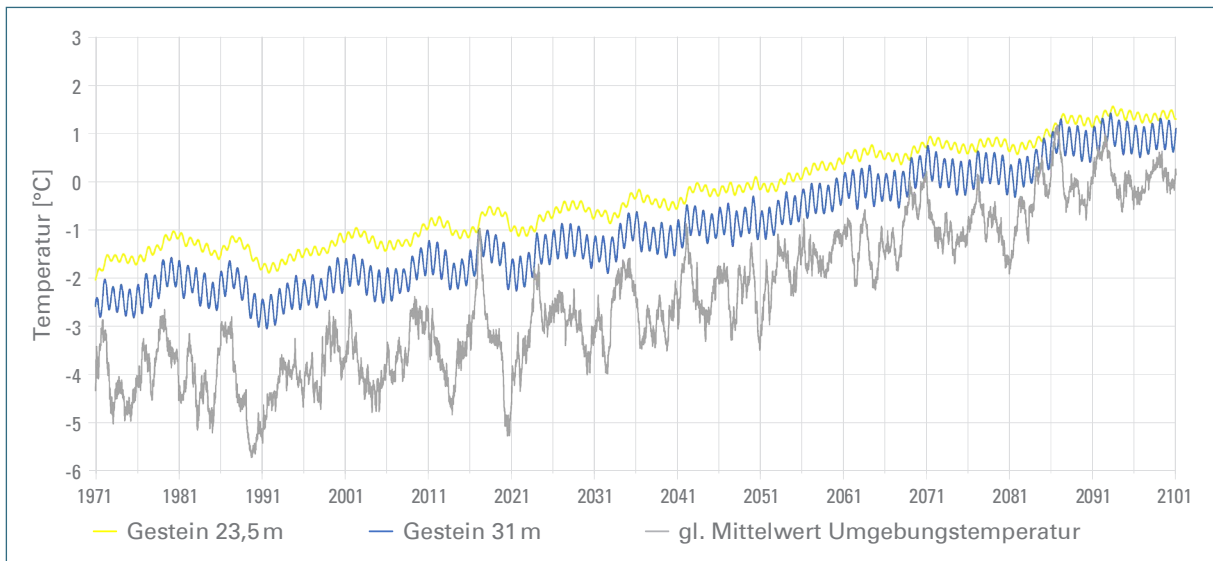


Abb. 35: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (MP1\_rcp85\_44)

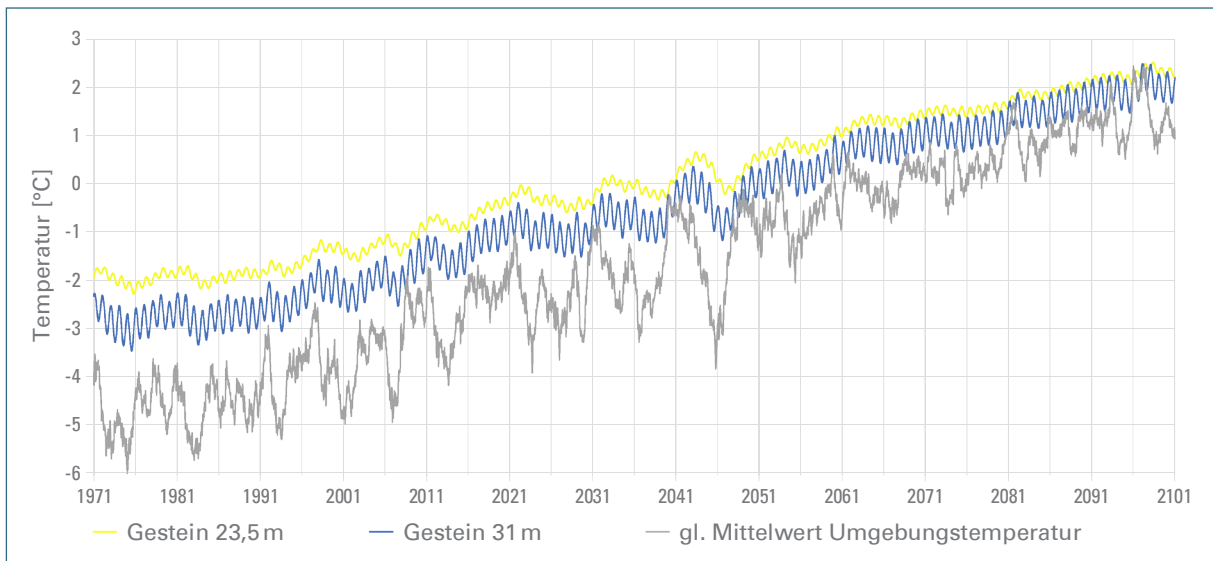


Abb. 36: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (HG2\_RCP85\_11)

