

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

Julius Schleicher, Lary Beyer
& Lisa Sophie Hannemann

Anne-Frank-Schule Bargteheide

Klimaprojekt des Bio-Profiles des

11. Jahrgangs

2015/2016

Fachlehrer/innen:

Frau Knies

Frau Ibbeken

Herr Feist

Kontakt:

hannemann.lisa@t-online.de

larybeyer@web.de

Bargteheide den 20.06.2016

Inhalt

1. Einleitung	2
1.1. Lage und Geographie Alaskas.....	2
2. Definition Permafrost.....	3
3. Vorkommen des Permafrostbodens	3
3.1. Permafrostboden in Alaska	4
4. Aufbau des Permafrostbodens.....	4
4.1. Horizontale Gliederung.....	4
4.2. Vertikale Gliederung	5
5. Veränderungen bei starkem Frost / Entstehung von Eiskeilen	6
6. Auswirkungen des Permafrostbodens auf die Flora	6
7. Der Grund für das Tauen des Permafrostes	7
8. Natürliche Beeinflussung des Tauens	8
8.1. Beeinflussung der Bodenbeschaffenheit und des Oberflächenwassers	8
8.2. Beeinflussung der Meere und Flüsse.....	8
9. Auswertung der Klimakarten.....	9
9.1. Unterschied zwischen dem Szenario RCP 4.5 und RCP 8.5	9
9.2. Sommer.....	10
9.3. Winter	13
9.4. Schlussfolgerung.....	16
10. Entstehung von Treibhausgasen	17
11. Die Folgen des Tauens auf den Klimawandel.....	18
12. Fazit	19
13. Anhang	20
13.1. Literaturverzeichnis	20
13.1.1. Buchquellen.....	20
13.1.2. Internetquellen	20
13.2. Abbildungsverzeichnis	22
13.2.1. Weitere erstellte Klimakarten.....	23
13.3 Zusammenarbeit mit Experten.....	25

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

1. Einleitung

2 Millionen km² der gesamten Hemisphäre sind Permafrostboden, in dem sich sehr viel organisches Material befindet, welches von Bakterien zu Kohlenstoffdioxid und Methan zersetzt wird, sobald der Boden taut. Wenn der gesamte Permafrostboden tauen würde, würde genauso viel CO₂ freigesetzt wie in 180 Jahren Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Das wären 2 Billionen Tonnen CO₂, das ist dreimal so viel CO₂, wie in der jetzigen Atmosphäre ist. Nach Schätzungen sind 1.800 Milliarden Tonnen Kohlenstoff im Permafrost vorhanden. Selbst wenn nur ein Zehntel davon frei würde, hätte das enorme Veränderungen auf unserer Klima zur Folge.

Bei dieser Ausarbeitung werden wir erläutern, inwieweit Wechselwirkungen zwischen dem Permafrostboden und dem anthropogenen Klimawandel am Beispiel von Alaska vorhanden sind. In Alaska sind die Folgen des tauenden Permafrostes schon heute zu beobachten. Dazu haben wir folgende Hypothesen aufgestellt:

1. Bei dem Tauen des Permafrostbodens werden große Mengen Treibhausgase, Methan und Kohlenstoffdioxid, frei.
2. Durch das Tauen des Permafrostbodens entsteht ein „Teufelskreislauf“.

1.1. Lage und Geographie Alaskas

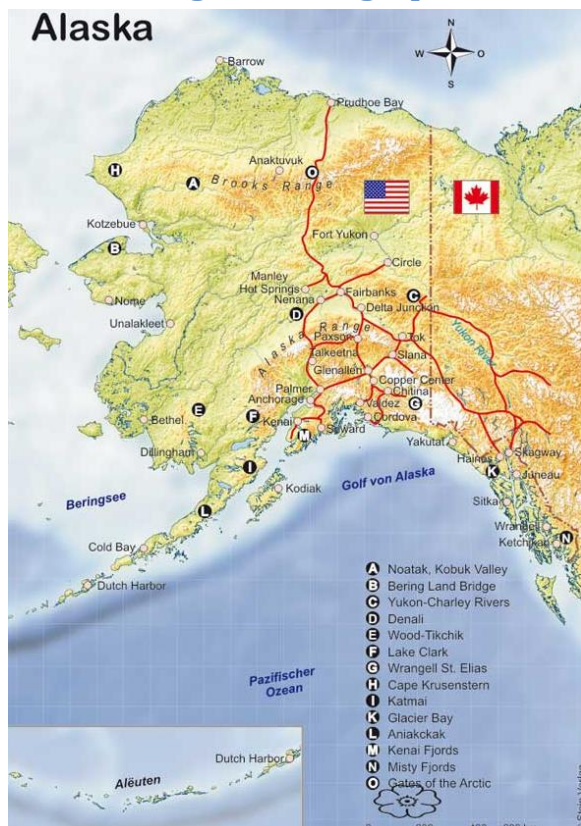


Abb. 1 Karte Alaskas

Alaska ist der nördlichste Bundesstaat der USA und hat eine Landmasse von 1.481.346 km². Alaska hat drei verschiedene Landschaftstypen:

1. die Gebirgsketten im Süden, am Golf von Alaska,
2. das Yukon-Territorium, eine Berg- und Hügellandschaft in Zentralalaska,
3. das flache Küstengebiet „North Slope“ am Nordpolarmeer,

Außerdem liegen in Alaska viele Seen und der Fluss „Yukon River“ zieht sich quer durch Alaska. Die Berge in den Gebirgsketten können über 6.100 m hoch sein. Im Norden Alaskas herrscht ein subpolares Klima, aber im übrigen Teil Alaskas herrscht ein kontinentales Klima.¹

¹ Wikipedia, Alaska, 2016

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

2. Definition Permafrost

Es wird von Permafrostboden oder Dauerfrostboden gesprochen, wenn die Bodentemperaturen in einem Gebiet in mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter 0°C liegen.

Der Permafrostboden kann aus verschiedenen Untergründen bestehen, z.B. Gestein, Sedimenten oder Erde. Auch die Menge an Eis in dem Boden kann variieren.

In der Arktis gibt es Gebiete, z.B. im Nordosten Sibiriens, wo 80% des Dauerfrostbodens aus Eis bestehen. Diese großen Eisbestandteile entstanden durch sehr lange und kalte Winter in den Eiszeiten vor 100.000 bis 10.000 Jahren. In Alaska sind viele Permafrostböden schon mehrere 10.000 Jahre alt. Aus diesem Grund reicht heute der Permafrostboden dort bis zu 1,5 km in die Tiefe. Dies ist der tiefst gelegene Permafrostboden auf der Erde.²

3. Vorkommen des Permafrostbodens

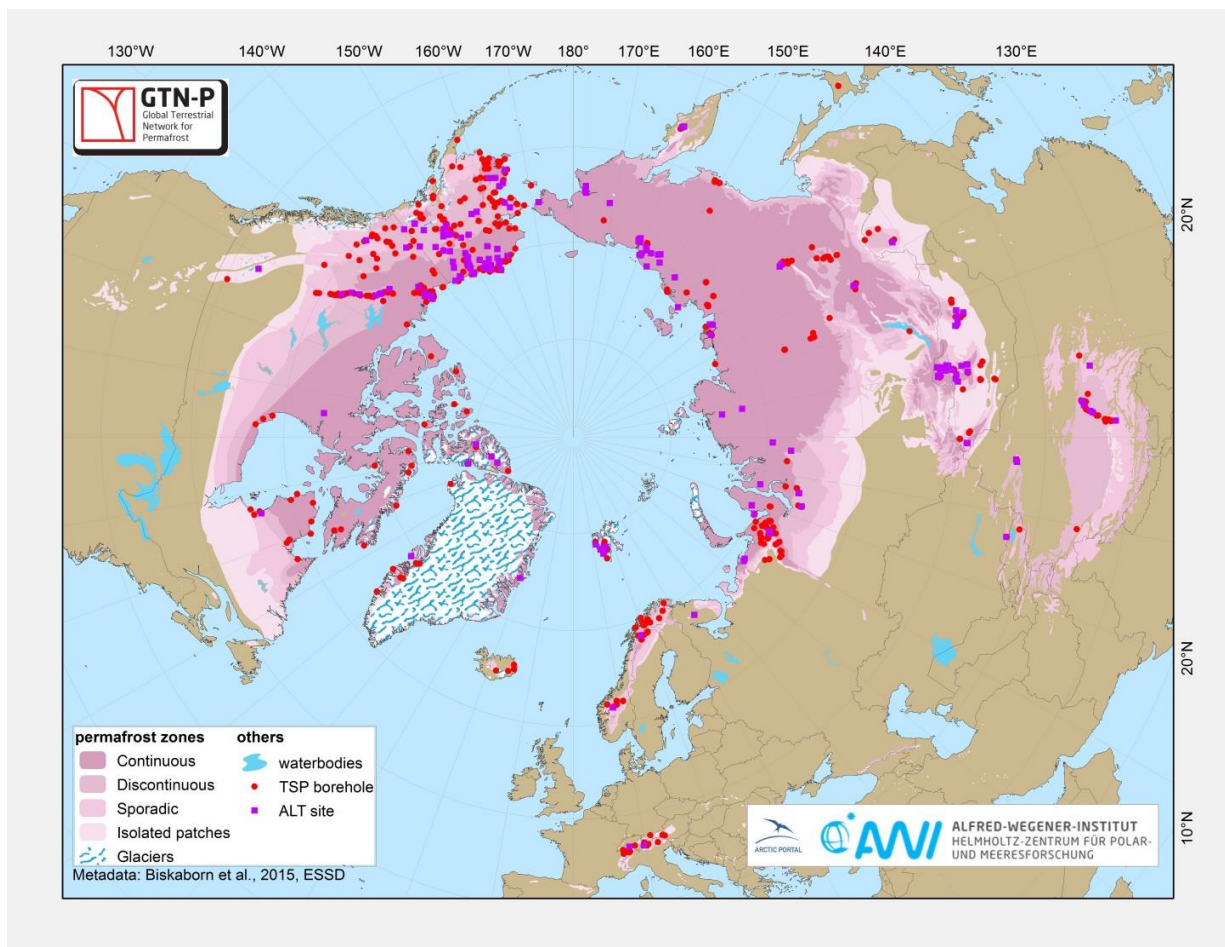


Abb. 2 Vorkommen des Permafrostbodens auf der Nordkugel

² AWI, Permafrost - Eine Einführung, 2016

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

Ungefähr $\frac{1}{4}$ des Festlandes der Nordhalbkugel ist Permafrostboden. Der größte Teil des Permafrostbodens kommt in der Arktis vor. Somit gibt es diesen in Alaska, Kanada, Grönland und im Norden Russlands, genauer Sibirien. Auch in der Antarktis ist Permafrostboden aufzufinden. Jedoch gibt es Permafrostboden nicht nur in den Polargebieten, sondern auch im Hochgebirge der Länder mit gemäßigttem Klima, wie z.B. in den Alpen oder im Norden Chinas.³

