

Grundwassertemperaturen in Tirol – Eine Bestandsaufnahme

Felix Thalheim, Max Wallner, Rupert Ebenbichler¹

Wasser Tirol – Ressourcenmanagement-GmbH, Leopoldstraße 3, 6020 Innsbruck

Abstract

Shallow groundwater temperatures have been subject to a variety of different research projects and studies on local to global scale. Especially within the last 10 years the studies focused on the effects of anthropogenic factors and climate change on shallow groundwater bodies. However, regionalized groundwater temperature data are scarce, especially in the required appropriate spatial resolution. In any case, the means for adequate calculation taking into account the various influencing factors and boundary conditions have not been established yet.

As a part of the big framework of the renewable energy transition particularly in Tyrol (Tirol 2050 energieautonom), it was decided that a comprehensive overview on the groundwater temperatures in Tyrol should be compiled in order to achieve a better understanding of the regional distribution of groundwater temperatures and local anomalies. This is considered to be especially relevant as the use of heat pump systems that use groundwater as a heat source play an important role for the future of innovative central heating systems. For such systems, the groundwater temperature is often a limiting factor, as Austrian guidelines like the ÖWAV-Regelblatt 207 constitute that the groundwater should not be cooled below 5 °C before being reinjected into the aquifer. As a consequence, such heat pump systems are not suited for areas where the groundwater temperature is not high enough during the heating period. If this is not investigated and evaluated regularly before the construction of a heat pump system, it can lead to massive performance problems and a subsequent shutdown of the heating system.

Thus, understanding the lateral and vertical distribution of the groundwater temperatures as well as the various influencing factors like air temperature and elevation, stream water temperature, measurement depth, groundwater level, river bank infiltration, anthropogenic factors and climate change is crucial for the estimation of the dynamics of groundwater temperatures and its possible use.

To this aim, the continuous groundwater temperature time series of more than 200 measurement sites distributed across various groundwater bodies in Tyrol were compiled, analysed and interpreted regarding the mean groundwater temperature and other statistical parameters as well as the above-mentioned influencing factors. Additionally, complementary data of single or regular measurements were used.

As a result, the 37 groundwater bodies of Tyrol were described with respect to the available groundwater temperature data, depth to groundwater table, seasonal temperature variations, possible influence of river bank infiltration and snow melt, ultimately leading to a classification highlighting the groundwater body's aptitude for heat pump systems and the limiting factors.

The study showed that in most bigger groundwater bodies in Tyrol the installation of groundwater heat pump systems is basically possible, although there are several site-related factors like proximity to surface waters and shallow withdrawal depth that can impair such applications. Above altitudes of approximately 1.200

metres a.s.l., the groundwater temperatures are rather too low for efficient use, although there are exceptions as well.

Furthermore, the study highlighted the large heterogeneity of groundwater temperatures even within a single, smaller groundwater body as well as the need for site-specific investigations. Even though the elevation-based regression line developed in this study mainly shows satisfactory results, the need for a better understanding and a more sophisticated calculation tool factoring in the main influencing parameters like measurement depth, river bed infiltration, urban heat islands and geothermal gradients has to be highlighted.

Einleitung

Zuvorderst sei an dieser Stelle dem Auftraggeber – der Abteilung Wasserwirtschaft, Sg. Hydrographie – für die Finanzierung und fachliche Unterstützung bei diesem Projekt gedankt!

Allgemeines

Das oberste Ziel des Projektes, dessen Ergebnisse hier auszugsweise präsentiert werden, war es, einen Überblick über die in Tirol in den verschiedenen Gebieten vorliegenden Daten zu Grundwassertemperaturen zu erhalten. Als Ergebnis wurden auf Basis sowohl der Ist-Werte der bestehenden Messstellen als auch einer Regressionsgerade die Grundwassertemperaturen für sämtliche Grundwassergebiete Tirols ausgewertet bzw. abgeleitet, grafisch dargestellt und in Hinblick auf die Eignung für thermische Grundwassernutzungen klassifiziert.

In diesem Rahmen wurden auch die Faktoren untersucht, welche a) die Höhe der Grundwassertemperaturen und b) deren Schwankungsbreite und Saisonalität beeinflussen, um im Idealfall genauere standortbezogene Aussagen treffen zu können, als dies bislang i.d.R. der Fall ist.

Die Ergebnisse sollen eine weitere Grundlage für einen forcierten Grundwasser-Wärmepumpenausbau zur Erreichung der Energieziele bis 2050 bilden. Beim Einsatz von Grundwasser-Wärmepumpen (GWWP) insbesondere zu Heizzwecken stellt die Temperatur des Grundwassers im Bereich bis etwa 20 m Tiefe ein wesentliches Kriterium dar, da gemäß ÖWAV-Regelblatt eine Rückgabe von Wasser mit Temperaturen unter 5 °C nicht erfolgen sollte. Das Wissen über die Temperaturverhältnisse in den Grundwasserkörpern in Tirol – insbesondere auch für die zu erwartenden jahreszeitlichen Schwankungsbreiten – liegt jedoch weitestgehend nur punktuell und für Messstellen vor, die sich überwiegend in den Haupttalbereichen befinden. Für Grundwasserkörper in den Seitentälern sowie vor allem in höheren Bereichen, in denen die Temperaturen deutlich niedriger sein können als z. B. im Inntalbereich, liegen kaum Werte vor. Entsprechend ist auch die Planung von Grundwasserwärmepumpen in diesen Bereichen aufwändiger und risikoreicher.

Thematischer Hintergrund

Wassertemperaturen unterliegen selbst in ein und demselben Grundwasserkörper Schwankungen – sowohl räumlich als auch saisonal. Die Grundwassertemperatur (GWT) ist dabei sowohl hinsichtlich Niveau als auch Schwankungsbreite von verschiedenen Faktoren abhängig, die bereits seit mehr als einem halben

Jahrhundert im Rahmen zahlreicher Veröffentlichungen beschrieben und aktuell vor allem in Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels untersucht werden.

Allgemein hängt die GWT eng mit der Luft- (LT) bzw. Oberflächentemperatur (OT) und damit im Wesentlichen mit geogr. Länge und Breite zusammen (siehe BENZ ET AL. 2017a). Das bedeutet, dass die GWT tendenziell ebenso wie die LT mit der Höhe abnehmen sollte. Änderungen der Lufttemperatur betragen im Alpenraum im Mittel 0,5 bis 0,6 K/100 hm (u. a. ROLLAND, 2002).

Verschiedene Untersuchungen haben aufgezeigt, dass die durchschnittliche GWT an einem Ort nicht genau der dortigen mittleren LT oder OT entspricht (u.a. KAPPELMEYER & HAENEL 1974). Stattdessen ist die GWT oft ein wenig höher. Diesbezügliche Forschung (z.B. BENZ ET AL. 2017a, UBA 2011) zeigt einen Zusammenhang zwischen GWT und LT bzw. OT in Abhängigkeit von Evapotranspiration sowie der Dauer der Schneebedeckung. Dieser Zusammenhang wurde bis zu einem gewissen Grade funktional empirisch beschrieben (BENZ ET AL. 2017a).

Außerdem hat sich gezeigt, dass die Form der Landnutzung einen klaren Einfluss auf die GWT haben kann, es also einen Unterschied macht, ob sich die Messstellen im Wald, auf landwirtschaftlichen Nutzflächen oder in bewohnten Arealen befinden (BENZ ET AL. 2018). Im Siedlungsgebiet und insbesondere in Orten dichter bebauter und industrieller sind teils markante Erhöhungen der GWT gegenüber der „unbeeinflussten“ Umgebungstemperatur bekannt. Dieses Phänomen wird als „Subsurface Urban Heat Island“ beschrieben (siehe MENBERG ET AL. 2013; MENBERG ET AL. 2014; BENZ ET AL. 2015; BENZ ET AL. 2016), der Temperatur-Offset als „Anthropogenic Heat Index“ (cf. BENZ ET AL. 2017b; TISSEN ET AL. 2019).

Das konduktive Temperatursignal von der Oberfläche wird in der Regel rasch gedämpft, Tagesschwankungen sind nur im obersten Bereich bei oberflächennahem Grundwasser feststellbar, saisonale Schwankungen hingegen sind bis in Tiefen >10 m erkennbar, wobei aber gemäß LEDITZKY (1986) diese „jahreszeitlichen Schwankungen sehr rasch mit der Tiefe abklingen“ und bereits in 15,0–20,0 m Tiefe die „Schwankungsbreite innerhalb der Messgenauigkeit liegt“. Andererseits findet Konvektion statt, wobei das Temperatursignal von der Oberfläche durch das Trägermedium Wasser in den Boden eindringt. Insbesondere spielt dieser Prozess eine Rolle bei Grundwasserneubildungsereignissen wie Stark- und Dauerregen sowie Schneeschmelze. Ebenso wichtig ist aber auch die Interaktion von Vorfluter und Grundwasserkörper sowie von Grundwasserkörpern untereinander, bei der sich das Temperatursignal des einen aufgrund verschiedenster Faktoren mehr oder weniger auf das Temperaturniveau des anderen Wasserkörpers auswirken kann (u.a. CONSTANTZ, 1998; CONSTANTZ ET AL., 2002; STONESTROM & CONSTANTZ 2004).

Darüber hinaus konnten Anstiege der Grundwassertemperaturen nachgewiesen werden, die in Österreich innerhalb der letzten 20 Jahre im Mittel bei rund 0,8 bis 1,0 K lagen (u.a. BENZ ET AL. 2018). Dabei zeigte sich wie bei der LT auch bei der GWT die Ausprägung, dass es sich nicht um einen linearen Anstieg handelt, sondern zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. besser in einem bestimmten Zeitraum ein Übergang in ein höheres Regime stattfindet (u.a. MENBERG ET AL. 2014).