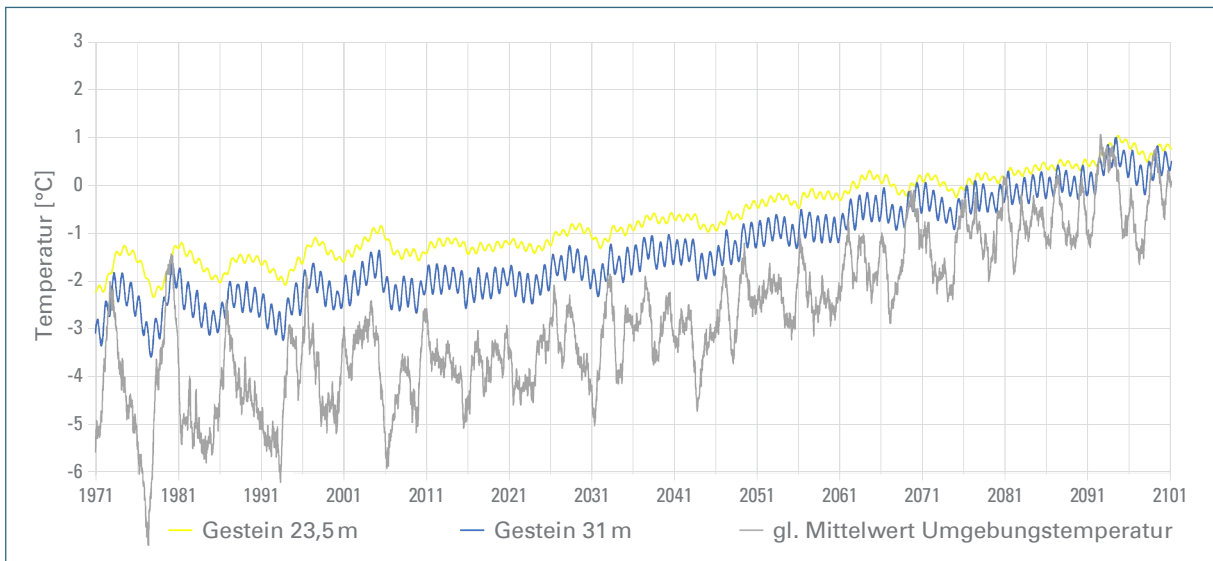


Abb. 37: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (CM5\_rcp85\_88)

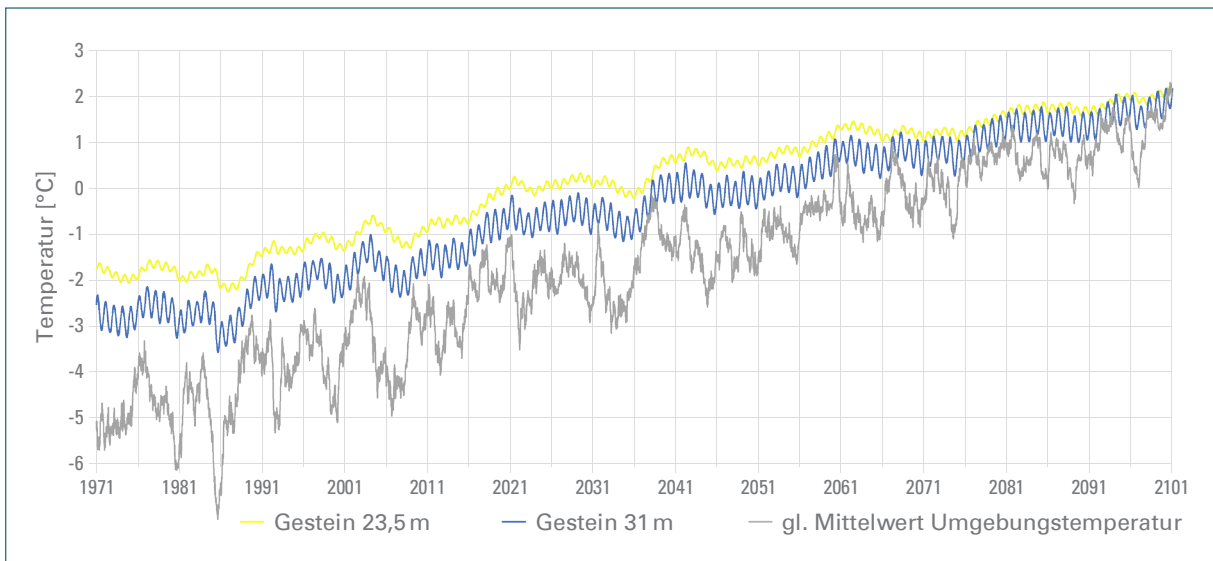


Abb. 38: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (MI\_RCP85\_55)