3.1. Permafrostboden in Alaska

Fast 85% des Bodens in Alaska ist Permafrostboden. Dieser ist in den Gebieten unterschiedlich tief ausgeprägt und nördlich der Brooks Range reicht dieser Boden am tiefsten in das Erdreich; an der Nordküste reicht der Permafrost fast überall mindestens 600 m in die Tiefe. Im Süden Alaskas, im Gebiet um Anchorage, kommt der Permafrost nur noch in sporadischer Form vor, und im Südosten nur noch im Gebirge. (siehe Abb. 2 auf Seite 3)⁴

4. Aufbau des Permafrostbodens

Permafrostboden kann aus jeder Art von Boden bestehen, z.B. aus Gesteinen oder Sedimenten. In Nord-Alaska besteht der Boden hauptsächlich aus Sedimentablagerungen, diese enthalten viel mehr Eis als reine Gesteinsschichten. Daher sind die Auswirkungen des Tauens auch von der Bodenbeschaffenheit, besonders von dem Eisgehalt im Boden, abhängig. Zum Beispiel sind die Vegetation, die Menge des Schnees, die Dicke der aktiven Schicht (siehe Seite 5) und der Grundwassergehalt entscheidend.⁵

Der Permafrostboden ist vertikal und horizontal in verschiedene Zonen und Typen unterteilt:

4.1. Horizontale Gliederung

In Gebieten, in denen mindestens 90% der Fläche aus Permafrostboden besteht, wird der Permafrost auch kontinuierlicher Permafrost genannt. Dort liegt die Jahresdurchschnittstemperatur bei unter -6°C . In einer solchen Zone ist höchstens der Boden unter Flüssen, Seen, Meeresabschnitten (in Küstennähe) und Gletschern nicht gefroren. Die Bodenbereiche, welche nicht gefroren sind, heißen Taliki.

Der diskontinuierliche Permafrost tritt in Gebieten auf, welche zu mehr als 50% aus Permafrost bestehen und eine Jahresdurchschnittstemperatur von -3°C bis -4°C besitzen.

Es wird von sporadischem Permafrost gesprochen, wenn einem Gebiet nur zwischen 50% bis 10% des Bodens gefroren sind- und nur eine Jahresmitteltemperatur von -1° bis -2°C herrscht.

³ AWI, Permafrost - Eine Einführung, 2016

⁴ Alaska Public Lands Information Centers, Permafrost, 2016

⁵ Grosse, G., et al. (2011): Vulnerability and Feedbacks of Permafrost to Climate Change, EOS 92, 73-74

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

Bei einem Auftreten von weniger als 10% wird von isoliertem Permafrost gesprochen, da nur vereinzelte Stellen konstant gefroren sind.

Permafrost kann aber nicht nur in den Polarregionen vorkommen, sondern auch im Hochgebirge, als alpiner Permafrost.⁶ Alpiner Permafrost ist nicht unter temperierten Gletschern vorhanden. Temperierte Gletscher geben das ganze Jahr über Schmelzwasser ab und bieten nicht überall konstante Temperaturen unter 0°C. Jedoch bieten polare und subpolare Gletscher konstante Temperaturen unter 0°C, da nur saisonale Gletscherschmelze auftritt.⁷

Zusätzlich gibt es auch den submarinen Permafrost. Dieser Typ Permafrost befindet sich hauptsächlich unter den flachen Schelfmeeren in den Polargebieten und ist noch ein Überrest der letzten Eiszeiten. In diesen kam es zu einer Meeresregression, wobei durch das Absinken des Meeresspiegels die Möglichkeit entstand, Permafrost zu bilden. (siehe Abb. 2, Seite 3)⁸

4.2. Vertikale Gliederung

Dort, wo Permafrost vorkommt, ist der Boden in vier verschiedene Schichten gegliedert.

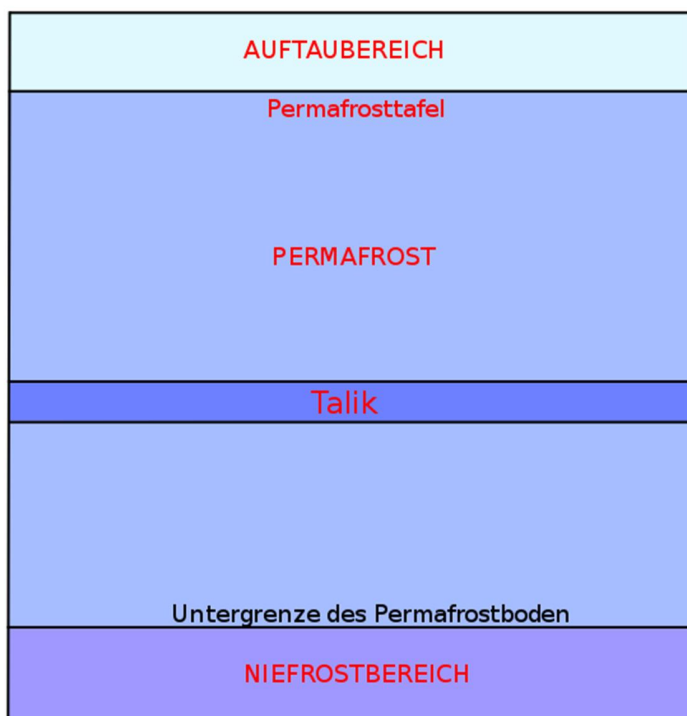


Abb. 3 Vertikale Gliederung des Permafrostbodens

An der Oberfläche befindet sich die Auftauschicht, die aktive Zone. Die Auftauschicht taut bei Temperaturveränderungen im Sommer und gefriert wieder im Winter, daher zählt diese Schicht genau genommen nicht zu dem Permafrost. Es finden in dieser Schicht die meisten biologischen und biochemischen Aktivitäten statt.⁹

Die Übergangszone darunter wird Permafrosttafel genannt. In dieser Schicht kann es zu Temperaturschwankungen unterhalb von 0°C kommen, wenn sich die Temperatur an der Oberfläche verändert. Dies zeigt auch der Graph

⁶ Spektrum, Permafrost, 2016

⁷ Spektrum, Gletschertypen, 2016

⁸ Spektrum, Permafrost, 2016

⁹ AWI, Permafrost – Eine Einführung, 2016

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

in der Abbildung 3, denn die mittlere jährliche Minimumtemperatur und die mittlere jährliche Maximumtemperatur haben erst in einer gewissen Tiefe keinen Einfluss mehr auf die Bodentemperatur.

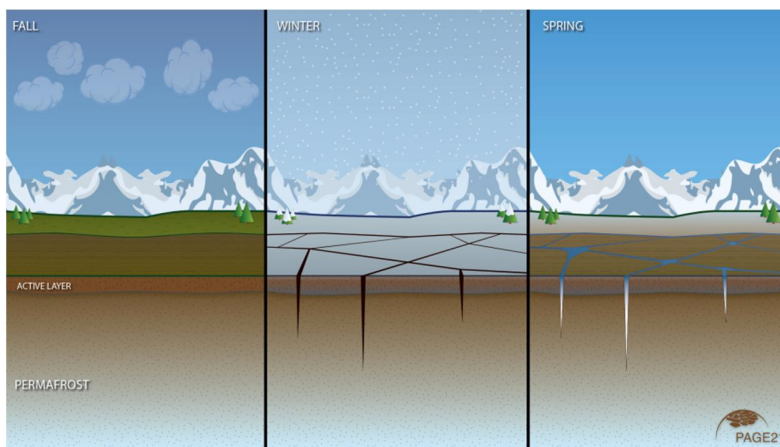
In tieferen Bodenschichten bleibt die Bodentemperatur des Permafrostes immer konstant, daher wird der Permafrost in dieser Schicht isothermer Permafrost genannt.

Je dichter sich der Boden in der Tiefe dem Erdkern nähert, desto weiter steigen die Bodentemperaturen wieder. Schließlich nimmt der Wärmeeinfluss des Erdkerns in der Tiefe weiter zu und ruft stärkere Veränderungen hervor.

Auf Grund dieses Wärmeeinflusses geht der isotherme Permafrostboden in den Niefrostboden über. In der Schicht des Niefrostbodens kann es niemals zu Temperaturen unter dem Gefrierpunkt kommen.¹⁰

5. Veränderungen bei starkem Frost / Entstehung von Eiskeilen

Bei starkem Frost zieht sich der Permafrostboden zusammen, so dass Frostspalten entstehen. Bei einer Temperaturabweichung von 20°C entsteht ein Keil von 1mm. Im Frühling und Sommer



füllen sich diese Spalte mit Schmelzwasser und frieren im Winter wieder. Durch die dauerhafte Wiederholung dieser Gefrier- und Tau-Prozesse bilden sich Eiskeile, welche sich ausweiten, da sich der Boden immer weiter zusammenzieht. Aus der Luft gesehen bilden diese Keile zusammen ein netzartiges Muster, die Eiskeilpolygonnetze.¹¹

Abb. 4 Entstehung der Eiskeile und des Polygonnetzes

6. Auswirkungen des Permafrostbodens auf die Flora

In Alaska gibt es unterschiedliche Vegetationen. Im Norden, in der Tundra, wo der Permafrostboden sehr weit an der Oberfläche liegt, kommen vor allem Moose und Flechten vor.

¹⁰ Wissenschaftliche Auswertungen, Warnsignale aus den Polarregionen, S. 48, 2006

¹¹ Wissenschaftliche Auswertungen, Warnsignale aus den Polarregionen, S.49, 2006

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

Moose ziehen, im Gegensatz zu anderen Pflanzen, das Wasser nicht nur aus dem Boden, sondern können Wasser, z. B. in Form von Regen und Tau, auch über ihre Blätter aufnehmen. Somit sind sie nicht von dem Wasser im Boden abhängig und können auch in Gebieten mit Permafrostboden, wo das Wasser im Boden gefroren ist und nicht aufgenommen werden kann, überleben.¹²

Flechten sind eine symbiotische Lebensgemeinschaft zwischen Pilzen und Grünalgen oder Cyanobakterien. Die Pilze dienen den Grünalgen bzw. Bakterien als Schutz vor zu starkem Sonnenlicht, Schneedruck und Wind, die Algen bzw. Bakterien versorgen die Pilze mit Wasser und Glucose. Sie leben also in Symbiose und können so im Permafrostboden überleben.