Methodik

Anmerkung: Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Untersuchungen werden in dieser Veröffentlichung lediglich auszugsweise präsentiert.

Mit Fokus auf kontinuierliche und möglichst langjährige Zeitreihen wurden vom Hydrographischen Dienst, der TIWAG, der BBT, ÖBB, Sandoz und geoZT Daten erhoben. Die Daten der über 200 Messstellen des HD bildeten die Basis, die weiteren Messstellen wurden als Ergänzungen herangezogen. Für die Beschreibungen der Grundwassergebiete wurde notfalls auf Einzelmessungen aus der Anlagenüberwachung sowie der GZÜV zurückgegriffen. Insgesamt wurden so von 263 Messstellen kontinuierliche oder zumindest regelmäßige (wöchentliche bis monatliche) Daten zusammengetragen. Für den Großteil der statistischen Auswertungen wurde darauf geachtet, nur Daten aus dem Referenzzeitraum 01.11.2015 bis 31.10.2018 zu verwenden, für welchen von insgesamt 204 Messstellen kontinuierliche Daten vorlagen.

Für die Untersuchung der langjährigen Trends wurden die Messstellen gewählt, für welche über einen längstmöglichen gemeinsamen Überschneidungsbereich GWT-Daten vorlagen. Es wurde der Zeitraum 01.11.2003 bis 31.10.2018 ausgewählt, für welchen von 13 Messstellen Zeitreihen vorlagen.

Um die Änderungen der GWT mit der Tiefe einer genaueren Untersuchung zu unterziehen, wurden kontinuierliche Temperaturprofile sowie monatliche Handmessungen aus den 1990er Jahren bereitgestellt. Die kontinuierlichen Messungen stammen von den Messstellen GW70346034 und GW70936035, wo in 4-5 Tiefenstufen die GWT gemessen wird. Die Tiefenprofile aus den Handmessungen (monatliche Messungen in 1- bis 2-Meter-Tiefenstufen des Jahres 1999) wurden für elf Messstellen digitalisiert und ausgewertet.

Um in Erweiterung zur allgemeinen statistischen Aufbereitung genauere Erkenntnisse über den Vorflutereinfluss im Zusammenspiel mit dem lokalen Wetter zu erlangen, wurden sechs Schwerpunktgebiete ausgewählt, in denen Daten mehrerer Grundwassermessstellen (GWT, Grundwasserstand) sowie zu Vorfluter und Wetter vorliegen.

Aus dem Verhältnis von mittlerer GWT und Geländehöhe wurde eine Regressionsgerade abgeleitet, welche im Rahmen dieser Beschreibungen zur Abschätzung der mittleren GWT herangezogen wurde. Um die mittlere Schwankungsbreite und den Vorflutereinfluss auf selbige grob bestimmen zu können, wurden die Informationen aus der statistischen Auswertung mit den Erkenntnissen bezüglich Vorfluter- und Messtiefeneinfluss verschnitten.

Als letzter Schritt wurden die 37 Grundwassergebiete (GWG) Tirols (nach hydrologischem Atlas Österreichs) zunächst kurz beschrieben, die jeweilige Datenlage dargestellt und dann die GWT-Daten für die Grundwassergebiete grafisch dargestellt und ausgewertet.

Um das Projektziel einer möglichen Verfügbarmachung der Ergebnisse als Layer im Tiroler Rauminformationssystem zu erreichen, wurden folgende Schritte gesetzt:

- Klassifikation der Grundwassergebiete hinsichtlich der Eignung für Grundwassernutzungen zu Heizzwecken (grün = „geeignet“, orange = „bedingt geeignet“, rot = „nicht geeignet“)
- Klassifikation der verfügbaren GWT-Daten (dreijährige Mittelwerte auf Tageswertbasis) aus kont. Messung, farbliche Abstufung aufsteigend von blau nach rot

Ergebnisse

Statistische Auswertung

Die Grundwassertemperaturen der Tageswerte der 204 ausgewählten Zeitreihen liegen im Mittel zwischen 5,7 und 14,4 °C, der Durchschnitt beträgt 8,9 °C. Abb. 1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der mittleren GWT der Zeitreihen in 9 Klassen. Daraus wird ersichtlich, dass sich die Mehrzahl der mittleren GWTs auf die Klassen 3 bis 5 verteilt (133 von 204).

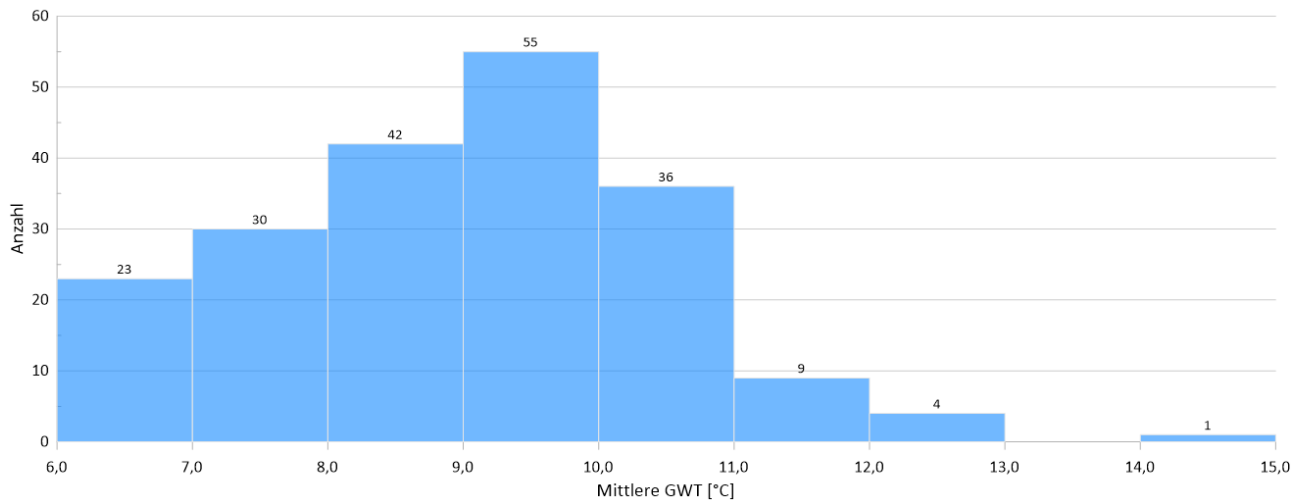


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung der mittleren GWT der Zeitreihen in 9 Klassen

Zusätzlich zu Mittelwert, Minima, Maxima und Perzentilen wurden die Standardabweichungen (StAbw) der Zeitreihen ermittelt, um eine Kenngröße der Streuung der Datenreihen zu erhalten. Die Häufigkeitsverteilung der StAbw kann Abb. 2 entnommen werden. Demnach liegt die Mehrheit der Zeitreihen in der 1. Klasse mit StAbw bis 1,0 K, im Mittel liegt sie bei 0,9 K.

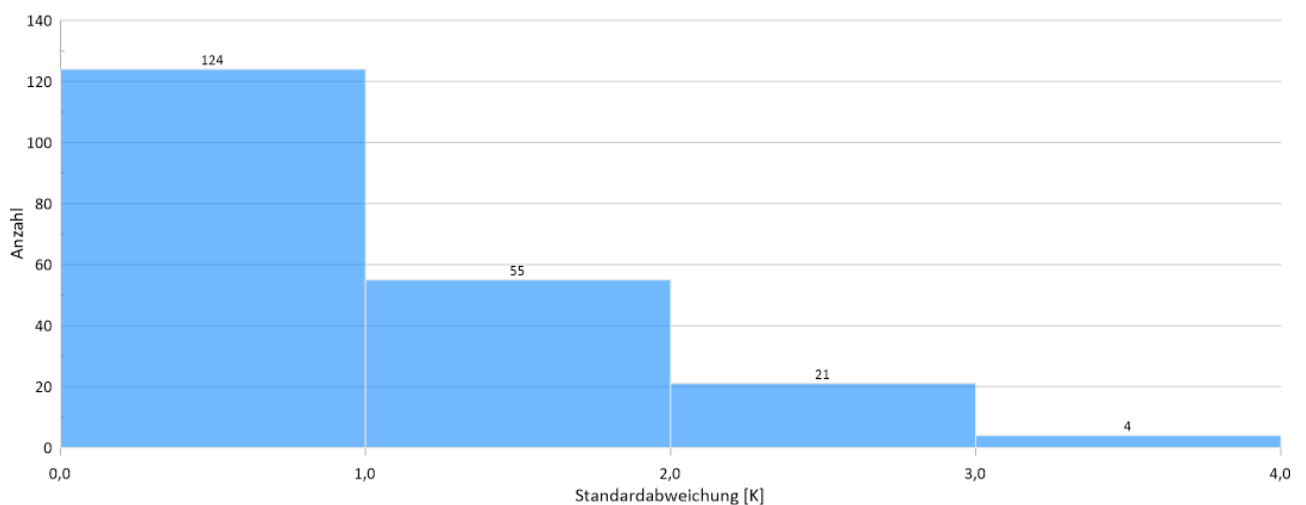


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der StAbw der Zeitreihen in 4 Klassen

Wegen der anzunehmenden Abhängigkeit der Luft- wie auch Wassertemperaturen von der Geländehöhe wird in Abb. 3 zunächst die mittlere GWT des Auswahlzeitraums aller 204 Stationen gegen die

Geländehöhe geplottet. Dabei ist deutlich die Abnahme der Grundwassertemperatur mit der Geländehöhe zu erkennen, welche etwa 0,5 K pro 100 Höhenmeter beträgt. Allerdings ist die relativ hohe Schwankungsbreite in den einzelnen Höhenlagen zu erkennen, die bei ähnlicher Höhenlage bis zu 4,0 K oder gar 6,0 K betragen kann.