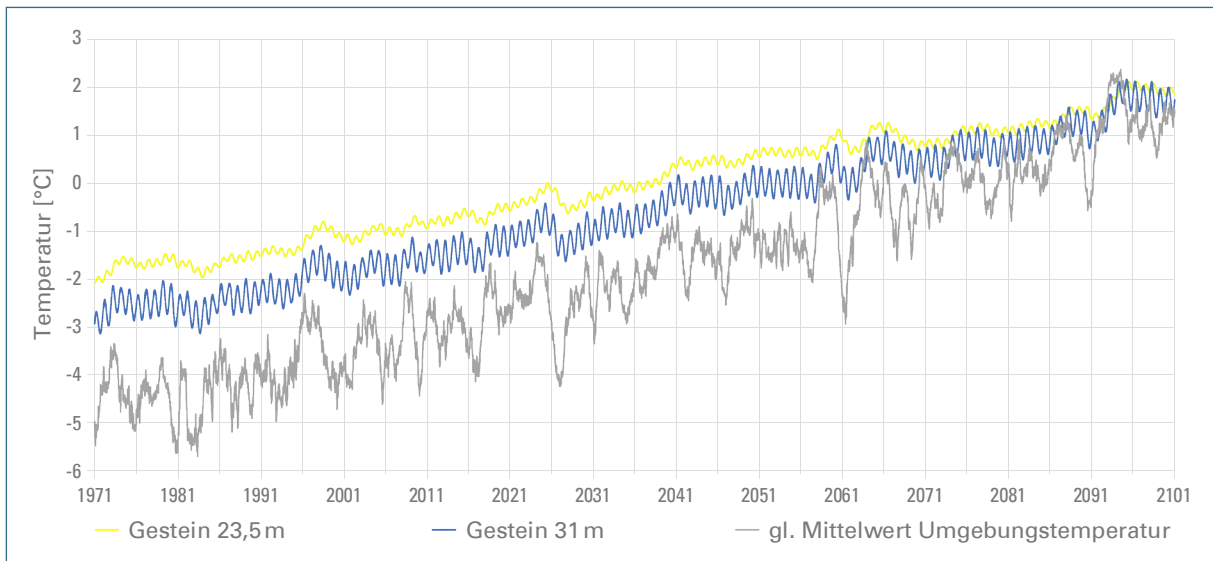


Abb. 39: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (CA2\_RCP85\_77)

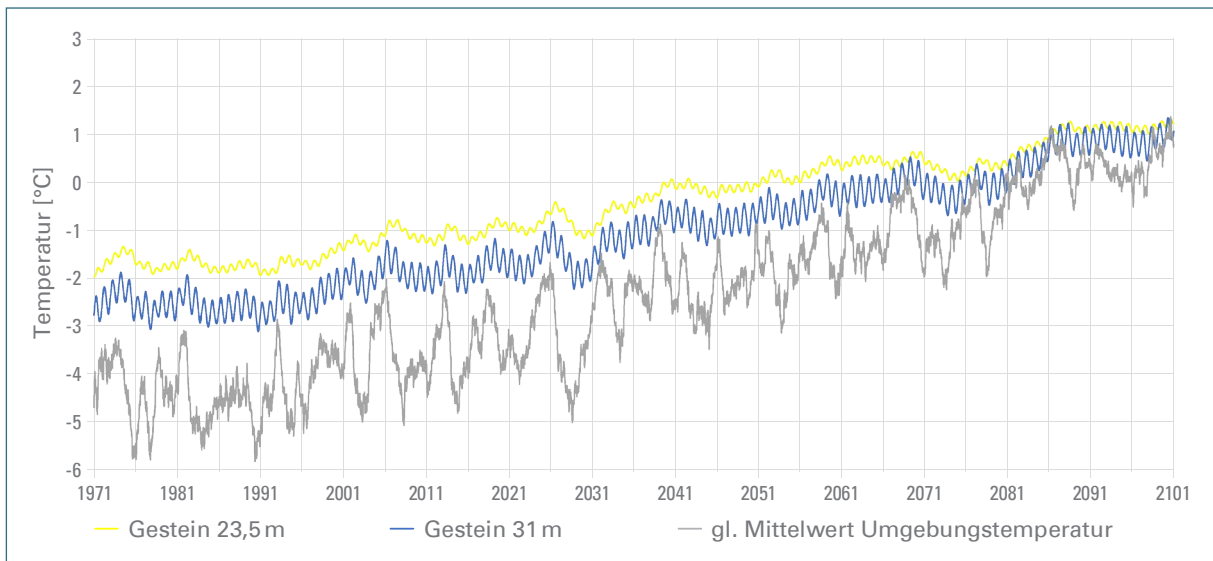


Abb. 40: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (ECE\_RCP85\_88)

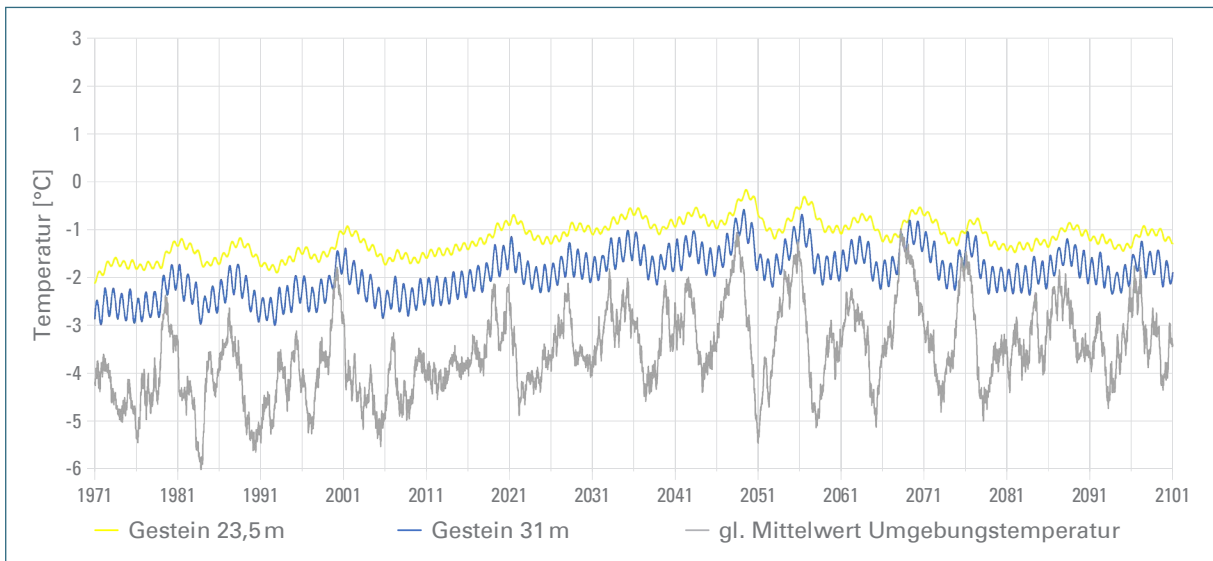


Abb. 41: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (MPI\_RCP26\_88)