Im Süden Alaskas, z.B. in der Region Fairbanks, sind auch Nadelbaumwälder aufzufinden. Diese können hier bestehen, da sie sehr flach wurzeln. Weiter südlich liegt der Permafrost tiefer und massivere, tiefer wurzelnde Nadelbäume kommen vor.

Generell haben sich die Pflanzen sehr gut dem Gefrieren, besonders im Winter, angepasst, so dass die Kältestarre keine bleibenden Schäden hinterlässt:¹³

Die Nadeln der Nadelbäume sind meist spiralförmig.¹⁴ Außerdem besitzen sie gelöstes Frostschutzmittel in ihrem Zellplasma, das sie vor dem Gefrieren schützt. Nadelbäume haben außerdem einen niedrigen Wasserverbrauch und vor allem Fichten stellen im Winter bei Frost die Fotosynthese fast vollständig ein.¹⁵

Wenn der Permafrostboden taut, könnten mehr Pflanzen wachsen und die Artenvielfalt in den Gebieten des Permafrosts würde steigen. Außerdem könnten mehr Pflanzen mehr Kohlenstoffdioxid in Sauerstoff umwandeln. Die Bodenpflanzen schützen den Permafrostboden vor dem Auftauen, denn sie können bis zu einem gewissen Grad die Sonnenstrahlen abschirmen.^{16 17}

7. Der Grund für das Tauen des Permafrosts

Permafrostboden beginnt bei Temperaturen über 0°C zu tauen. Wenn sich die Umgebungstemperaturen erhöhen, taut zunächst nur die Auftauschicht. Es ist normal, wenn die Auftauschicht im Sommer ganz auftaut und unbedenklich, denn im Jahreszeitenzyklus taut und friert diese Schicht immer wieder.

¹² Wikipedia, Flechte, 2016

¹³ Resonator, RES086 Kurz zum Forscherleben in Alaska, 2016

¹⁴ Wikipedia, Koniferen, 2016

¹⁵ Graten-Treffpunkt, Fichten - Fichtenbäume – Fichtenarten, 2016

¹⁶ Alaska Public Lands Information Centers, Permafrost, 2016

¹⁷ Guido Grosse und weitere, Climate change and the permafrost carbon feedback, 2015

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

Im Sommer taut eine Auftauschicht von maximal 30-40 cm in nördlichen Regionen, je weiter südlich der Permafrost liegt, können auch bis zu 2,5m des Bodens an der Oberfläche auftauen.¹⁸

8. Natürliche Beeinflussung des Tauens

8.1. Beeinflussung der Bodenbeschaffenheit und des Oberflächenwassers

Wie viel des Permafrostbodens taut, ist je nach Region unterschiedlich, da die Oberflächeneigenschaften sehr unterschiedlich sind (s. Aufbau des Permafrostbodens). Diese Eigenschaften haben sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf das Tauen. Zum Beispiel kann die Vegetation die Temperatur des Bodens um bis zu 6°C reduzieren. Im Gegensatz dazu kann das Oberflächenwasser an der Schnittstelle von Wasser und Sediment die Temperatur des Bodens auch in kalter, arktischer Umgebung erhöhen und anfälliger fürs Tauen machen. Doch diese Wechselwirkungen betreffen den Permafrostboden schon seit langer Zeit und sind eine natürliche Beeinflussung.¹⁹

8.2. Beeinflussung der Meere und Flüsse

Es gibt sehr dramatische Erosionen an den Nord-Küsten Alaskas am arktischen Ozean, denn sie sind im ständigen Kontakt mit dem Meer und dessen Strömungen. Die

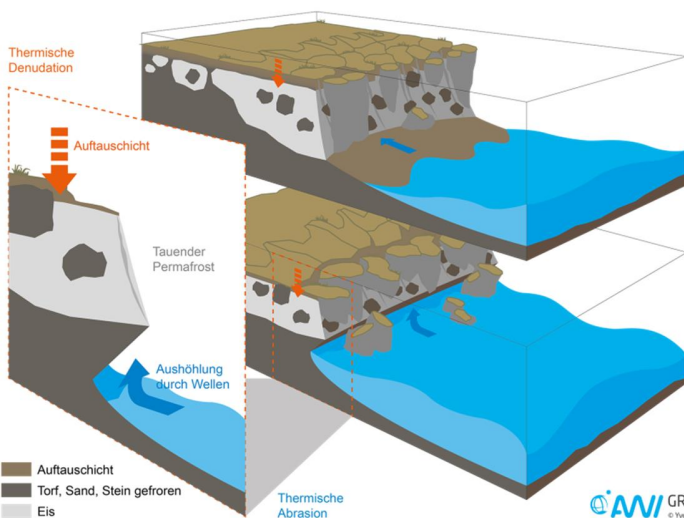


Abb. 5 Permafrost-Küstenerosion durch Meereseinwirkungen

betroffen.

Meerwassereinwirkungen, Temperaturen und Strömungen sorgen dafür, dass die Permafrost-Küsten tauen.

Das Problem hierbei ist, dass der Permafrost in diesen Regionen die Sedimentschichten und somit die Küste zusammen hält. Beim Tauen verliert dieser an Stabilität und zerfällt.

In Nord-Alaska sind manche Küstenabschnitte von einem Küstenverlust von bis zu 20 m

¹⁸ Resonator, RES086 Kurz zum Forscherleben in Alaska, 2016

¹⁹ EOS, Vulnerability and Feedbacks of Permafrost to Climate Change, 2011

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

Der organisch gebundene Kohlenstoff, welcher bei dieser Veränderung ins Meer gelangt, wird zum Teil in Methan und Kohlenstoffdioxid umgesetzt. Somit trägt dieser Prozess wie das Tauen der Permafrost-Binnenregionen- zur globalen Erwärmung bei.

Außerdem verändert der neue Kohlenstoff im Meer die Artenvielfalt des Nordpolarmeeres, denn der Kohlenstoff wird als Kohlenstoffdioxid aufgenommen. Eine Erhöhung des CO₂-Gehalts verändert den pH-Wert des Meeres. Jedoch haben sich die Meerestiere an einen bestimmten pH-Wert angepasst und zu große Veränderungen ermöglichen für sie kein Überleben.²⁰

Aber nicht nur Meeresküsten sind von der Erosion betroffen, sondern auch an Flussufern kommt es zu Erosionen. Am Itkillit River in Alaska ist ein jährlicher Uferverlust von 19 m zu beobachten. Am Ufer des Itkillit River besteht der Boden an manchen Stellen bis zu 80% aus Eis und nur zu 20% aus gefrorenen Sedimenten. Des Weiteren sorgt die erwärmte Flusswassertemperatur für das Tauen des Bodens. Obwohl die Jahresmitteltemperatur in diesem Gebiet bei -12°C liegt, lässt die hohe Sonneneinstrahlung den Boden im Sommer zusätzlich rasant tauen.

In den Jahren 2007 bis 2011 verlor das unmittelbar an das Ufer angrenzenden Land an 31.000m² Fläche, da der Eisanteil im Boden sehr hoch ist.²¹

9. Auswertung der Klimakarten

9.1. Unterschied zwischen dem Szenario RCP 4.5 und RCP 8.5

Die „Representative Concentration Pathways“ (Repräsentative Konzentrationspfade), kurz RCP, beschreiben unterschiedliche Klimaszenarien, in Abhängigkeit von bestimmten Faktoren wie Weltbevölkerung, Treibhausgasemission etc. Es gibt 4 Szenarien, wobei wir uns auf die Daten der Szenarien 4.5 und 8.5 konzentriert haben. Wir haben jeweils einen Abstand der Klimakarten zueinander von 100 Jahren gewählt, da auch das Tauen des Permafrost ein langsamer Prozess ist.

Die verschiedenen Szenarien zeigen unterschiedliche Varianten der Klimaveränderung in der Zukunft. Dabei wurden Daten wie Bevölkerungsentwicklung und Entwicklung der Energie- und Nahrungsmittelproduktion unterschiedlich mit einberechnet.

Das Szenario RCP 4.5 ist ein mittleres Szenario, bei dem mit einer geringeren Treibhausgasemission gerechnet wird als bei dem Szenario RCP 8.5.

²⁰ Resonator, RES086 Kurz zum Forscherleben in Alaska, 2016

²¹ AWI, Rekord-Erosion durch tauenden Permafrost, 2016

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

9.2. Sommer

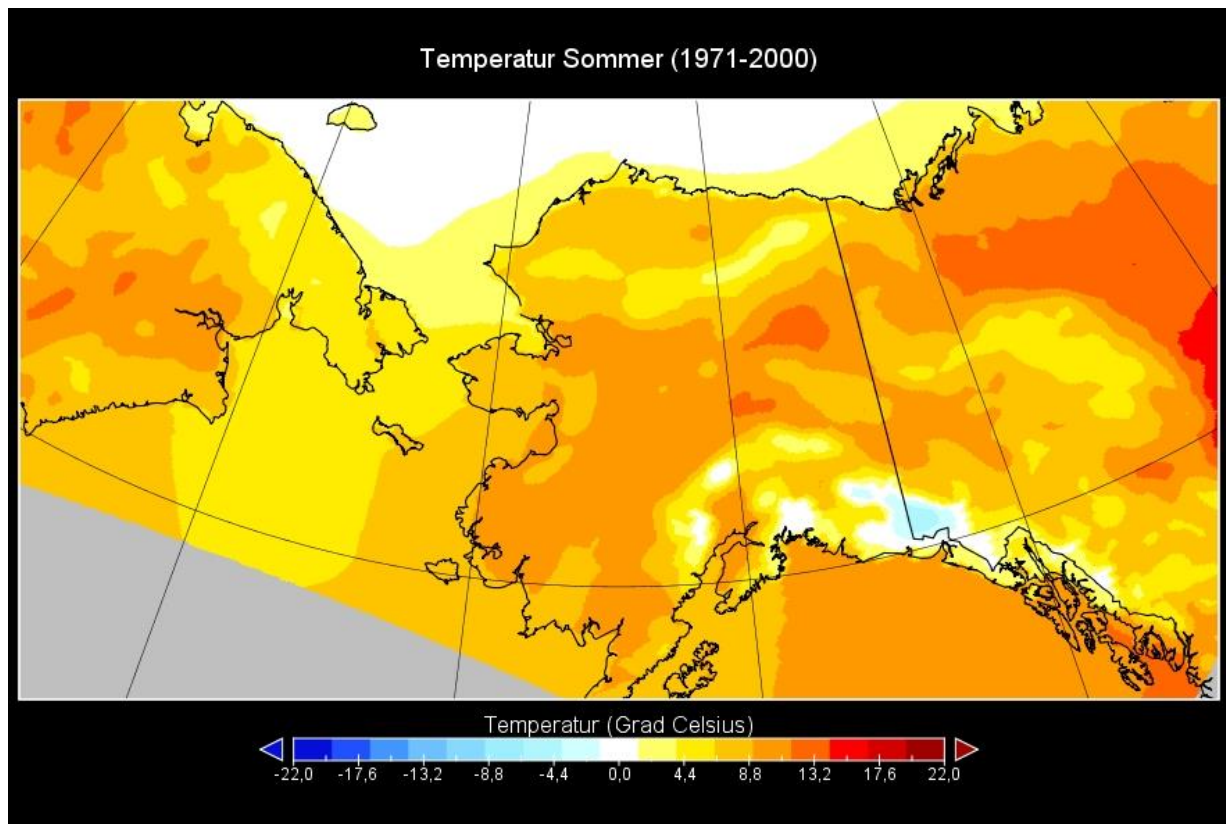


Abb. 6 Durchschnittstemperaturen vom Sommer 1971-2000

Die Klimakarte „Temperatur Sommer (1971-2000)“ zeigt die Durchschnittstemperaturen im Sommer in den Jahren 1971 bis 2000.