Es ist ebenfalls ersichtlich, dass die Punktwolke an einigen Stellen besonders verdichtet erscheint, weswegen zur genaueren Unterscheidung ein Class-Scatter-Plot erzeugt wurde. Dadurch wurden die 204 Datenpunkte nach den 38 Grundwassergebieten klassifiziert, aus denen Daten vorliegen. Dabei sind u. a. die Datendichte in Unter- und Oberinntal sowie Oberem Drautal und Pustertal gut ersichtlich, ebenso die hohe Geländehöhen-Bandbreite bei ähnlichem GWT-Niveau im Ötztal.

Zusätzlich zu Zwei-Komponenten-Systemen wurden Überlegungen angestellt, ob sich bei Ergänzung von zwei Parameter um eine dritte Ebene in Form einer Klassifikation bestimmte weitere Zusammenhänge erkennen lassen. In Abb. 4 werden daher Standardabweichung und Vorfluterentfernung gegenübergestellt und nach der Messtiefe klassifiziert.

Anhand dieser Abbildung wird ein deutlicherer Zusammenhang von niedrigen Standardabweichungen mit höherem Vorfluterabstand und höherer Messtiefe ersichtlich. Das ist unter anderem an der klaren Häufung der dunkleren Punkte (Messtiefe > 15,0 m) im Bereich von 1,0 K StAbw erkennbar. Höhere StAbw bei größerem Vorfluterabstand sind mehrheitlich an niedrige Messtiefen gebunden.

In Abb. 5 werden Eintauch- und Messtiefe gegenübergestellt und nach Standardabweichung in sieben Klassen unterteilt. Geringe Standardabweichungen (< 1,0 K) werden dabei in Blautönen dargestellt, höhere aufsteigend von Orange nach Rot. Die StAbw zeigt sich verhältnismäßig unabhängig von der Eintauchtiefe, Punkte mit Blau- und Rottönen sind im Bereich von Messtiefen von 4,0 bis 12,0 m und Eintauchtiefen von 0,0 bis 9,0 m recht ausgewogen durchmisch, Maxima wie Minima der Standardabweichungen können bei Eintauchtiefen unter 1,0 m, aber auch bei > 8,0 m auftreten. Erst oberhalb des Bereiches von 12,0 bis 16,0 m Messtiefe dominieren geringe Standardabweichungen klar.