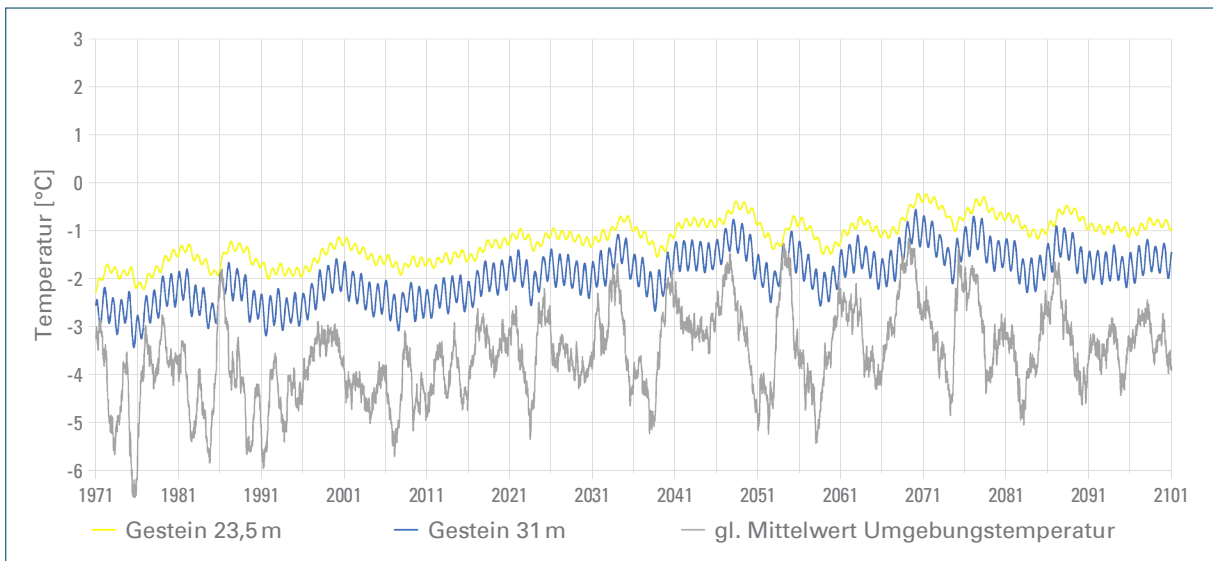


Abb. 42: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (MPI\_RCP26\_11)

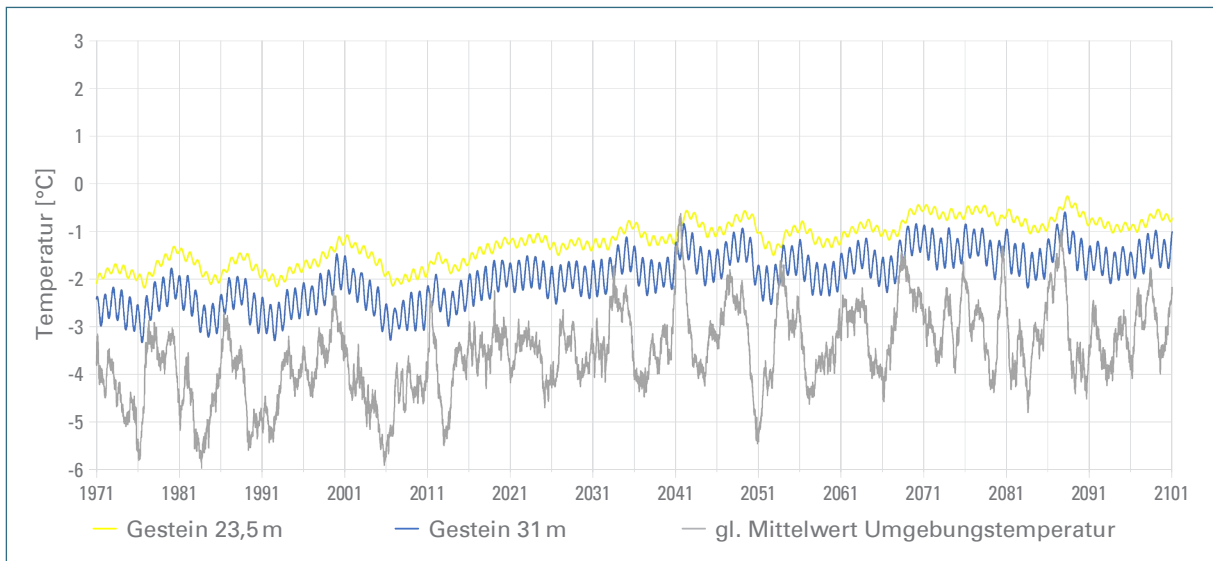


Abb. 43: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (MPI\_RCP26\_00)