Die Durchschnittstemperaturen in den verschiedenen Regionen weichen sehr voneinander ab, die höchsten Temperaturen liegen bei ca. 14°C und die niedrigsten Temperaturen bei ca. -9°C. Im Südosten, in der Region des Wrangell Mountains-Gebirgszuges und der Alaska Range, sind die kältesten Temperaturen von 0°C bis -9°C aufzufinden. Die wärmsten Temperaturen von 12°C bis 14°C treten im Osten in der Region Yukon-Territorium auf.

Außerdem ist deutlich auf der Karte zu erkennen, dass die Temperaturen von Norden nach Süden nicht zunehmen, wie erwartet. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Regionen der Gebirgsketten mit Höhen von über 1500m vergleichsweise kälter sind als flache Regionen.

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

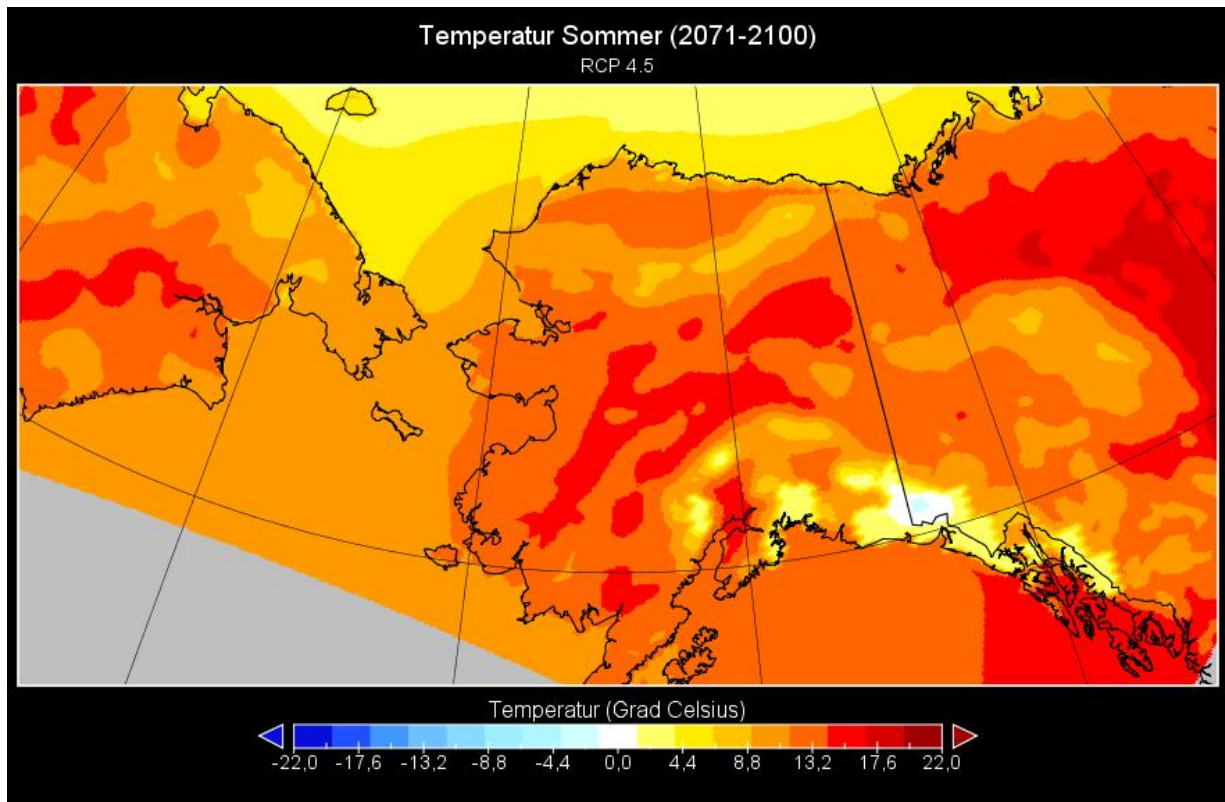


Abb. 7 Durchschnittstemperaturen vom Sommer 2071-2100 im Szenario RCP 4.5

Diese Klimakarte zeigt die vermuteten Durchschnittstemperaturen im Sommer in den Jahren 2071 bis 2100, zu dem Szenario RCP 4.5.

Auch diese zeigt die verschiedenen Durchschnittstemperaturen in den unterschiedlichen Regionen. Die vermuteten höchsten Temperaturen liegen bei ca. 16°C. Die wärmste Region aus dem Sommer der Jahre 1971 bis 2000, gehört auch in diesem Szenario zu den Gebieten mit den höchsten Temperaturen. Jedoch sind die höchsten Temperaturen nicht mehr nur dort vorhanden, sondern breiten sich nach Südosten aus. Außerdem tritt diese Höchsttemperatur nun auch in der Region um Anchorage auf, welches von der Alaska Range umschlossen wird.

In dem Gebiet der Gebirgskette der Alaska Range, an der Grenze zu Kanada, sind die kältesten Temperaturen von noch -9°C zwischen 1971 bis 2000 auf 0°C gestiegen. Des Weiteren hat sich dieses Gebiet mit den kältesten Temperaturen verkleinert.

Laut dem Szenario RCP 4.5 gibt es in $\frac{2}{3}$ Alaskas im Sommer in den Jahren 2071 bis 2100 Durchschnittstemperaturen von mindestens 11,5°C.

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

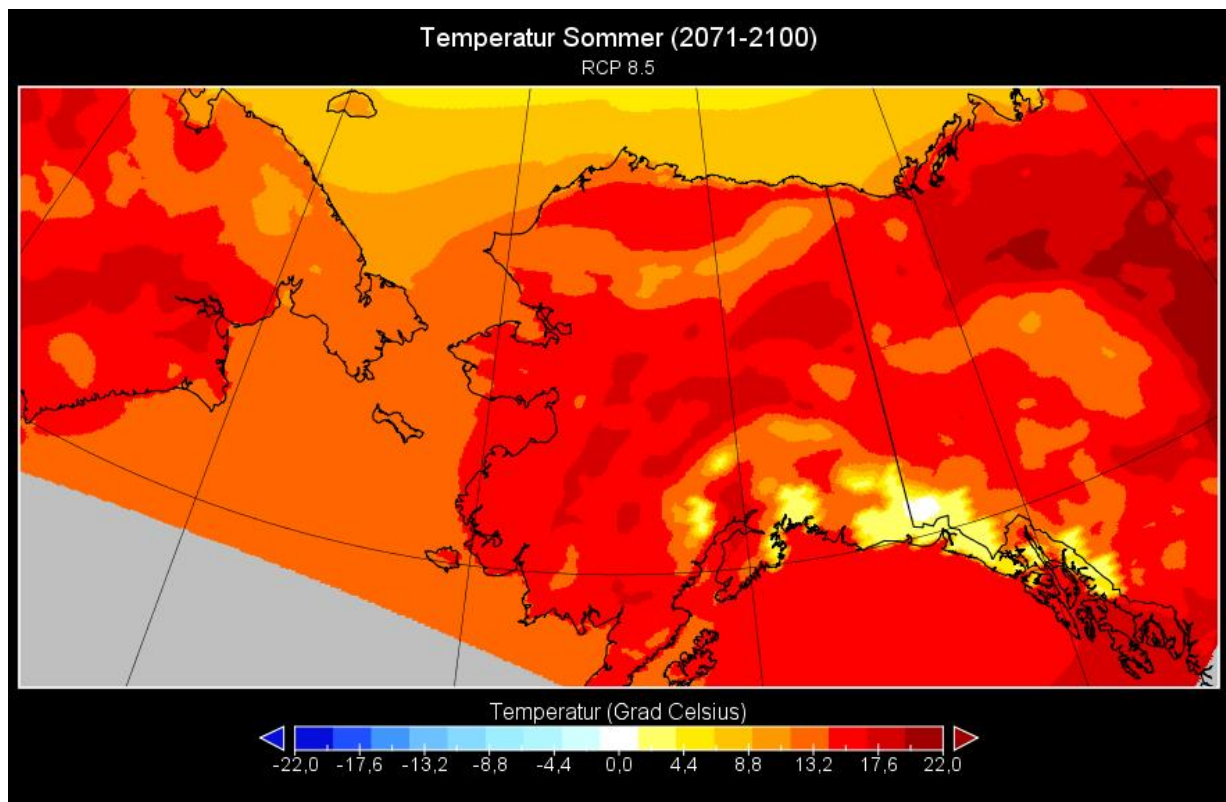


Abb. 8 Durchschnittstemperaturen vom Sommer 2071-2100 im Szenario RCP 8.5

Die letzte Sommerkarte zeigt auch mögliche Temperaturen für die Jahre 2071 bis 2100, jedoch für das Szenario RCP 8.5.

Die kälteste Temperatur liegt nicht mehr unter dem Gefrierpunkt, sondern bei ca. 1-2°C, und tritt nur noch in sehr kleinen Teilen des Wrangell Mountains-Gebirgszuges auf.

Im Gegensatz dazu steigen die Höchsttemperaturen auf 22°C, aber die Gebiete der höchsten Temperaturen sind bei beiden Szenarien fast identisch. Bei dem Szenario 8.5 liegen jedoch die Temperaturen in über $\frac{2}{3}$ Alaskas über ca. 15°C.

Die Karte des Szenario RCP 8.5 für die Jahreszeit Sommer (für 2071-2100) zeigt die drastischsten möglichen Temperaturveränderungen im Vergleich zu den Sommertemperaturen aus den Jahren 1971 bis 2000.