14. bis 15. Oktober 2021

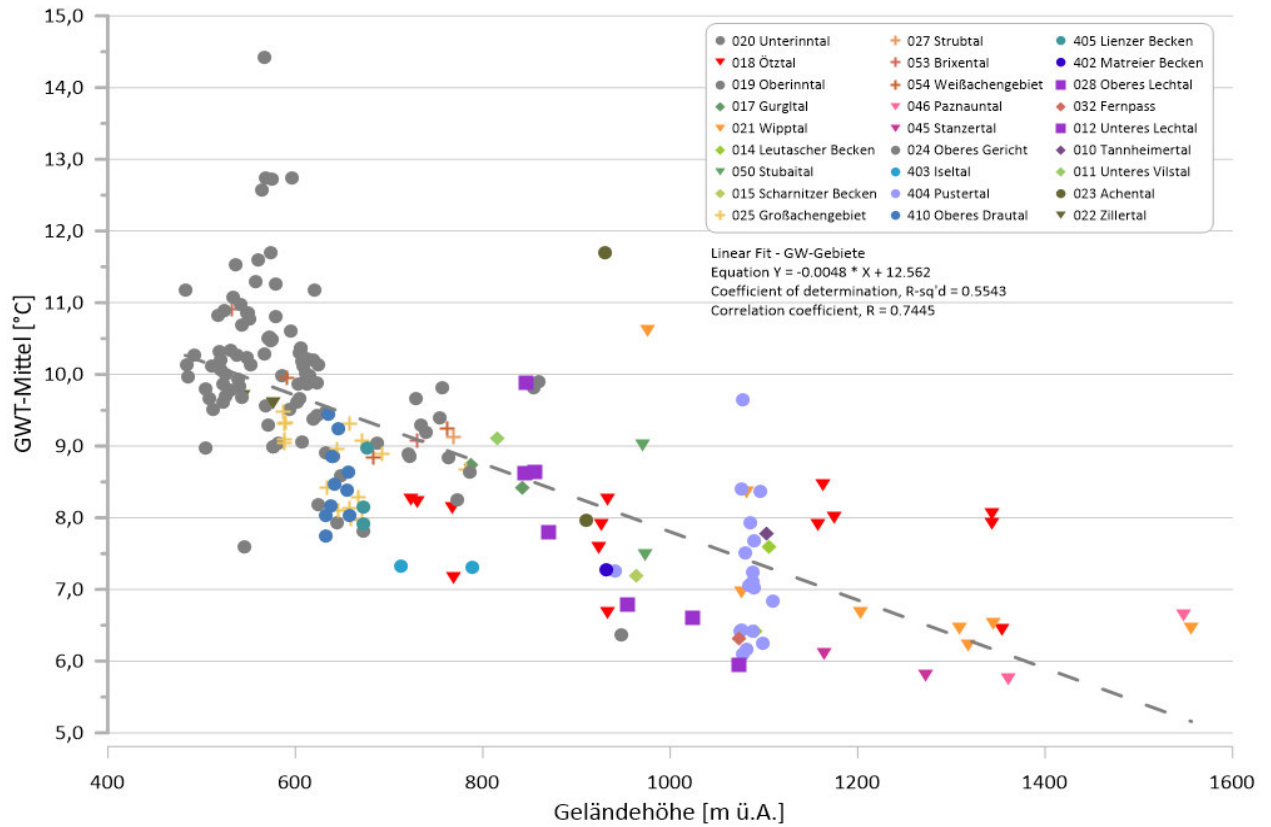


Abb. 3: Abhängigkeit der mittleren Grundwassertemperatur von der Geländehöhe

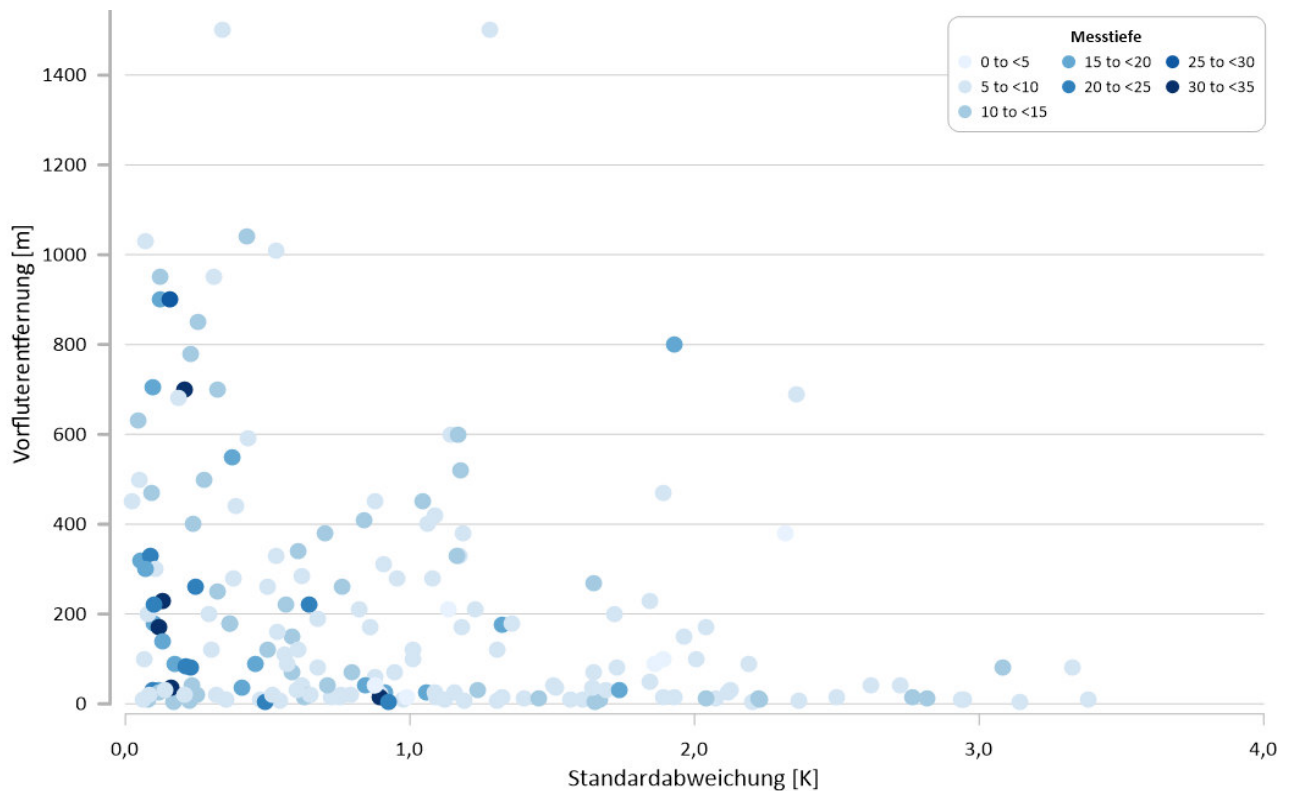


Abb. 4: StAbw vs. Vorfluterentfernung klassifiziert nach der Messtiefe

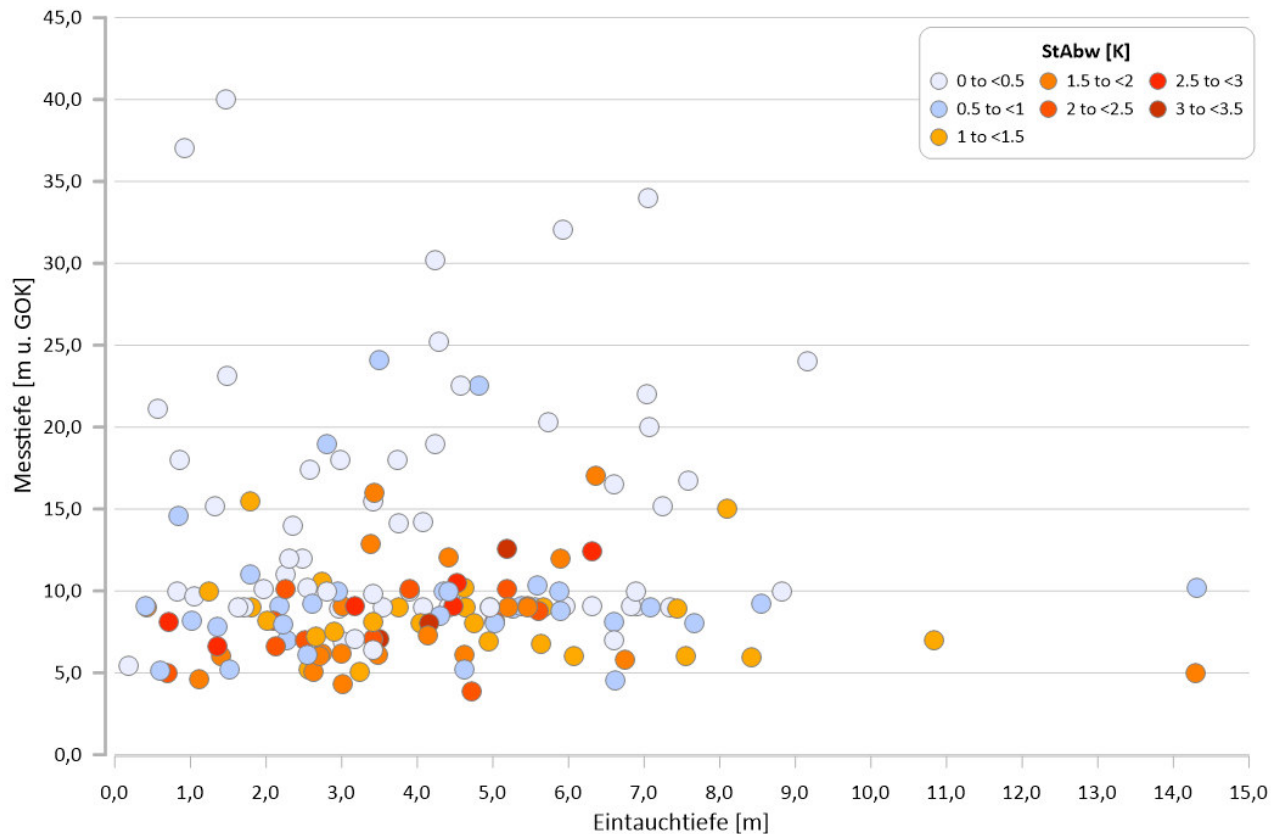


Abb. 5: Eintauchtiefe und Messtiefe klassifiziert nach Standardabweichung

GWT-Profile

Im Folgenden werden von den 11 Messstellen mit Temperaturprofildaten aus Stichtagsmessungen und den kontinuierlichen GWT-Aufzeichnungen aus verschiedenen Tiefenstufen exemplarisch die Auswertungen von je einer Messstelle angeführt. Dabei wird zunächst auf die kont. GWT-Messungen in fünf Tiefenstufen der Grundwassersonde GW70346034 eingegangen (Abb. 6).

Mit der Tiefe ist allgemein eine Abnahme der Temperatur zu verzeichnen. Desto tiefer zudem der Messpunkt liegt, umso weniger schwankt die GWT im Jahresverlauf. In 7 m Tiefe schwankt sie jährlich etwa zwischen ca. 11,0 °C und bis über 15,0 °C, in 14,0 und auch 24,0 m Tiefe im Jahresverlauf lediglich um etwa 0,2-0,3 K. Über den Messzeitraum weist die GWT in allen Tiefenstufen einen deutlichen Anstieg auf, der in der obersten Tiefenstufe am markantesten ist. Dort liegt sie heute um ca. 1,0 K höher als zu Beginn. In 14,0 m Tiefe beträgt der Anstieg 0,1 K pro Jahr. Die Maxima der GWT treten in der ersten Tiefenstufe im Spätsommer bis Herbst auf. Mit jeder weiteren Tiefenstufe tritt der Peak später auf, bei 12,0 m im November/Dezember, bei 14,0 m im 1. Quartal des Folgejahres. Bei der 24-m-Tiefenstufe dann sogar zur Jahresmitte.

Allgemein weist die unterste Tiefenstufe ein anderes Verhalten auf als die vier oberen, die GWT sinkt zunächst bis Anfang 2015 und steigt ab dort ähnlich der 14-m-Stufe an, allerdings phasenverschoben und mit einem Versatz von ungefähr 1,0 K.

14. bis 15. Oktober 2021

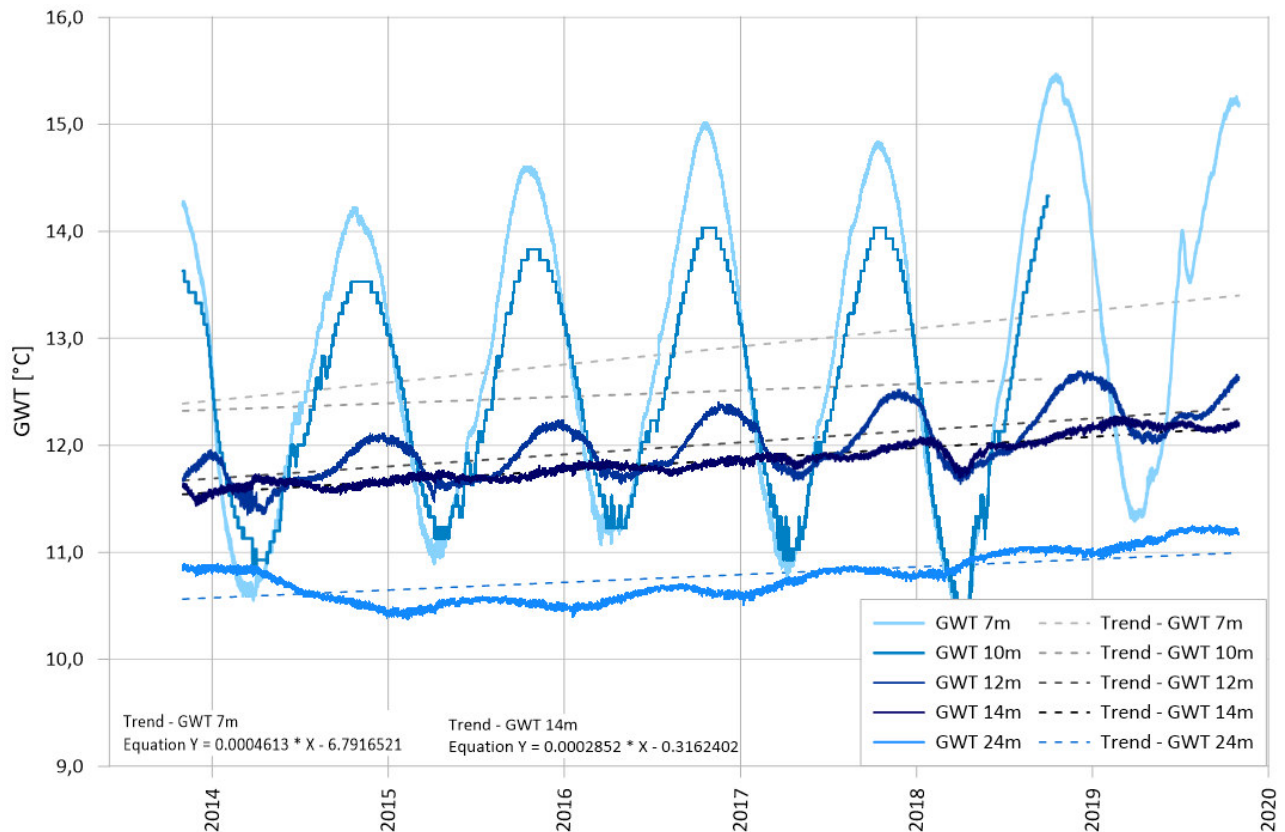


Abb. 6: Verlauf der GWTs der Sonde GW70346034 von 2013 bis 2020

Das zweite Beispiel zeigt die Temperatur-Tiefenprofile der monatlichen Stichtagsmessungen aus dem Jahr 1999 an der Messstelle Hötting Blt 27 (Abb. 7). Im Gegensatz zu den in weiteren Profilen vorherrschenden eher symmetrischen Trichterformen oder auch Glockenformen weist diese Messstelle eine stark verzerrte Trichterform auf, die oberflächennah erhöhte GWTs anzeigt. Die stark verzerrte Trichterform spiegelt sich auch beim Mittelwert wider, der an der Basis bei etwa 9,0 °C beträgt, bis 16,0 m Tiefe bereits auf über 10,0 °C ansteigt und dann im oberflächennahen Bereich fast 11,3 °C erreicht.

In 3,0 m Tiefe beträgt die Schwankungsbreite der GWT nahezu 8,0 K, in 28,0 m Tiefe lediglich etwa 0,5 K. Von August bis November nimmt die GWT kontinuierlich ab, im März und Mai kommt es gar zu einer doppelten Temperaturumkehr, die GWT nimmt erst von 3,0 zu 4,0 m ab, bleibt kurz gleich, steigt dann bis 16,0 m an, um hernach wieder abzunehmen. Bei 16 m existiert ein markanter Knickpunkt, ab dem die GWT zu jedem Zeitpunkt abnimmt. Von diesem Punkt abwärts liegt die Spreizung bei weniger als 1,0 K.