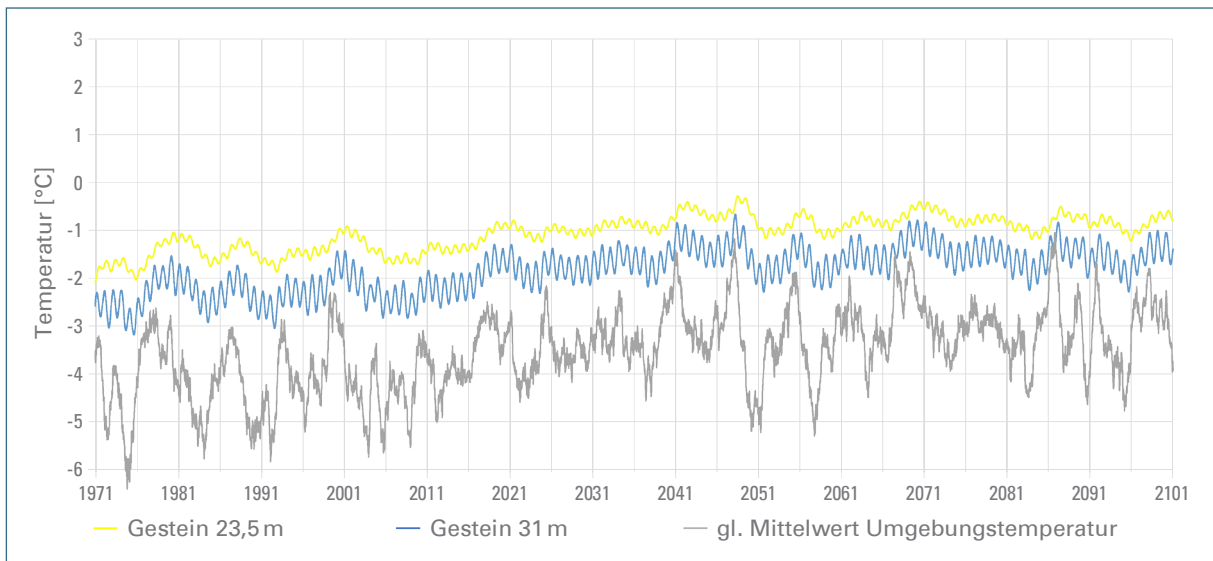


Abb. 44: Berechnete Gesteinstemperaturen in 23,5 und 31,0 m Entfernung von der Südseite sowie gleitende Mittelwerte der Umgebungstemperatur (MPI\_RCP26\_55)



## **II. Gebirgsböden im Wettersteingebirge**

**Dr. Hermann Jerz**

<b>Kurzfassung</b>	<b>48</b>
<b>Abstract</b>	<b>48</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>49</b>
<b>2 Ausgewählte Bodenprofile</b>	<b>50</b>
<b>3 Äolische Beeinflussung der Böden</b>	<b>52</b>
<b>4 Profilbeschreibungen und Analysenwerte</b>	<b>53</b>
<b>5 Literaturhinweise</b>	<b>59</b>
<b>Dank</b>	<b>60</b>

## Kurzfassung

Im vorliegenden Beitrag sind typische Bodenprofile im Wettersteingebirge beschrieben: Humusböden (O/C-Böden), Rendzina-Böden (A/C-Böden) und Terrae fuscae (A/T/C-Böden) auf Karbonatgesteinen (Wettersteinkalk, Hauptdolomit), auf lockerem Blockschutt und auf Lokalmoränen auf dem Zugspitzplatt.

Die Bodenprofile wurden im Zuge der Geologischen Landesaufnahme in Bayern in den Jahren 1983, 1989 und 1991 aufgenommen, darunter verschiedene Alpine Humusböden: „Boden des Jahres 2018“.

## Abstract

Typical soil profiles from the Wettersteingebirge are described. These are Histosols, Leptosols, and cambisols on carbonate rocks (limestone, dolomite), on loose blocky scree and on local moraines on the Zugspitzplatt.

The soil profiles were recorded in the course of the Geological Survey in Bavaria during the years 1983, 1989 and 1991, including various “Alpine humus soils” being „Soil of the year in 2018“.

# 1 Einleitung

In Verbindung mit geologischen Aufnahmen auf den Kartenblättern 1 : 25 000, Nr. 8532/8632 Garmisch-Partenkirchen und Nr. 8531/8631 Zugspitze wurden in den Jahren 1983, 1989 und 1991 spezielle bodenkundliche Untersuchungen durchgeführt, die Mehrzahl gemeinsam 1983 mit F. Sperber und einige 1991 mit Dr. W. Grottenthaler. Eine Auswahl repräsentativer Profile von Böden im Wettersteingebirge ist nachstehend beschrieben und mit Bodenanalysen ergänzt.

Bestimmend für ihre Verbreitung und Ausbildung sind zahlreiche Faktoren wie Höhenstufe, Relief, Lokalklima, Exposition und Pflanzendecke. Ein wechselnder Gesteinsuntergrund erklärt die große Vielfalt auf engstem Raum. Lange Kaltphasen und eine kurze Vegetationszeit in den Hochlagen bedingen eine nur geringe biologische Aktivität: Dies bedeutet einen geringen Umbau von Pflanzenresten in Humus und anorganische Stoffe und eine nur sehr geringe Bodenbildung.

Die hier beschriebenen Gebirgsböden gehören der montanen Höhenstufe um 800 m ü. NN, der subalpinen Stufe um 1200 m ü. NN sowie der subnivalen Region über 2.000 m ü. NN an.