9.3. Winter

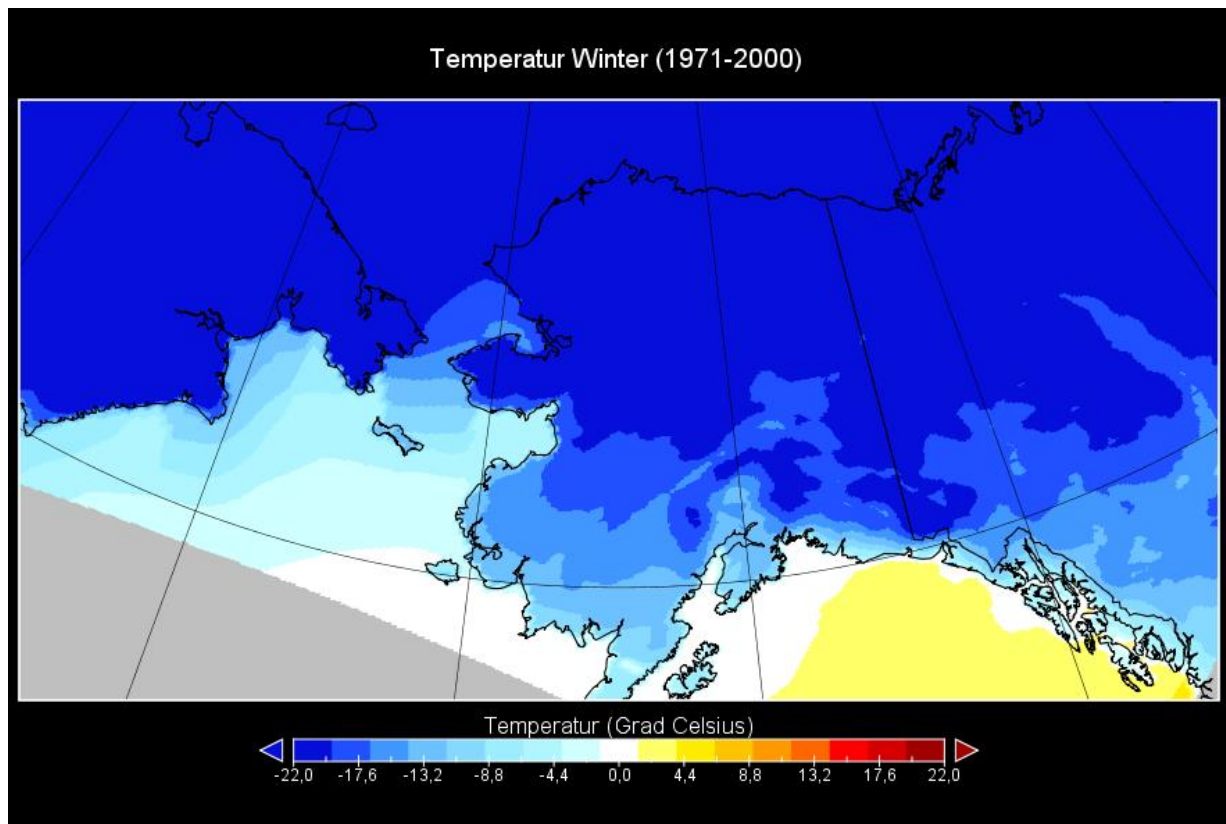


Abb. 9 Durchschnittstemperaturen vom Winter 1971-2000

Diese Klimakarte zeigt die Durchschnittstemperaturen im Winter für die Jahre 1971-2000.

Die niedrigsten Temperaturen dieser Klimakarte liegen bei -22°C , wobei anzumerken ist, dass die Temperaturen an manchen Orten noch niedriger sind. Jedoch sind die Temperaturen unter -22°C nicht relevant für unsere Leitfrage, da für uns nur die Temperaturen um den Gefrierpunkt entscheidend sind.

Die Temperaturzonen werden Richtung Süden immer wärmer, aber die Ausbreitung der einzelnen Zonen wird immer kleiner. Die Höchsttemperatur ist 0°C und ist im Süden Alaskas aufzufinden. Die kalten Temperaturen sind auch im Südosten vorhanden, da hier in den Höhenlagen der Gebirge wieder kältere Temperaturen entstehen.

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

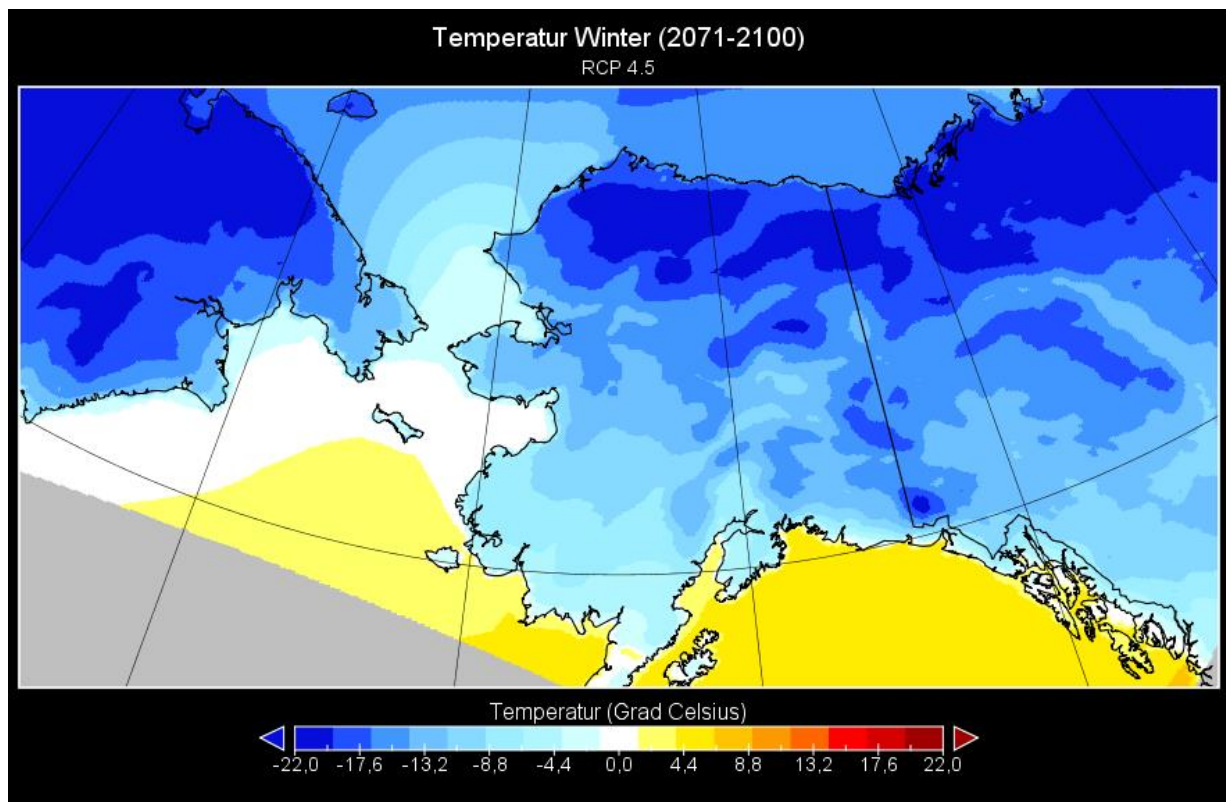


Abb. 10 Durchschnittstemperaturen vom Winter 2071-2100 im Szenario RCP 4.5

Die niedrigste Temperatur auf der Klimakarte von 2071 bis 2100 im Szenario RCP 4.5 liegt bei -22°C, die Höchsttemperatur bei 1-2°C und die Temperaturen werden von Süden nach Norden immer kälter

Die kalten Temperaturen im Südosten und Norden entstehen, wie bei den anderen Klimakarten, durch Gebirge. Zudem hat sich die kälteste Temperaturzone im Vergleich zu der Klimakarte aus den Jahren 1971-2000 sehr weit nach Norden zurückgezogen und hat sich um mehr als die Hälfte verkleinert.

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

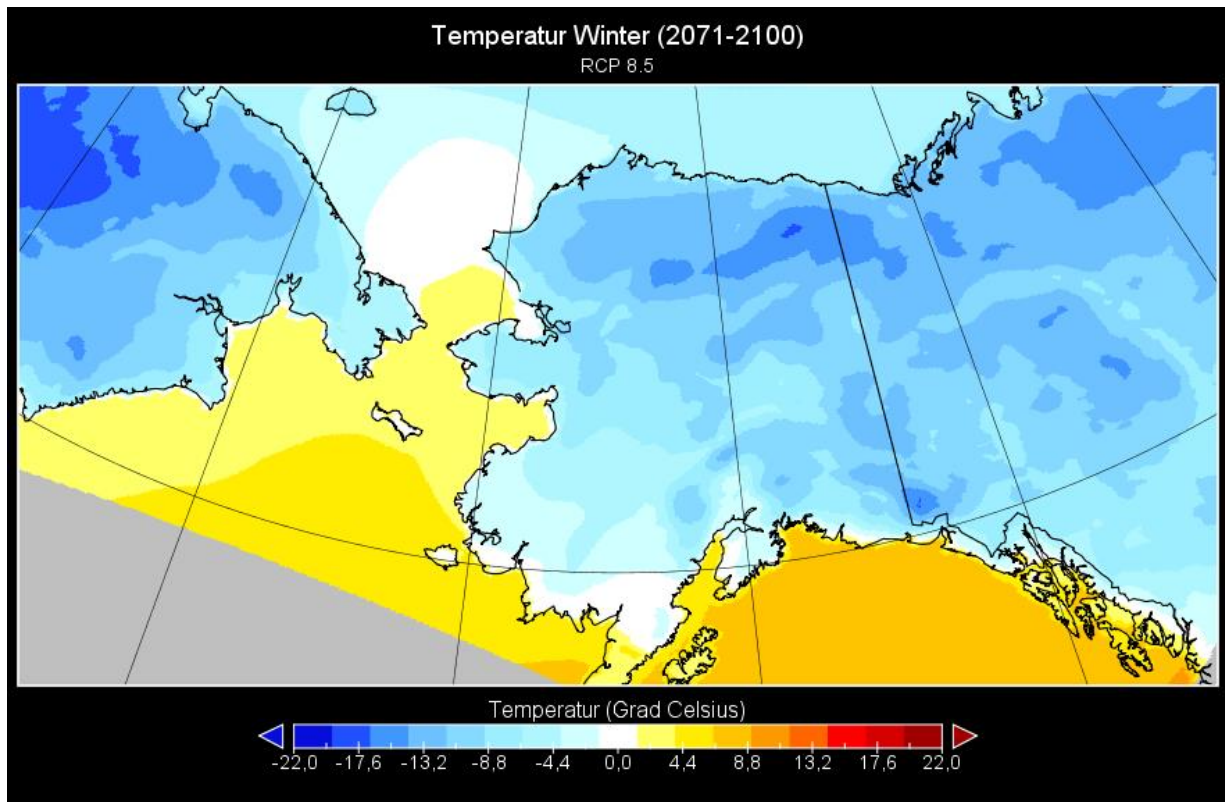


Abb. 11 Durchschnittstemperaturen vom Winter 2071-2100 im Szenario RCP 8.5

Die niedrigste Temperatur auf der Klimakarte für die Jahre 2071-2100 im Szenario RCP 8.5 liegt bei -17°C , die Höchsttemperatur bei 4°C .