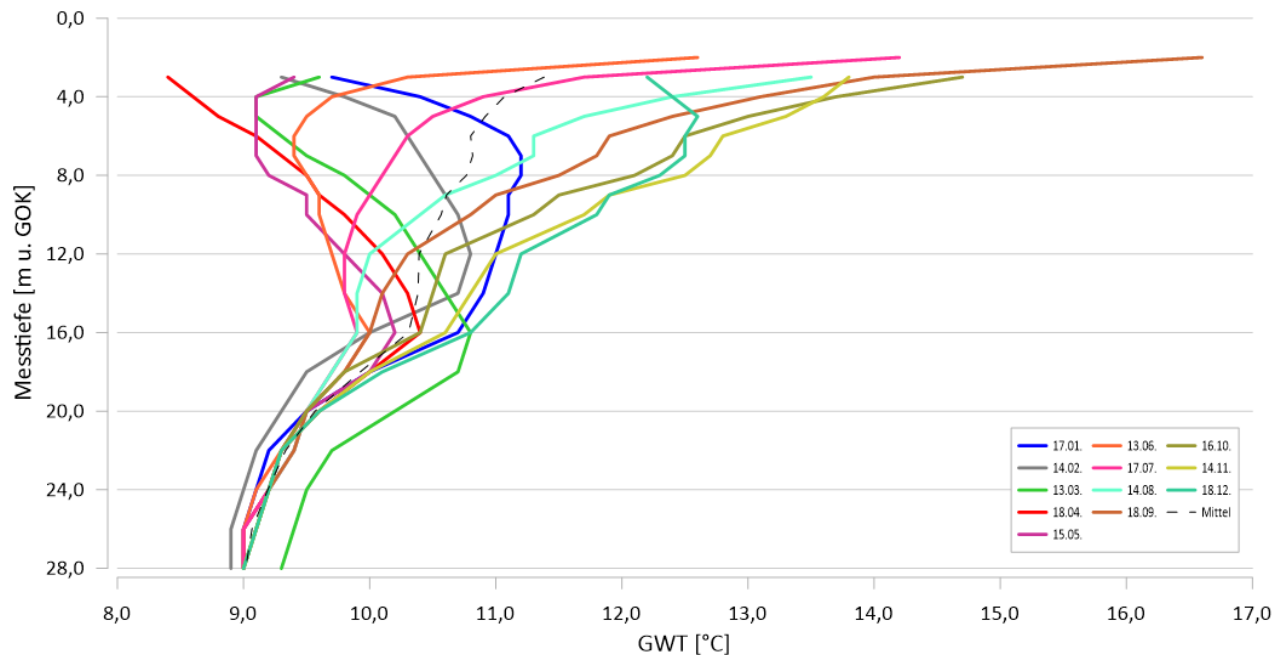


Abb. 7: monatliche Temperaturprofile des Jahres 1999 der Messstelle Hötting Blt 27

GWT-Trends und Climate Regime Shifts

Zur Trendanalyse wurden 13 Stationen ausgewählt, die den längsten gemeinsamen Zeitraum an GWT-Daten abdecken (GW70223001, GW70320020, GW70335017, GW70411041, GW70419012, GW70512012, GW70514034, GW70520103, GW70531102, GW70716067, GW70801003, GW70905013, GW70936039). Für jeden Tag des Zeitraumes wurden auf Tagesbasis je Minima, Maxima, Mittelwerte sowie 5- und 95-Perzentilen berechnet und letztlich eine Vertrauensbereich-Grafik erstellt (Abb. 8).

Der Mittelwert liegt bei knapp 9,1 °C, wobei 2007 mit 8,7 °C das kälteste und 2017 mit 9,5 °C das wärmste Jahr war. Daraus lässt sich ein linearer Anstieg von 0,06 K pro Jahr ableiten. Allerdings ist ebenfalls deutlich, dass es keinen klar linearen Anstieg gibt, sondern sich die Werte bis 2012 auf einem ähnlichen Niveau bewegen (im Mittel 8,9 °C), wohingegen sie ab 2014 ein Mittel von 9,4 °C aufweisen.

Die Maxima liegen im Mittel bei 10,6 °C, der Anstieg der Temperatur ist deutlicher und liegt bei mehr als 0,08 K pro Jahr. Auch hier ist aber ersichtlich, dass der Anstieg eigentlich nicht linear erfolgt, sondern sich ähnlich zu den Mittelwerten bis etwa 2012 auf einem ähnlichen Niveau bewegt (Mittelwert 10,4 °C) und ab 2013/14 deutlich höher liegt (11,2 °C). Die Minima hingegen zeigen den geringsten Anstieg und weisen zudem die höchsten Schwankungen auf.

Auffällig sind darüber hinaus die Zeitpunkte der Maxima und Minima. So treten die jährlichen Maxima der Temperatur im Mittel nahezu ausschließlich in der zweiten Jahreshälfte auf, meist im Spätherbst bis Winter. Die jährlichen Minima der Mittel- und Maximaltemperaturen treten schwerpunktmäßig zwischen März und Mai auf.

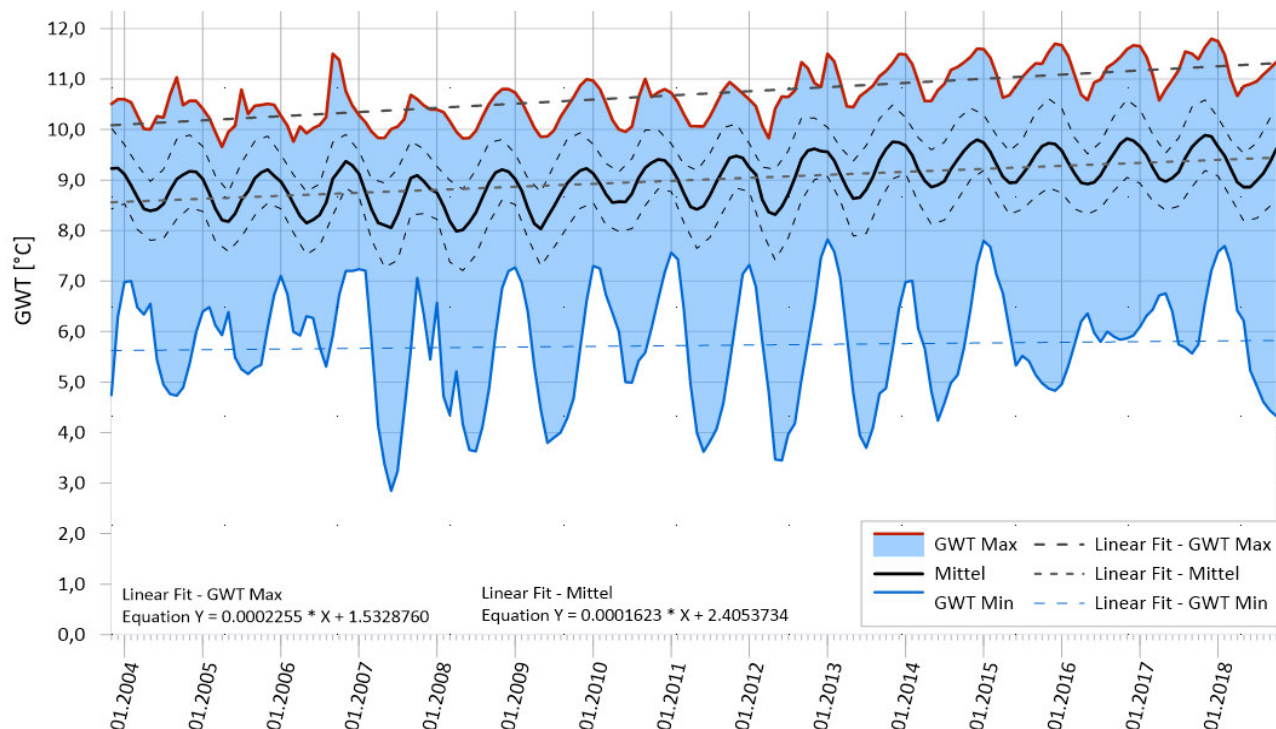


Abb. 8: Trendanalyse der Temperatur für den Zeitraum 01.11.2003 bis 31.10.2018

Um diese Hypothese zu überprüfen, dass es sich bei dem auffällig nicht-linearen Anstieg der GWT im Bereich der Jahre 2010 bis 2014 um einen Climate-Regime-Shift handeln könnte, wurde das CRS Detection Tool (RODIONOV, 2004) auf sechs Datenreihen im von 2003 bis 2018 angewendet.