Im Einzelnen ausgewählt sind Böden der postglazialen Lokalmoränen auf dem Zugspitzplatt (vgl. Abb. 1), auf Kalkgesteins-Blockschutt im Bergsturzgebiet Eibsee, auf Dolomit-Hangschutt von der Nordflanke des Kramer-Massivs sowie auf Alpinem Muschelkalk im Bereich des Wamberger Höhenrückens.



Abb. 1: Blick auf das Zugspitzplatt.



## 2 Ausgewählte Bodenprofile

Typische Vertreter der Gebirgsböden in der montanen bis subalpinen Höhenregion (bis circa 2.000 m ü. NN) bilden Felshumusböden auf Karbonatgestein (vgl. Profil 1 sowie Abb. 2). Gleichermaßen weit verbreitet sind (Skelett-) Humusböden auf lockerem Gesteinsschutt aus Hauptdolomit und aus Wettersteinkalk (z. B. Abb. 3). Der Typus „Alpiner Felshumusboden“ wurde vom „Bundesverband Boden“ und von der „Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft“ als „Boden des Jahres 2018“ ausgewählt (Abb. 2; Traidl et al. 2018).

Rendzina-Böden bilden die wichtigsten Vertreter der Gebirgsböden in der subalpinen und subnivalen Region (über 2.000 m ü. NN) auf dem Zugspitzplatt (Abb. 1) auf dem Lockermaterial der Lockalmoränen, stellenweise mit Rasenpolster und mit  $\pm$  geringer Humusbildung (Profile 2, 3 und 4).



Abb. 2: Alpiner Felshumusboden – „Boden des Jahres 2018“.



Abb. 3: Skeletthumusboden mit Wettersteinkalk (Mischung aus Humus und Kalkstein).



Ein typisches Beispiel einer Terra fusca zeigt Profil 10 mit einem Kalkstein-Braunlehm aus Alpinem Muschelkalk (Abb. 4).

In Gesteinsklüften im Wettersteinkalk und im Hauptdolomit bildet sich Boden in situ und kolluvial (Abb. 5).



Abb. 4: Terra fusca durch intensive Kalkstein-Verwitterung entstanden.



Abb. 5: Bodenbildung auf engstem Raum in Gesteinsklüften.

### 3 Äolische Beeinflussung der Böden

In den Böden auf dem Zugspitzplatt ist vielfach ein deutlich erkennbarer Gehalt an allochthonen Leicht- und Schwermineralen nachweisbar (siehe Profile 3, 4 und 6). Küfmann (2002/03, 2008) beschreibt aus den Nördlichen Kalkalpen, darunter vom Zugspitzplatt, „silikatischen Feinstaub“, der neben den Leichtmineralen Glimmer, Quarz und Feldspat die Schwerminerale Granat, Hornblende und Epidot enthält, welche auf eine Herkunft aus den Zentralalpen hinweisen. Quarzminerale lassen auf einen Feinstaubtransport aus der Sahara schließen.

Auffallend hoch ist der äolische Anteil an Glimmer- und Quarzmineralen in einem bei der Knorr-Hütte des DAV (2051 m ü. NN) aufgenommenen Bodenprofil mit einer Lockerbraunerde (Profil 6; Abb. 6).



Abb. 6: Lockerbraunerde aus lössähnlichem Feinstaub über Lokalmoräne (vgl. Profil Nr. 6).

Bemerkenswert ist eine von Gröger & Jerz (2010) vom Hochkarstgebiet Zugspitzplatt in 2.290 m ü. NN beschriebene Doline, die bis in 1 m Tiefe mit humosem Kolluvium plombiert ist. Sie enthält ein lössähnliches, glimmer- und quarzführendes Feinsediment – eingeschwemmt aus dem nächsten Umfeld – sowie einen durch Windtransport eingetragenen Feinstaubanteil an Pollen und Sporen. Eine ASM-Datierung von Pollen in einer Bodenprobe aus 69–72 cm Tiefe ergab mit  $7415 \pm 30$  Jahre BP ein bis ins frühe Atlantikum reichendes Alter.

## 4 Profilbeschreibungen und Analysenwerte

### Profil 1

TK 25 Nr. 8532 Garmisch-Partenkirchen  
 E 32 659.080:N 5.253.820  
 Am Schachen (beim Pavillon), 1.865 m ü. NN  
 Latschenkiefern auf Wettersteinkalk

Tab. 1: Felshumusboden (vgl. Abb. 2)

L	2 cm	Nadelstreu		
Of	15 cm	Streuzersatz, Wurzelfilz		
Oh	5 cm	bräunlichschwarzer (10 YR 2/1) Feinhumus, (feinhumusreicher Moder), karbonatfrei		
cmCn	0–100 cm	hellgrauer (10 YR 7/3) Kalkstein (Wettersteinkalk, Alpine Trias)		
		pH (CaCl <sub>2</sub> )	Org. Substanz %	C/N Verhältnis
L		3,9	88,0	73,0
Of		3,7	81,0	33,0
Oh		5,8	69,0	24,0

### Profil 2

TK 25 Nr. 8531 Zugspitze  
 E 32 649.760:N 5.252.300  
 Zugspitzplatt, 2.440 m ü. NN  
 Moränenwall, neuzeitlich 1.820–1.850  
 Veg.: Carex sp., Cerastium arvense, Saxifraga sp., Deckungsgrad < 50 %