Im Gegensatz zu der vorigen Karte kann man bei dieser Klimakarte nicht beobachten, dass die Temperaturen nach Norden hin kälter werden, sondern dass höher gelegene Regionen kältere Temperaturen vorweisen, wie dies auch in den Sommerkarten auftritt.

In ganz Alaska sind die Temperaturen sich sehr ähnlich, nur die südlichen Landzungen und Inseln sind deutlich wärmer, da hier wahrscheinlich auch die erhöhten Meerestemperaturen Auswirkungen auf die Temperaturen der naheliegenden Landabschnitte haben.

Im Süden gefriert die aktive Schicht wahrscheinlich nicht mehr, da hier die Temperaturen nicht mehr unter 0°C liegen. Jedoch muss man bedenken, dass diese Temperaturen nur die Durchschnittstemperaturen sind. So können

nicht genaue Schlüsse daraus gezogen werden, ob die aktive Schicht in diesen Gebieten gefriert. Außerdem zeigen die Klimakarten die Oberflächentemperaturen und nicht die Bodentemperaturen, die etwas andere Temperaturen vorweist.

Des Weiteren ist auf allen Karten zu beobachten, dass die Temperaturen an den südlichen Küsten wärmer sind als im Landesinneren Alaskas. Das liegt daran, dass das Meer die Wärme

besser und länger speichert. Diese zeigt, dass auch die Gefahr der Küstenerosion an den Südküsten steigt (s. 8.2. Beeinflussung der Meere und Flüsse). Jedoch vermuten wir keine starke Erosion in diesen Küstengebieten, da der Boden hier nur einen geringen Eisanteil hat.

9.4. Schlussfolgerung

Damit wir die Klimakarten der unterschiedlichen Jahreszeiten besser vergleichen können, stellten wir jeweils die niedrigsten und höchsten Temperaturen der unterschiedlichen Jahreszeiten, verwendeten Szenarien und Jahre in einer Tabelle dar.

So konnten wir den Temperaturanstieg der Jahreszeiten, besser für die jeweils tiefste Temperatur und die höchste Temperatur, errechnen. Dabei haben wir die Temperaturunterschiede zwischen den Klimakarten von 1971-2000 mit den Klimakarten von 2071-2100 mit dem Szenario RCP 4.5 und den Szenario 8.5 verglichen.

	Frühling		Sommer		Herbst		Winter	
	Tiefst- & Höchst.	Tiefst- & Höchst.	Tiefst- & Höchst.	Tiefst- & Höchst.	Tiefst- & Höchst.	Tiefst- & Höchst.	Tiefst- & Höchst.	
1971-2000	-18,0°C	2,0°C	-9,0°C	14,0°C	-16,0°C	4,4°C	-22,0°C	0,0°C
2071-2100 RCP4.5	-13,1°C	4,4°C	0,0°C	16,0°C	-14,0°C	9,0°C	-22,0°C	2,2°C
2071-2100 RCP8.5	-10,0°C	6,6°C	1,0°C	22,0°C	-9,0°C	10,0°C	-17,0°C	4,4°C
Temperaturanstieg 2071-2100 (RCP4.5) minus 1971-2000	4,9°C	2,4°C	9°C	2,0°C	2,0°C	4,6°C	0°C	2,2°C
Temperaturanstieg 2071-2100 (RCP8.5) minus 1971-2000	8,0°C	4,6°C	10°C	8,0°C	7,0°C	5,6°C	5,0°C	4,4°C

Table 1 Temperaturunterschiede zwischen den Daten der Klimakarten

Auffällig ist, dass sich die Temperaturanstiege von Frühling und Herbst sehr ähneln. Bei beiden steigt die Temperatur zwischen 2°C und ca. 5°C in dem Temperaturvergleich mit dem Szenario RCP 4.5. Auch in dem Vergleich mit dem Szenario RCP 8.5 zeigen die Temperaturunterschiede im Frühling und Herbst ähnliche Differenzen an, welche zwischen 4,6°C und 8°C liegen. (s. Anhang)

Des Weiteren fanden wir bei unseren Recherchen und der Zusammenarbeit mit dem Prof. Dr. Guido Grosse vom Alfred-Wegener-Institut heraus, dass in der Arktis ein Temperaturanstieg von

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

8°C vermutet wird und das die Vermutung einer globalen Erwärmung von 2°C nicht auf die Arktis zu trifft. Auch unsere in der Tabelle können wir Temperaturanstiege von 8°C beweisen.

10. Entstehung von Treibhausgasen

Durch das Tauen des Permafrostes wird der darin gebundene Kohlenstoff, in Form von organischem Material, frei. Das organische Material kann dann durch Bakterien zersetzt werden. Je nachdem, wo dieser Kohlenstoff frei wird, verarbeiten die Bakterien diesen entweder zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder zu Methan (CH₄), wobei CH₄ eine um 28-mal stärkere Auswirkung auf die Atmosphäre hat als CO₂.

Zur Freisetzung von CO₂ kommt es, wenn der Kohlenstoff unter sauerstoffreichen, also unter aeroben Bedingungen freigesetzt wird, während unter sauerstoffarmen, also anaeroben Bedingungen CH₄ freigesetzt wird. Sauerstoffarme Orte sind zum Beispiel Sümpfe.²²

Pflanzen nehmen allerdings durch Fotosynthese einen Teil des Kohlenstoffes in der Atmosphäre wieder auf, und sterben diese ab, gelangt der Kohlenstoff wieder in den Boden.

Der Permafrost ist für den Zusammenhalt des Bodens notwendig, da das gefrorene Eis das Volumen des Bodens erhöht. Durch den Verlust dieses Volumens beim Tauen des Permafrostes kommt es zum Thermokarst.

Als Thermokarst wird der Landschaftsverformungsprozess durch den auftauenden Permafrost bezeichnet. Infolgedessen sackt der Boden wegen seiner Instabilität ab, wobei das davon abhängig ist, wie viel Eis im Boden vorhanden ist. So entstehen dort Senken. Füllen sich diese Senken mit Wasser, entstehen sogenannte Thermokarst-Seen. Diese Seen erwärmen sich im Sommer und leiten die Wärme an den Permafrost weiter, weswegen sie das Tauen weiter verstärken.²³

In diesen Thermokarst-Senn sind große Mengen Methan enthalten. Das Methan erkennt man besonders, wenn diese Seen wieder zufrieren und das Methan sich als große Blase unter dem Wasser sammelt, wie auch die Abbildung eines gefrorenen Sees in Alaska zeigt.²⁴

Sobald die Bodentemperatur über 0°C ansteigt, beginnen das Eis und die gefrorenen organischen Stoffe im Permafrostboden zu tauen. Die aktive Schicht taut als erstes; wie tief diese ist, ist unterschiedlich, je nach Gebiet und Permafrostboden. Wenn die Temperaturen steigen, vergrößert sich die aktive Schicht, d.h. immer mehr Eis und immer mehr organische Stoffe tauen auf.

²² Die Welt, Tauender Permafrost wird zur Methangas-Schleuder, 2011

²³ Bildungsserver wiki, Permafrost, 2015

²⁴ YouTube, Das Klima auf der Kippe- Alaska, 12.09.2014

11. Die Folgen des Tauens auf den Klimawandel

Da der Kohlenstoffgehalt im Permafrostboden sehr hoch ist, hat das Tauen des Permafrostbodens gravierende Folgen für den Klimawandel. Sobald der Boden auftaut, kann organisch gebundene Kohlenstoff in Kohlenstoffdioxid und Methan umgewandelt und frei werden.

Kohlenstoffdioxid und Methan sind Treibhausgase, die z.B. durch die Zersetzung von Biomassen, in unsere Atmosphäre gelangen. Je größer die Menge der Treibhausgase, desto mehr wird der Treibhauseffekt in unserer Atmosphäre verstärkt, was lebensbedrohlich für unsere Erde ist.

Der natürliche Treibhauseffekt ist nicht gefährlich für unser Klima, da dieser für unsere lebensnotwendigen Klimabedingungen sorgt. Auf die Erde auftreffende Sonnenstrahlen werden eigentlich von der Erde reflektiert und zurück ins All gestrahlt. Doch Treibhausgase, wie Methan, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf, halten einige dieser Strahlen auf.²⁵ Kohlenstoffdioxid wird z.B. auch bei Vulkanausbrüchen, bei der Zersetzung von Pflanzen und beim Ausatmen der Tiere frei. Dieser gelangt in die Atmosphäre und wird nach ungefähr 100 Jahren in der Biosphäre durch Fotosynthese wieder zu Sauerstoff umgewandelt.²⁶

Doch wir Menschen bringen diesen Kreislauf aus dem Gleichgewicht. Seit dem industriellen Zeitalter vervielfachen wir die Treibhausgase in der Atmosphäre. Durch die vielen Treibhausgase werden immer mehr Sonnenstrahlen wieder auf die Erde zurückgestrahlt und das Klima erwärmt sich.²⁷ Anthropogen heißt „Vom Menschen verursacht“, deswegen wird dieser Treibhauseffekt auch oft anthropogener Treibhauseffekt genannt.