Bei einem Significance Level von 0,15, einer Cut-Off-Length von 10 Jahren und einem Huber Weight Parameter von 1 (gemäß BENZ ET AL., 2018) ergibt sich im Jahr 2010 (und auch für Folgejahre) ein deutlich erhöhter Regime-Shift-Index (

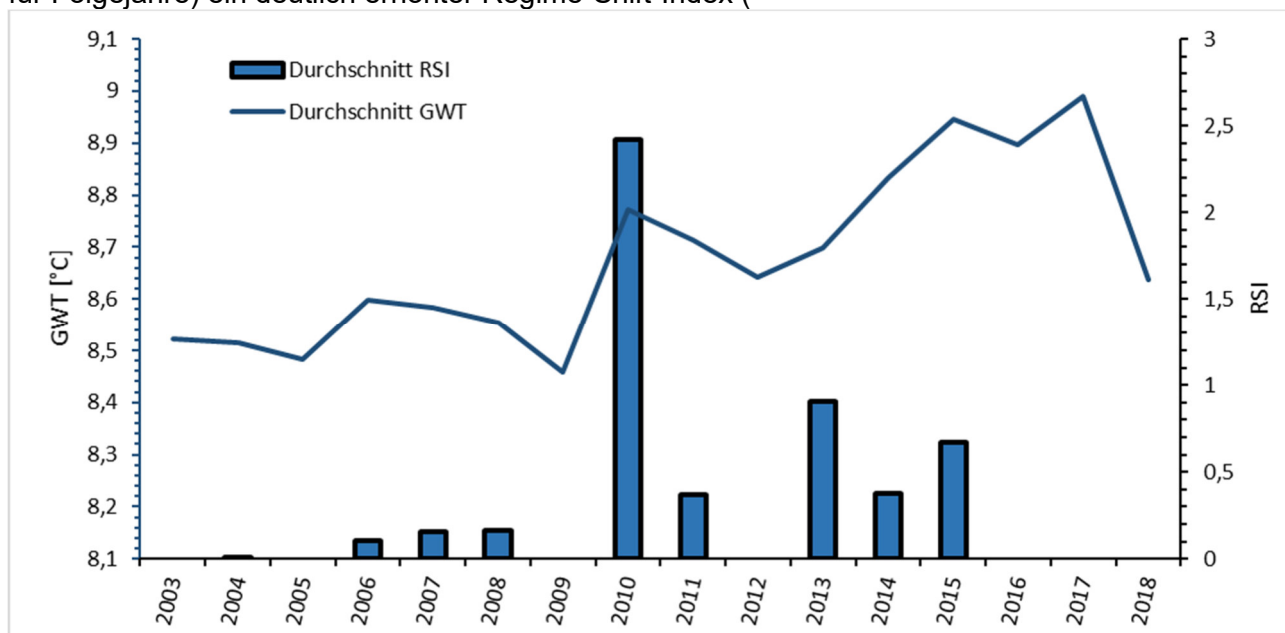


Abb. 9(Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Das deutet auf die Möglichkeit hin, dass sich in den Zeitreihen der ausgewählten Messstellen tatsächlich die Auswirkungen eines Climate-Regime-Shifts widerspiegeln.

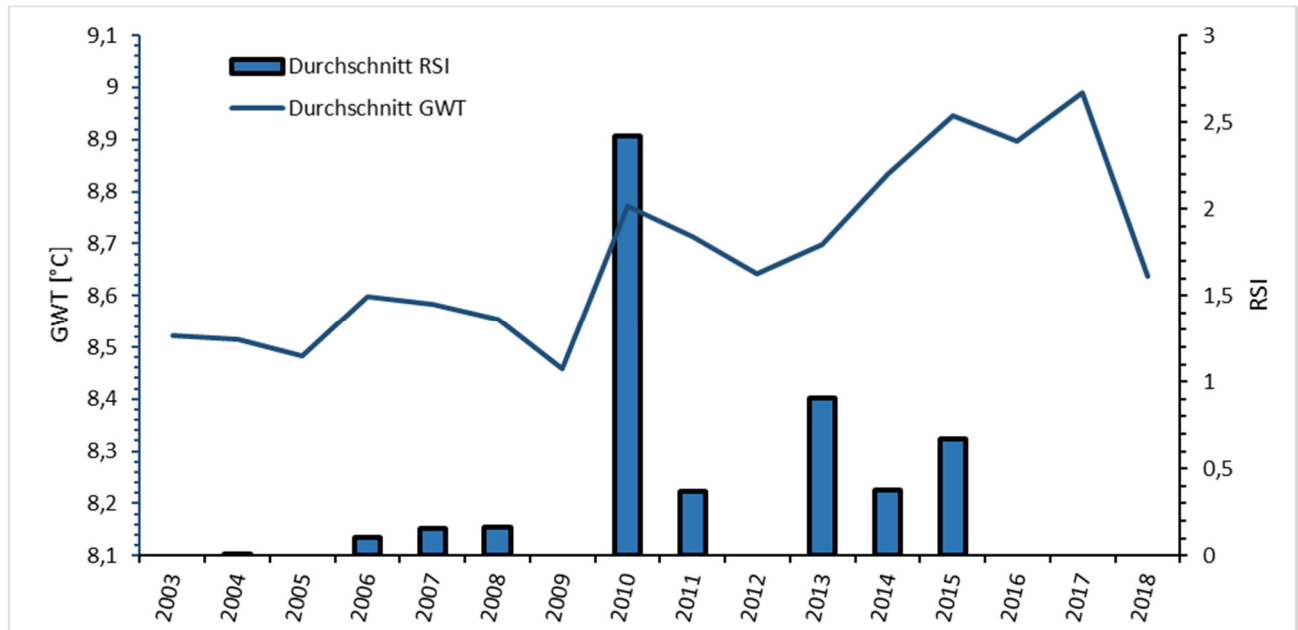


Abb. 9: Jahresmittelwerte der GWT und Regime-Shift-Index (RSI)

Beschreibung und Klassifikation der Grundwassergebiete

Auf Basis der Erkenntnisse aus den vorangegangenen Analysen wurden schließlich die 37 Grundwassergebiete Tirols beschrieben. Dabei wurde zunächst eine Übersichtsabbildung einschließlich der Position der Grundwassersonden vorangestellt und nachfolgend jeweils auf die Datenlage eingegangen. Lagen Daten aus kontinuierlicher Aufzeichnung vor, wurden diese für den Referenzzeitraum geplottet. Ab einer gewissen Anzahl an Datenreihen wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit eine Vertrauensbereich-Abbildung erstellt. Ein Beispiel dafür zeigt Abb. 10, in welcher die Daten der 15 Sonden im GWG Großachengebiet zusammengefasst sind.

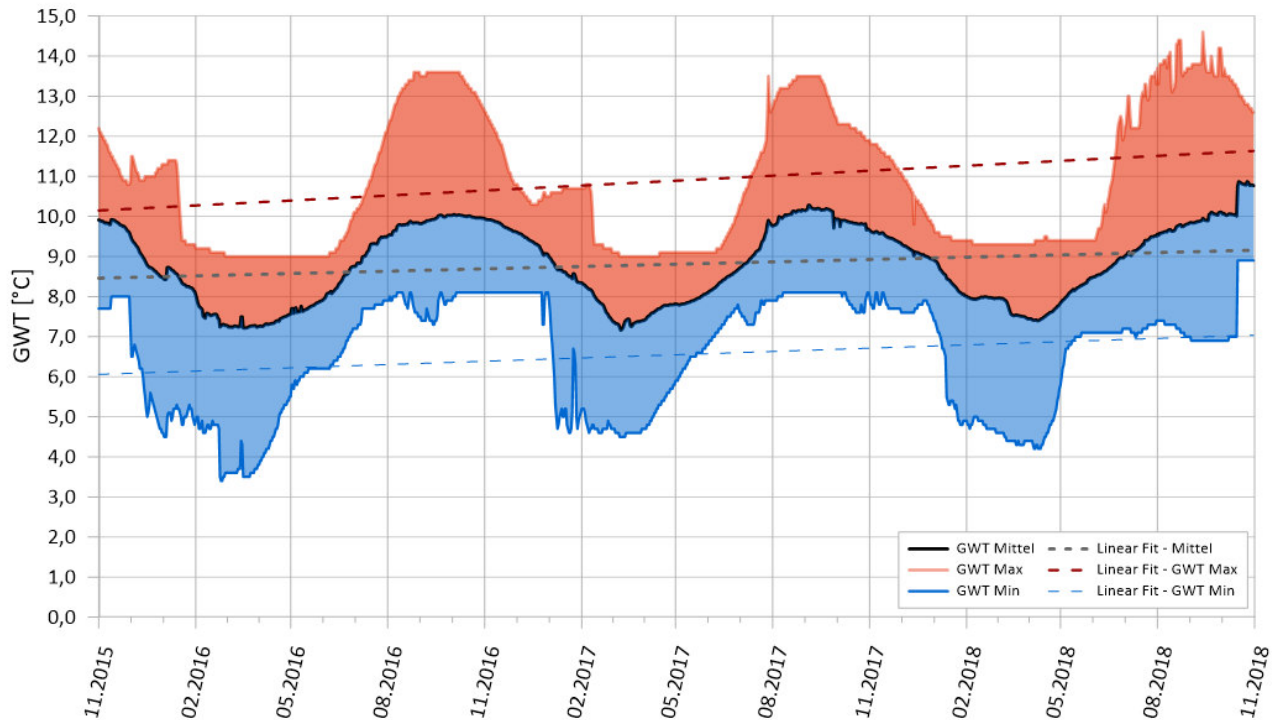


Abb. 10: Vertrauensbereich-Darstellung der Messstellen im Großachengebiet

Für einen besseren Überblick über mittlere GWT, Schwankungsbreite und Perzentilen wurde zusätzlich zur tabellarischen Darstellung noch zu jedem GWG ein Box-Whisker-Plot erstellt und eingefügt. In Abb. 11 sind die Charakteristika der 15 Grundwassersonden aus dem GWG Großachengebiet dargestellt. Bei relativ ähnlichem GWT-Niveau sind hier gut die starken Unterschiede bei den Schwankungsbreiten erkennbar.