Tab. 2: Rendzina aus Lokalmoräne auf Wettersteinkalk

clCv+Ah	0–10 cm	dunkelgrauer (10 YR 4/1), humoser, sandiger Kalkgrus
clCv	10–55 cm <sup>+</sup>	hellgrauer (10 YR 7/1), steinig-blockiger, sandiger Kalkgrus, Skelettanteil 75–90 Vol. %
Karbonatgehalt %		
clCv+Ah		92,4
clCv		93,5





## Profil 5

TK 25 Nr. 8532 Garmisch-Partenkirchen  
 E 32 650.660: N 5.258.990; 875 m ü. NN  
 Bergsturzgebiet Eibsee, Lärchwald westlich Grainau  
 Mischwald (Fichte, Buche, einzelne Lärchen)

Tab. 5: Tangelrendzina

L	1 cm	Laub- und Nadelstreu
Of	2 cm	Streuzersatz, Wurzelfilz
Oh	3 cm	braunschwarzer (10 YR 2/2) Feinhumus, ±zersetzt, karbonatfrei
Ovh	4 cm	bräunlichschwarzer (10 YR 2/1) Feinhumus, stärker zersetzt, karbonatfrei
clCv+Ah	0–20 cm	bräunlichgrauer (10 YR 5/4), humoser, grusiger, sandiger Schluff, mit hellgrauen Steinen aus Wettersteinkalk durchsetzt, Skelettanteil 50–75 Vol.%
clCn	20–100 cm <sup>+</sup>	Blockschutt, grob, (Wettersteinkalk), Skelettanteil 75–90 Vol.%

	pH (CaCl <sub>2</sub> )	Karbonatgehalt %	Org. Substanz %	C/N Verhältnis
L	5,2		87,0	84,0
Of	4,4		83,0	29,0
Oh	3,8		80,0	25,0
Ovh	5,0		71,0	26,0
clCv+Ah	7,3	90,8	5,8	11,6

## Profil 6

TK 25 Nr. 8532 Garmisch-Partenkirchen  
 E 32 651.690:N 5.252.610  
 Zugspitzplatt, 2.065 m ü. NN, südwestlich Knorr-Hütte

Tab. 6: Braunerde (Lockerbraunerde) aus lössähnlichem Feinstaub über Lokalmoräne (vgl. Abb. 6)

Ah	0–5 cm	dunkelbraungrauer, humoser, feinsandiger Schluff, schwach podsoliert; locker, mit Glimmer- und Quarz-Mineralen
Bv	5–25 cm	graubrauner (ockerfarbener), schwach humoser, feinsandiger Schluff, glimmerreich
Bv-T	25–27 cm	graugelbbrauner, toniger Schluff, glimmerführend, Residualton mit Kalksplitter
llclCv	27–40 cm <sup>+</sup>	gelblichgrauer Kalksteingrus mit Blöcken (Wettersteinkalk), Skelettanteil > 75 Vol.%

## Profil 7

TK 25 Nr. 8532 Garmisch-Partenkirchen  
 E 32 651.310:N 5.252.310  
 Zugspitzplatt, 2.070 m ü. NN (nahe Knorrhütte)  
 Lokalmoräne, Brunntalstand, um 9.000 BP;  
 Alpiner Polsterrasen

Tab. 7: Moderrendzina, verbraunt auf Gletscherschutt (vgl. Abb. 7)

Oh	7 (10) cm	grauschwarzer, feinhumusreicher Moder
eAh+cxCv	0–15 cm	bräunlichgraugelber, karbonatreicher, schwach humoser, sandiger, schwach schluffiger Kalkgrus und Steine, oberseits mit tonigen Belägen, Spuren von äolischem Eintrag aus Glimmer und Quarz
ICv	15–50 cm <sup>+</sup>	graugelber, karbonatreicher, schwach sandiger Grus, Steine und Blöcke aus Wettersteinkalk



Abb. 7: Moderrendzina auf grobem Gletscherschutt aus Wettersteinkalk; vgl. Profil Nr. 7; Zugspitzplatt circa 2.070 m ü. NN, nahe Knorr-Hütte

**Profil 8**

TK 25 Nr. 8532 Garmisch-Partenkirchen  
 E 32 653.200:N 5.261.650  
 Kramer-Südseite, Hangschutt; 815 m ü. NN

Tab. 8: Mullrendzina

L	1cm	Nadelstreu					
Of	2 cm	Streuzersatz, Wurzelreste					
eAh	0–6 cm	bräunlichdunkelgrauer (10 YR 4/5), karbonatreicher, humoser, stark steiniger, grusiger, lehmiger Schluff, mit Dolomitgrus					
cAh	6–11 cm	bräunlichgrauer (10 YR 6/4), karbonatreicher, humoser, stark steiniger, grusiger, lehmiger Schluff, mit Dolomitgrus und -schutt					
clCv	11-50 cm <sup>+</sup>	gelblichgrauer (10 YR 7/4), grusiger Dolomitschutt					

	Ton %	Schluff %	Sand	pH (CaCl <sub>2</sub> )	Karbonat- gehalt %	Org. Sub- stanz %	C/N Verhältnis
Of				6,1		47,4	27,8
eAh	30,3	56,1	13,6	7,0	47,0	13,8	16,3
cAh				7,1	80,0	5,0	18,1
clCv				7,4	98,0		