Doch nicht nur das Austreten der Treibhausgase ist eine Folge des tauenden Permafrostbodens, sondern auch die Stabilität des Bodens geht durch das Tauen verloren. Bei diesem Prozess werden Gebäude, Straßen, Pipelines usw. beschädigt oder brechen sogar ein. Das verursacht nicht nur sehr hohe Kosten, sondern ist, besonders für die Bewohner, sehr gefährlich.²⁸

Fairbanks, die zweitgrößte Stadt Alaskas, wurde fast komplett auf Permafrostboden gebaut. In der Nähe von Fairbanks liegt eine Hauptpumpstation der Trans-Alaska-Pipeline, die besonders gefährdet ist.²⁹

An der Küste ist das schmelzende Eis ein Problem. Die Instabilität des Bodens, die steigenden Wassertemperaturen und heftige Stürme schwächen die Küsten und machen sie anfälliger für

²⁵ Bildungserver wiki, Treibhauseffekt, 1.4 Treibhausgase, 2015

²⁶ WWF, Der Treibhauseffekt

²⁷ Bildungserver wiki, Der Treibhauseffekt, 2 Der anthropogene Treibhauseffekt, 2015

²⁸ Wissensplattform „Erde und Umwelt“ (ESKP), Fragen und Antworten zum Permafrost, 2015

²⁹ Climate Hot Map, Fairbanks, AK, USA

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

Küstenerosionen.³⁰ Auch die Stabilität der Hänge in Bergregionen nimmt ab. Hangrutsche sind die Folgen.

Beim Tauen des Permafrostbodens werden also nicht nur Treibhausgase frei, die in unsere Atmosphäre gelangen und den anthropogenen Klimawandel verstärken, sondern das Tauen hat auch starke Auswirkungen auf die Wirtschaft, die Landschaft und die Topografie in Alaska, da der Boden an Stabilität verliert.³¹

12. Fazit

In Rahmen unserer Arbeit konnten wir unser zu Beginn auf gestellte Leitfrage: „Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?“ konkret beantworten.

Nicht nur der anthropogene Klimawandel hat Auswirkungen auf das Tauen des Permafrostbodens, sondern auch das Tauen hat Auswirkungen auf den anthropogenen Klimawandel, und Wechselwirkungen entstehen.

Kohlenstoff aus tausenden Jahren ist in Form von gefrorenen, organischen Stoffen im Permafrostboden gespeichert. Dieser natürliche Speicher geht durch den anthropogenen Klimawandel verloren. Somit verstärken die Treibhausgase den anthropogenen Klimawandel, der wiederum das Tauen des Permafrostbodens verstärkt.

Aber auch kleine positive Wechselwirkungen sind zwischen der Flora, dem Permafrostboden und dem Klimawandel zu beobachten. Je größer die Auswirkungen des Klimawandels auf den Permafrostboden sind, desto mehr taut die aktive Schicht und die Pflanzen können besser wurzeln und wachsen. Wenn mehr Pflanzen wachsen, können die Pflanzen den Permafrostboden vor der Sonne und vor dem Tauen schützen. Außerdem können die Pflanzen das Kohlenstoffdioxid aufnehmen und durch die Fotosynthese zu Sauerstoff umwandeln. Diese Wechselwirkung ist aber zu gering, um die negativen Wechselwirkungen merkbar zu minimieren.

Jedoch muss man beachten, dass es nach heutigem Forschungsstand sehr unwahrscheinlich ist, dass der gesamte Permafrostboden schmilzt und somit der gesamte Kohlenstoffvorrat austritt. Die austretende Menge wird aber immer größer, da sich die aktive Schicht immer weiter in den Norden verschiebt, wie man auf unseren Klimakarten sehr gut ablesen kann.

Im Winter war der Permafrostboden in Alaska, in den Jahren 1971-2000, ganz gefroren. Doch in den Jahren 2071-2100 werden, bei dem Szenario 8.5, selbst im Winter ganze Gebiete nicht

³⁰ Wissensplattform „Erde und Umwelt“ (ESKP), Fragen und Antworten zum Permafrost, 2015

³¹ YouTube, Das Klima auf der Kippe- Alaska, 2014

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

mehr zufrieren. Obwohl die Menge der austretenden Treibhausgase einzeln betrachtet nicht so dramatisch ist, ist jedes weitere Treibhausgas, das in unsere Atmosphäre gelangt, für das Klima und somit für unsere Erde sehr gefährlich.

Unsere am Anfang aufgestellten Hypothesen haben sich also bestätigt. Beim Tauen des Bodens werden vor allem die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid und Methan frei, die in die Atmosphäre gelangen und dort den anthropogenen Klimawandel verschlimmern. Je weiter der Klimawandel voranschreitet, desto mehr Permafrostboden wird tauen.

Das trägt zu dem Teufelskreislauf bei, der durch die Wechselwirkungen zwischen dem anthropogenen Klimawandel und dem Tauen des Permafrostbodens vorangetrieben wird und nur sehr schwer zu stoppen ist.

13. Anhang

13.1. Literaturverzeichnis

13.1.1. Buchquellen

Grosse, Guido; Romanovsky, Vladimir; Jorgenson, Torre; Anthony, Katey Walter; Brown, Jerry; Hole, Woods; Overduin, Pier Paul (15.03.2011): **Vulnerability and Feedbacks of Permafrost to Climate Change**, EOS, Transactions, American Geophysical Union, Volume 92 Number 7, S. 53–60

Lozán, Jose L.; Graßl, Hartmut; Hubberten, Hans-Wolfgang; Hupfer, Peter; Karbe, Ludwig, Piepenburg, Dieter (2006): **Warnsignale aus den Polarregionen**, Nachruck, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg (gedruckt in Kooperation mit GEO- Das Reportage Magazin), S. 48-49

E. A. G. Schuur, A. D. McGuire, C. Schädel, G. Grosse und weitere (09.04.2015): **Climate change and the permafrost carbon feedback**, Nature, Volume 520

13.1.2. Internetquellen

Alaska Public Lands Information Centers: Permafrost
[<http://www.alaskacenters.gov/permafrost.cfm>] (Aufruf: 24.05.2016)

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, scinexx.de (Stand: 27.01.2016): **Rekord-Erosion durch tauenden Permafrost** [<http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-19781-2016-01-27.html>] (Aufruf: 03.02.2016)

Bildungserver wiki (Stand: 28.09.2015): **Treibhauseffekt, 1.4. Treibhausgase und 2. Der anthropogene Treibhauseffekt**
[<http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Treibhauseffekt>] (Aufruf: 24.05.2016)

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

Bildungsserver wiki (Stand: 30.08.2015): **Permafrost**

[<http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Permafrost>] (Aufruf: 04.05.16)

Biskaborn, Boris, Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar und Meeresforschung

(Stand: 08.03.2016): **Permafrost - Eine Einführung** [<https://www.awi.de/im-fokus/permafrost/permafrost-eine-einfuehrung.html>] (Aufruf: 10.03.2016)

Climate Hot Map, Union of Concernend Scientists: Fairbanks, AK, USA

[<http://www.climatehotmap.org/global-warming-locations/fairbanks-ak-usa.html>] (Aufruf: 31.05.2016)

Die Welt (Stand: 01.12.2016): **Tauender Permafrost wird zur Methangas-Schleuder**

[<http://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article13745150/Tauender-Permafrost-wird-zur-Methangas-Schleuder.html>] (Aufruf: 04.05.2016)

Garten-Treffpunkt: Fichten - Fichtenbäume – Fichtenarten [<http://www.garten-treffpunkt.de/lexikon/fichtenbaeume.aspx>] (Aufruf: 12.06.2016)

Klein, Holger interviewt Grosse, Guido, Resonator. Der Forschungspodcast der Helmholtz-

Gemeinschaft (Stand: 20.05.2016): **RES087 Permafrost** [<https://resonator-podcast.de/2016/res087-permafrost/>] (Aufruf: 20.05.2016)

Spektrum. Lexikon der Geographie: Permafrost

[<http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/permafrost/5921>] (Aufruf: 06.06.2016)

Spektrum. Lexikon der Geographie: Gletschertypen

[<http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/gletschertypen/3123>] (Aufruf: 07.06.2016)

WDR, YouTube (Stand: 12.09.2014), **Das Klima auf der Kippe-Alaska**

[<https://www.youtube.com/watch?v=37QOWu1ozLU>] (Aufruf: 31.05.16)

Wikipedia (Stand: 15.06.2016): **Alaska** [<https://de.wikipedia.org/wiki/Alaska>] (Aufruf: 15.06.2016)

Wikipedia (Stand: 04.06.2016): **Flechte** [<https://de.wikipedia.org/wiki/Flechte>]

(Aufruf:12.06.2016)

Wikipedia (Stand: 16.05.2016): **Koniferen** [<https://de.wikipedia.org/wiki/Koniferen>] (Aufruf:

12.06.2016)

Wissensplattform „Erde und Umwelt“ Earth System Knowledge Platform (ESKP) (Stand:

20.10.2015): **Fragen und Antworten zum Permafrost** [<http://www.eskp.de/fragen-und-antworten-zum-permafrost/#c5745>] (Aufruf: 31.05.2016)

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

WWF: **Der Treibhauseffekt** [<http://www.wwf.de/themen-projekte/klima-energie/klimawandel/der-treibhauseffekt/>] (Aufruf: 24.05.2016)

13.2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Karte Alaskas: (mit freundlicher Genehmigung des Conrad Stein Verlags)
Conrad Stein Verlag: Übersichtskarte Alaska [https://www.conrad-stein-verlag.de/p/verlag/Vorschaukarte/vorschaukarte_978-3-86686-957-8_4.jpg] (Aufruf: 05.04.2016)

Abb. 2 Vorkommen des Permafrostbodens auf der Nordkugel:
Biskaborn, Boris, GTN-P Global Terrestrial Network for Permafrost (in Kooperation mit dem Alfred-Wegener-Institut) (Stand: 2015): **Arctic Permafrost Zones**
[http://gtnp.arcticportal.org/images/Pictures/Maps/GTN-P_map_permafrostzones_Arctic.jpg]
(Aufruf: 10.03.2016)

Abb. 3 Vertikale Gliederung des Permafrostbodens:
Wikipedia (Stand: 17.12.2013): **Vertikale Gliederung Permafrost**
[https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Vertikale_gliederung_Permafrost.svg] (Aufruf: 09.10.2016);
Urheber: Septimus Heap; Lizenz: „unentgeltliches, bedingungsloses Nutzungsrecht für jedermann ohne zeitliche, räumliche und inhaltliche Beschränkung“

Abb. 4 Entstehung der Eiskeile und des Polygonnetzes: (mit freundlicher Genehmigung der PAGE 21)
PAGE 21: Permafrost polygons [<http://www.page21.eu/press-center/2-uncategorised/55-promotional-material/>] (Aufruf: 20.05.2016)

Abb. 5 Permafrost-Küstenerosion durch Meereseinwirkungen: (mit freundlicher Genehmigung des Alfred-Wegener-Instituts)
Alfred-Wegener-Institut (Stand: 29.10.2013): **Tauender Permafrost: Das Tempo der Küstenerosion in Ostsibirien hat sich fast verdoppelt** [<https://www.awi.de/ueber-uns/service/presse/archiv/tauender-permafrost-das-tempo-der-kuestenerosion-in-ostsibirien-hat-sich-fast-verdoppelt.html>] (Aufruf: 04.05.2016)

Abb. 6 Durchschnittstemperaturen vom Sommer 1971-2000: (20.04.2016) *erstellt mit Panoply*

Abb. 7 Durchschnittstemperaturen vom Sommer 2071-2100 im Szenario RCP 4.5: (20.04.2016) *erstellt mit Panoply*

Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?

Abb. 8 Durchschnittstemperaturen vom Sommer 2071-2100 im Szenario RCP 8.5: (20.04.2016) *erstellt mit Panoply*

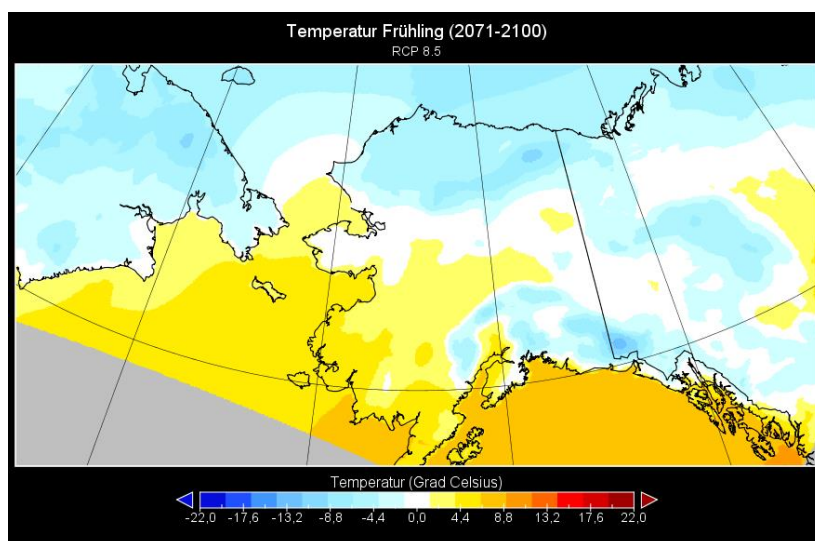
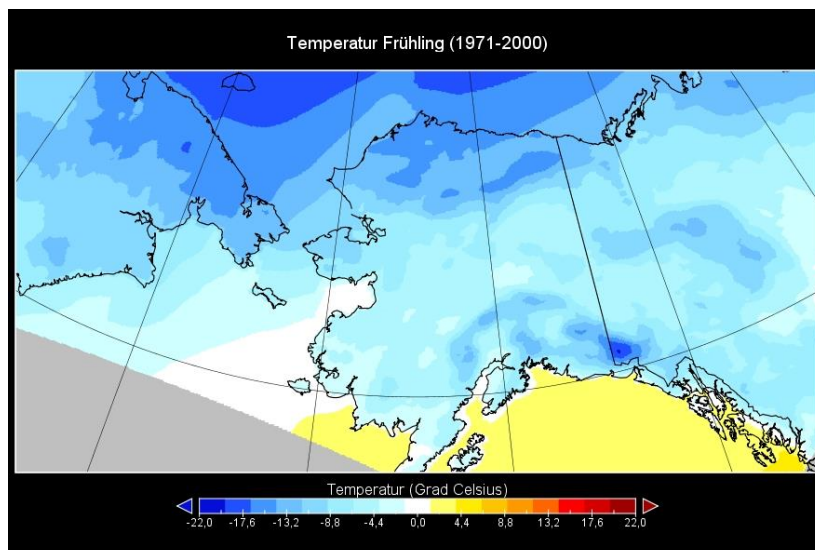
Abb. 9 Durchschnittstemperaturen vom Winter 1971-2000: (20.04.2016) *erstellt mit Panoply*

Abb. 10 Durchschnittstemperaturen vom Winter 2071-2100 im Szenario RCP 4.5: (20.04.2016) *erstellt mit Panoply*

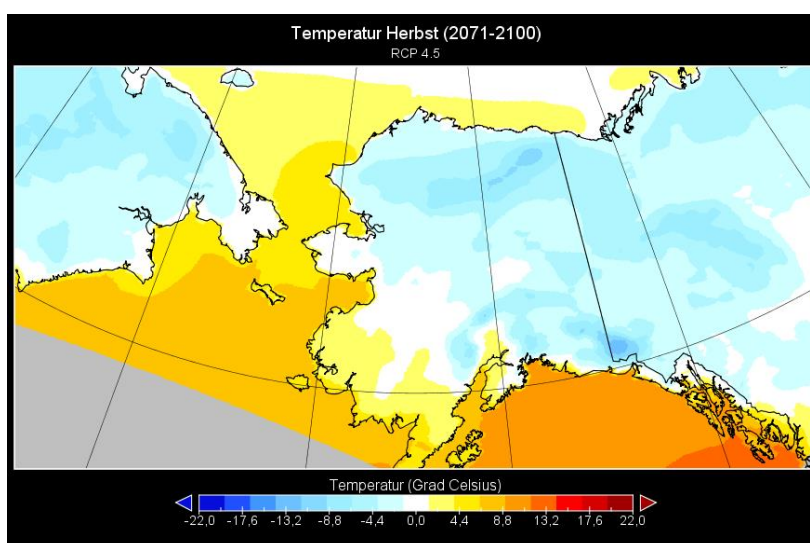
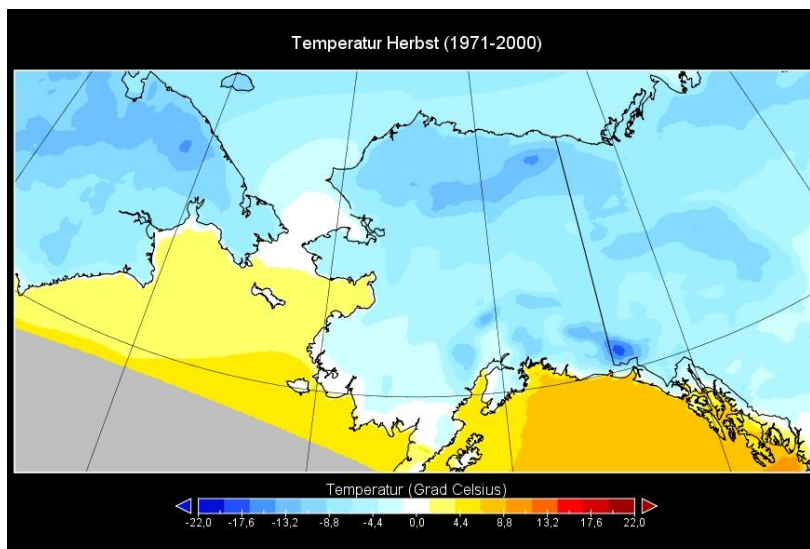
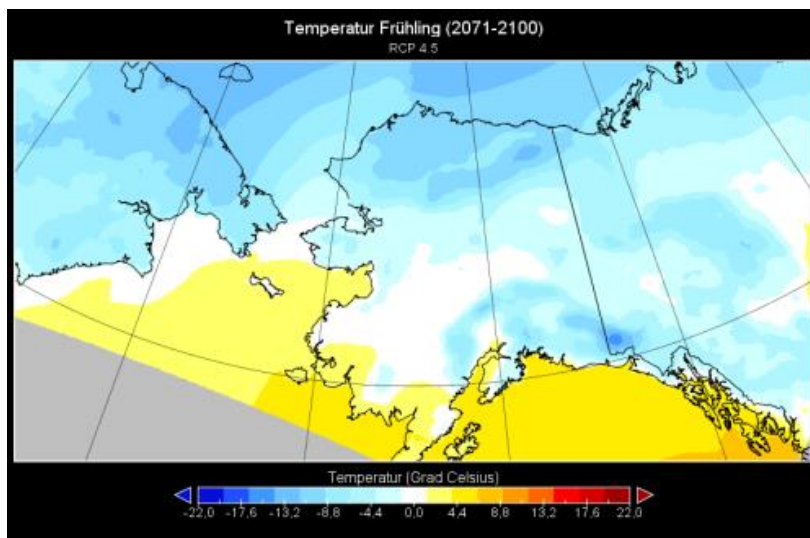
Abb. 11 Durchschnittstemperaturen vom Winter 2071-2100 im Szenario RCP 8.5: (20.04.2016) *erstellt mit Panoply*

Table 1 Temperaturunterschiede zwischen den Daten der Klimakarten: (10.06.2016) *selbst erstellt*

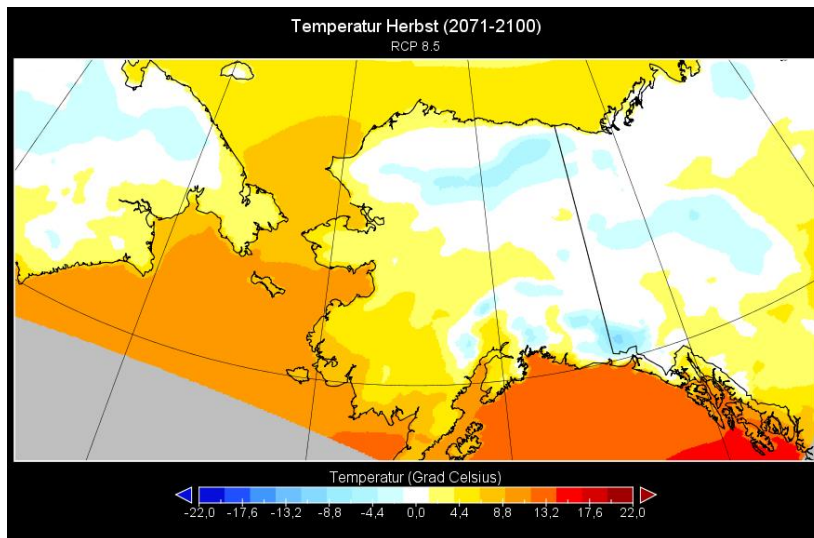
13.2.1. Weitere erstellte Klimakarten



Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?



Inwieweit gibt es Wechselwirkungen zwischen dem tauenden Permafrostboden in Alaska und dem anthropogenen Klimawandel?



Auch diese von uns verwendeten Klimakarten haben wir mit dem Programm Panoply erstellt.

13.3 Zusammenarbeit mit Experten

Hiermit wollen wir uns ganz herzlich bei der Geographiestudentin Lina Teckentrup und Dr. Dieter Kasang für ihre Unterstützung bei dem Anpassen der Klimakarten bedanken.

Vom Alfred-Wegener-Institut standen uns außerdem der Geologe Prof. Dr. Guido Grosse sowie der Geologe Dr. Lens Strauss bei allen Fragen zu dem Thema Permafrost zur Verfügung.