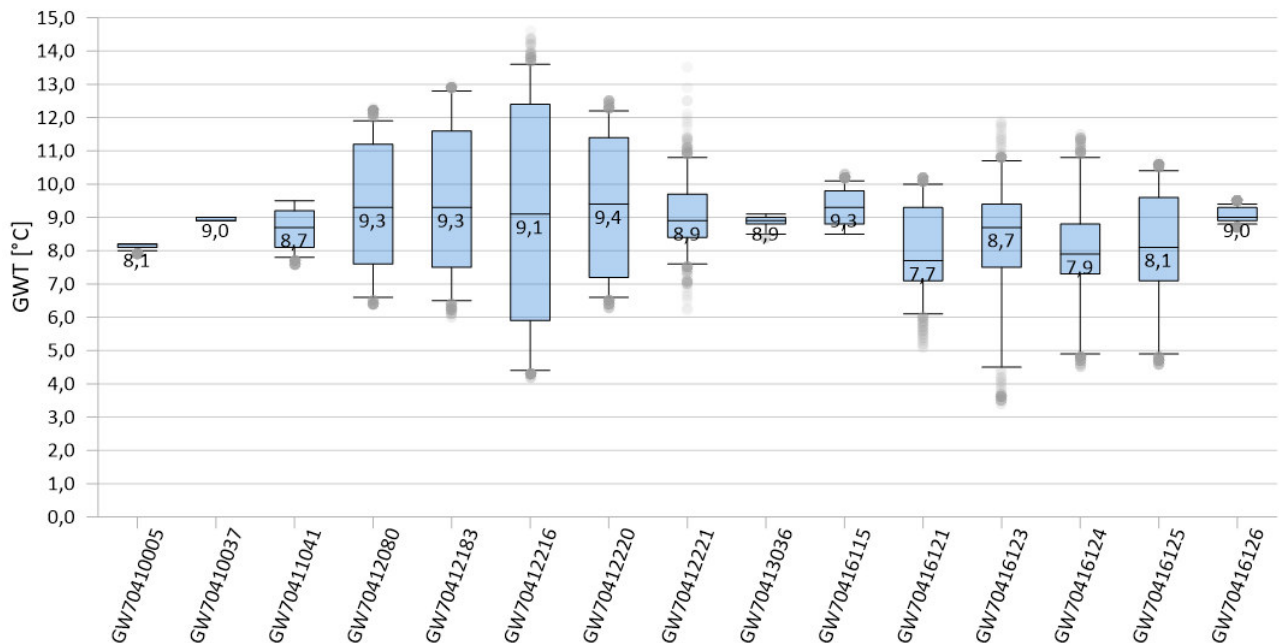


Abb. 11: Whisker-Plots der Datenreihen im GWG Großachengebiet

Lagen keine kontinuierlichen Daten vor oder wurden aus anderen Gründen Einzelmessungen aus dem WIS,

aus Bescheiden oder der GZÜV herangezogen, wurde dies gesondert angeführt und jedenfalls von einer grafischen Darstellung abgesehen.

Die Beschreibung eines jeden GWG wird von einem farblich gekennzeichneten Kästchen abgeschlossen, welches die „Einschätzung“ der GWT-Situation im GWG einschließlich gemessener und berechneter mittlerer GWT und Schwankungsbreite etc. enthält. Die farbliche Kennzeichnung der Grundwassergebiete je nach Eignung zur thermischen Grundwassernutzung (insb. zu Heizzwecken) erfolgte wie in der Methodik beschrieben in drei Kategorien – grün = „geeignet“, orange = „bedingt geeignet“, rot = „nicht geeignet“. Die GWG wurden im GIS gleichsam eingefärbt, die Übersichtskarte von Tirol kann in Abb. 12 eingesehen werden. Zusätzlich wurden die Ist-Daten aller 204 Messstellen als klassifizierte Punkte eingebunden, die aber in der Abbildung aus Übersichtsgründen nicht enthalten sind.

Die Klassifikation der GWG lässt natürlich einen gewissen Ermessensspielraum, in manchen Gebieten wurde nicht nur die mittlere GWT als Kriterium herangezogen, sondern auch Wasserqualität bzw. bekannte Probleme mit selbiger oder insbesondere zu hohe Grundwasserstandsschwankungen bzw. allgemein zu tiefes GW-Niveau (z.B. Leutascher Becken, Hinteres Zillertal). Selbstredend lassen sich in jedem Grundwasserkörper Standorte finden, an denen aufgrund von z.B. Entnahmetiefe, Auslegung der Anlage, hydrogeologischen Gegebenheiten die Anforderungen an das GWT-Niveau nicht erfüllt werden können. Zudem sind die Grundwassergebiete teils sehr große Einheiten, die sich oft über Längen von etlichen Kilometern und über mehrere hundert Höhenmeter erstrecken. Daraus resultierende Unterschiede wurden versucht bei der Einschätzung zu berücksichtigen.

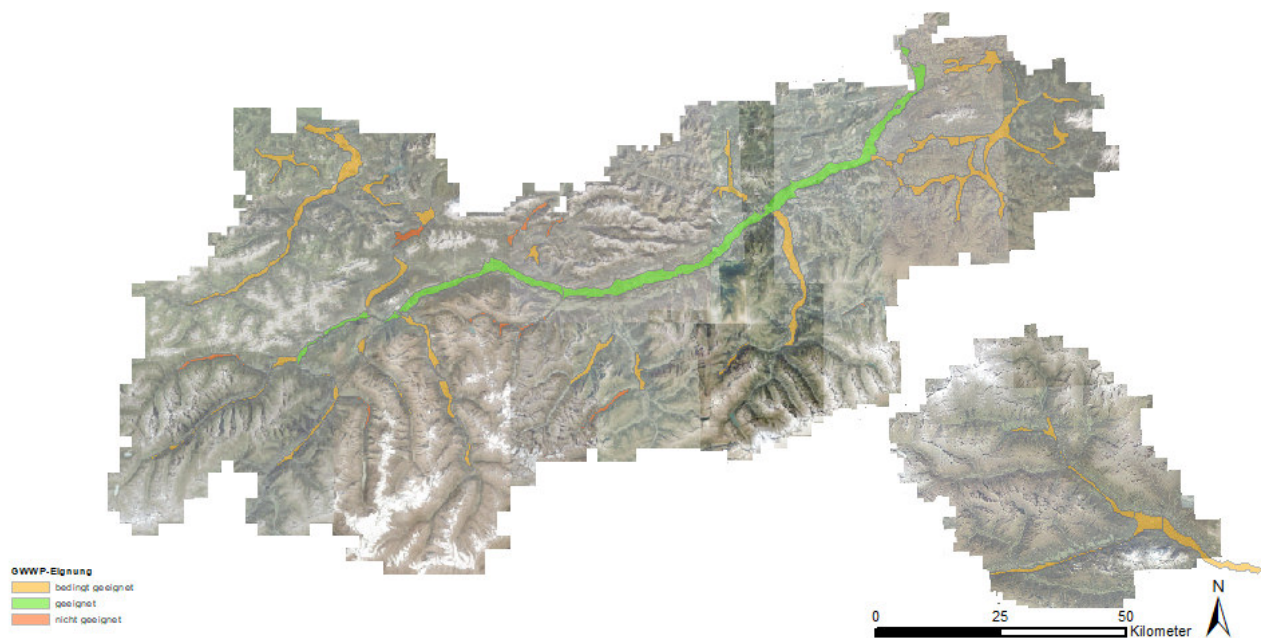


Abb. 12: Übersichtskarte der Grundwassergebiete Tirols mit Klassifizierung nach Eignung für GWWP

Abschätzung von GWT und Schwankungsbreiten

Bis auf gewisse Ausnahmen kann die mittlere GWT hinreichend gut mit der aus den statistischen Auswertungen abgeleiteten vereinfachten Regressionsgleichung abgebildet werden:

$$GWT_{mean} [^{\circ}C] = 12,8 \text{ } ^{\circ}C - 0,005 \left[\frac{K}{m} \right] * \text{Geländehöhe [m ü. A.]}$$

Unter Berücksichtigung der Unterschiede der mittleren GWT an einzelnen Standorten erscheint eine Bandbreite von $\pm 1,0$ K repräsentativ. Somit ergibt sich

$$GWT_{mean} [^{\circ}C] = 12,8 \text{ } ^{\circ}C - 0,005 \left[\frac{K}{m} \right] * \text{Geländehöhe [m ü. A.] } \pm 1 \text{ K}$$

Zur Annäherung an die durchschnittliche saisonale Schwankungsbreite bietet sich die Betrachtung der Differenz zwischen 95er- und 5er-Perzentile an, die nach verschiedenen Tests mit $\Delta GWT = \pm 2,0$ K angesetzt wurde. Damit ergibt sich für jeden potenziellen Messstellenort $GWT = GWT_{mean} + \Delta GWT$, was einer absoluten saisonalen Schwankungsbreite von 3,0 K um den auf Basis der Höhenlage ermittelten mehrjährigen Mittelwert gleichkommt.

Um diese Herangehensweise zu überprüfen, wurde für 204 Messstellen die mittlere GWT für die jeweilige Geländehöhe auf Basis der Regressionsgleichung kalkuliert und mit den Messwerten verglichen. Zusätzlich wurde das Intervall $\pm 1,0$ K für jede Messstelle berechnet und letztlich überprüft, ob die Mittelwerte in diesem Intervall liegen. Das ist bei 148 von 204 Sonden der Fall, also bei 73 %. Bei den 56 Messstellen, die außerhalb des Intervalls liegen, wurde nachfolgend überprüft, welche Ursache dies haben könnte. Dabei wurde letztlich in drei Fälle unterschieden: AHI (Anthropogenic Heat Index), hoher Vorflutereinfluss und Sonstige. Diese wurden zunächst grob automatisiert klassifiziert und nachfolgend individuell überprüft. So ließen sich letztlich von den 56 abweichenden Messstellen 17 als „AHI“ und 19 als „vorfluterbeeinflusst“ klassifizieren. 20 fallen in die Klasse „Sonstige“.

Dieser Vergleich von berechneter GWT, gemessener GWT und Bandbreite einschließlich Klassifizierung wurde in Abb. 13 zusammenfassend dargestellt. Zusätzlich wurde die Abbildung noch um die berechnete mittlere Schwankungsbreite ΔGWT von $\pm 2,0$ K ergänzt sowie P95 und P5 sämtlicher Messstellen geplottet. Der Einfachheit halber wurde die Klassifizierung in „None“ (= unauffällig), „AHI“ (Anthropogenic Heat Index) und „Vorflutereinfluss/Sonstige“ vorgenommen. Bei 144 von 204 Messstellen liegt die Gesamtschwankungsbreite innerhalb $\pm 3,0$ K um den errechneten Mittelwert.