**Profil 9**

TK 25 Nr. 8532 Garmisch-Partenkirchen  
 E 32 655.090:N 5.261.890; 795 m ü. NN  
 Garmisch WNW, westlich Almhütte,  
 forstliche Versuchsfläche (Fichte, einzelne Kiefern)

Tab. 9: Moderrendzina

Of	7 cm	Streuzersatz und Wurzelfilz
Oh	5 cm	Rohhumus
Ah	0–4 cm	grauschwarzer (7,5 YR 2/1), feinhumusreicher, karbonathaltiger, lehmiger Schluff
Ah+clCv	4–4 cm	schwarzgrauer (7,5 YR 4/2) sehr stark humoser, karbonatreicher, stark steiniger, lehmiger Schluff
clCv	14–50 cm <sup>+</sup>	hellgelblichgrauer (10 YR 7/3), Dolomitschutt aus Hauptdolomit

	Ton %	Schluff %	Sand	pH (CaCl <sub>2</sub> )	Karbonat- gehalt %	Org. Sub- stanz %	C/N Verhältnis
Of				3,9		80,0	25,5
Oh				4,3		73,0	23,3
Ah				6,7		27,0	13,3
Ah+clCv	12,3	58,7	29,0	7,0	78,0	12,0	11,6
clCv				7,3	96,0		

### Profil 10

TK 25 Nr. 8532 Garmisch-Partenkirchen

E 32 663.010:N 5.259.890

Wamberg; 1.220 m ü. NN; Mischwald (Tanne, Buche)

Tab. 10: Braunerde-Terra fusca (Kalkstein-Braunlehm, vgl. Abb. 4)

L	1 cm	Laub- und Nadelstreu
Ah	0–13 cm	dunkelgraubrauner (10 YR 3/4), stark humoser, schluffiger, toniger Lehm
Bv-T1	30–40 cm	gelblichbrauner (10 YR 5/6), toniger Lehm
Bv-T2	40–60 cm	graubrauner (10 YR 6/4), lehmiger Ton, dicht, darin einzelne Kalksteine
elCv	60–70 cm <sup>+</sup>	gelbgrauer (10 YR 7/4), karbonatreicher, steiniger, lehmiger Schluff (Alpiner Muschelkalk)

	Ton %	Schluff %	Sand	pH (CaCl <sub>2</sub> )	Org. Substanz %	C/N Verhältnis
L				4,5	85,0	36,0
Ah	31,1	55,1	13,0	6,1	10,0	14,0
Bv-T1	43,9	43,7	11,3	6,7		
Bv-T2	43,4	50,3	6,3	6,8		
elCv						



## 5 Literaturhinweise

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017): Geologische Karte von Bayern 1 : 25 000 – Erläuterungen zu den Blättern 8531/8631 Zugspitze und 8532/8632 Garmisch-Partenkirchen. – Bearbeitung: Thomas Hornung & Ulrich Haas, Augsburg.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2018): Boden des Jahres 2018: Alpiner Felshumusboden: 20 S., München.
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1998): Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands. – Mitt. Arbeitskreis für Bodensystematik, 86: 180 S., Hannover.
- Diez, Th. (1967): Die Böden. – Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000, Blatt Nr. 8422 Oberammergau: 106-117, Bayerisches Geologisches Landesamt [Hrsg.], München.
- Grüger, E. & Herz, H. (2010): Untersuchungen einer Doline auf dem Zugspitzplatt – ein palynologischer Beitrag zur holozänen Gletschergeschichte im Wettersteingebirge. – Quaternary Science Journal, 59, Vol.1–2: 66–75, Hannover.
- Hirtleiter, G. (1992): Spät- und postglaziale Gletscherschwankungen im Wettersteingebirge und seiner Umgebung. – Münchner Geographische Arbeiten, Reihe B, 15: 1–154, München.
- Hüttl, G. (1999): Steuerungsfaktoren und Quantifizierung der chemischen Verwitterung auf dem Zugspitzplatt (Wettersteingebirge). Münchener Geogr. Arbeiten., Abh., Reihe B, 30: 171 S., München.
- Korch, C. & Friedmann, A. (2012): Phytodiversität und Dynamik der Flora auf dem Zugspitzplatt. – Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt, 76/77: 217–234, München.
- Küfmann, G. (2002/2005): Erste Ergebnisse zur quantitativen Untersuchung und Quantifizierung rezenter Flugstäube in den Nördlichen Kalkalpen (Wettersteingebirge). – Mitt. Geogr. Ges. in München, 86: 59–84, München.
- Küfmann, G. (2008): Flugstaubeintrag und Bodenbildung im Karst der Nördlichen Kalkalpen. – Nationalpark Berchtesgaden, Forschungsbericht 54, 159 S., Berchtesgaden.
- Munsell Color (2000): Munsell Soil Color charts. – Grand Rapids, USA.
- Rögner, K. & Koenig, B. (2002/2005): Der Einfluss der Flechten auf die Verwitterung von Karbonatgesteinen im Hochgebirge (Zugspitzplatt, Wettersteingebirge, Bayern). – Mitt. Geogr. Ges. in München, 86: 85–132, München.
- Traidl, R., Frielinghaus, M. & Milbert, G. (2018): Boden des Jahres 2018 – Alpiner Felshumusboden. – Bodenschutz 23,1: 4–8.

## Dank

Der Verfasser dankt Herrn Dr. Robert Traidl für die kritische Durchsicht des Manuskripts und für die Ergänzungen zur Bodensystematik.



Eine Behörde im Geschäftsbereich  
Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz