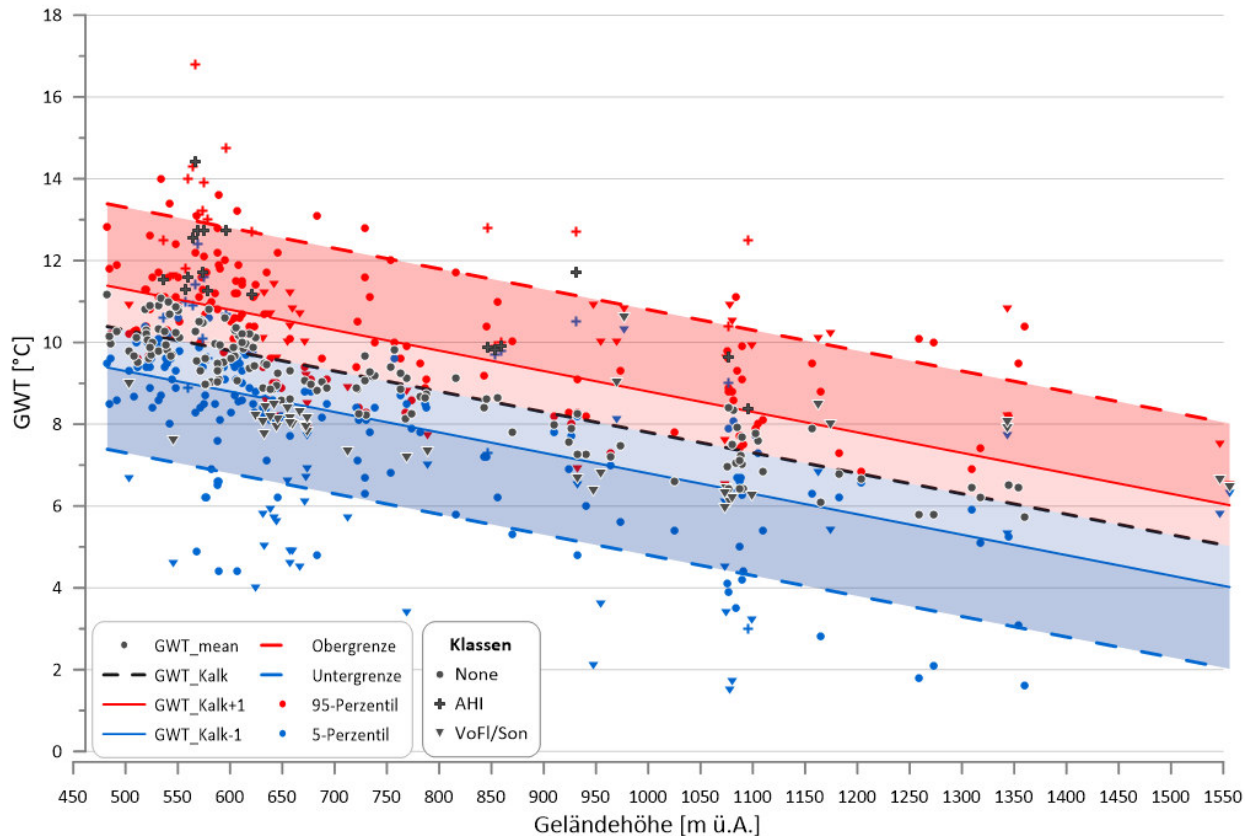


Abb. 13: Zusammenfassende Gegenüberstellung von GWT_mean, P5 und P95 aller Datenpunkte sowie von GWT_kalk einschließlich Bandbreite ($\pm 1,0$ K) und Schwankungsbreite ($\pm 2,0$ K)

Schlussfolgerungen/Diskussion

Bedeutung für thermische Grundwassernutzungen

Im Hinblick auf die thermische Nutzung von Grundwasser kann festgehalten werden, dass es auch in Höhenlagen von über 1.200 m ü. A. durchaus möglich erscheint, Wärmepumpen effizient zu betreiben. Diese müssen allerdings auf niedrigere Temperaturspreizungen im Bereich von 1,0 bis 1,5 K ausgelegt werden. Allerdings kann es aufgrund der saisonalen Schwankungen insbesondere in Vorfluternähe und bei zu oberflächennahen Entnahmen des Wassers im Winter und Frühjahr zum Absinken der GWT unter 5,0 °C kommen, womit die zulässige Rückgabetemperatur unterschritten wird und keine Wärme mehr entzogen werden darf/kann. Das kann aber nicht nur in Höhenlagen jenseits der angeführten 1.200 m ü. A. zu Schwierigkeiten führen, sondern auch in Innsbruck oder gar Kufstein. Bei Entnahmetiefen < 10 m ist jedenfalls mit einer Schwankungsbreite von $\pm 1,0$ – $2,0$ K zu rechnen, bei relativer Vorfluternähe (z. B. am Inn bis etwa 100 m) $\pm 2,0$ – $3,0$ K. Ob und wie stark der Vorfluter mit dem Grundwasser interagiert und wann Minima der GWT auftreten können, ist von einer Vielzahl an Standortbedingungen abhängig, so auch der Sohl- und Uferdynamik etc. Daher ist eine Detailbetrachtung jedenfalls notwendig und bei Planungen sollte insbesondere die Vorflutertemperatur und deren Einfluss genauer betrachtet werden.

Abschätzung der GWT – Eignung der Regressionsgleichung

Die abgeleitete Regressionsgerade eignet sich im Wesentlichen, um die mittleren GWT sowie die zu

erwartenden saisonalen Schwankungsbreiten annäherungsweise abzubilden. Es sind damit Einschränkungen verbunden, die sich aus der einfachen Natur der Regressionsgerade ergeben. Neben dem AHI, der damit nicht berücksichtigt werden kann, sind das vor allem Gebiete allgemein höherer GWT aufgrund z.B. eines höheren geothermischen Gradienten oder auch geringere GWTs durch erhöhten Vorflutereinfluss. Je nach Messort, -tiefe, Vorfluterabstand, Grundwasserkörper etc. kommt es dadurch natürlich auch zu Abweichungen von der Berechnung.

Möglicherweise lässt sich die Gleichung zur Berechnung der mittleren GWT derart erweitern, dass u.a. Vorflutereinfluss und AHI als „Module“ eine Berücksichtigung finden. Das bestehende Höhenmodul könnte beispielsweise um ein Vorflutermodul, ein AHI-Modul und ein Geothermie-Modul ergänzt werden. Zur Abschätzung der Schwankungsbreite und Saisonalität wären ein zusätzliches Messtiefe-Modul vorstellbar.

Bedeutung von Messtiefe, Messstellenausbau

Der Messtiefe der GWT und damit auch dem Messstellenausbau kommt bei der Interpretation der Datenreihen eine besondere Bedeutung zu. Optimal wären GWT-Messungen – sofern es die Grundwasserstände zulassen – in einer einheitlichen Messtiefe. Ebenso spielt es eine Rolle, wie stark die Konvektion innerhalb der Messstelle ausgeprägt ist. Teils wird sich an LEDITZKY (1986) orientiert und 2“-Rohre für den Messstellenausbau verwendet. Für die GWT-Tiefenprofile z. B. wurde alle Messstellen in diesem Durchmesser ausgebaut und zudem nur der unterste halbe Meter mit einem Filterrohr versehen. Darüber hinaus wäre es zur umfassenderen Interpretation und für ein erhöhtes Detailverständnis wichtig, die Bohrprofile und damit Hydrogeologie an den Standorten zu berücksichtigen.

Literaturverzeichnis

- Benz, S. A., Bayer, P., Menberg, K., Jung, S. & Blum, P. (2015): Spatial resolution of anthropogenic heat fluxes into urban aquifers. *Science of the Total Environment*, 524-525, 427-439.
- Benz, S. A., Bayer, P., Goettsche, F. M., Olesen, F. S. & Blum, P. (2016): Linking Surface Urban Heat Islands with Groundwater Temperatures. *Environmental Science & Technology*, 50, 70-78.
- Benz, S. A., Bayer, P. & Blum, P. (2017a): Global patterns of shallow groundwater temperatures. *Environmental Research Letters*, 12 (2017), 1-8.
- Benz, S. A., Bayer, P. & Blum, P. (2017b): Identifying anthropogenic anomalies in air, surface and groundwater temperatures in Germany. *Science of the Total Environment*, 584-585 (2017), 145-153.
- Benz, S. A., Bayer, P., Winkler, G. & Blum, P. (2018): Recent trends of groundwater temperatures in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 1-16.
- Constantz, J. (1998): Interaction between stream temperature, streamflow, and groundwater exchanges in alpine streams. *Water Resources Research*, 34(7), 1609-1615.
- Constantz, J., Stewart, A. E., Niswonger, R. & Sarma, L. (2002): Analysis of temperature profiles for investigating stream losses beneath ephemeral channels. *Water Resources Research*, 38 (12), 52-1 - 52-13.
- Kappelmeyer, O., & Haenel, R. (1974): *Geothermics with Special References to Application*, Geoexploration Monographs, 1 ed G Associates (Berlin Stuttgart: Gebrüder Borntraeger), 1974
- Leditzky, H. (1986): Vergleichende Grundwassertemperatur-Profilmessungen in der Steiermark., , 44-62.
- Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S. & Blum, P. (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the Total Environment*, 442, 123-133.

- Menberg, K. (2014): Anthropogenic and natural alterations of shallow groundwater temperatures., , 135.
- Menberg, K., Blum, P., Kurylyk, B. & Bayer, P. (2014): Observed groundwater temperature response to recent climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 4453-4466.
- Rodionov, S. N. (2004): A sequential algorithm for testing climatic regime shifts. *Geophysical Research Letters*, 31, 1-4.
- Rolland, C. (2002): Satial and Seasonal Variations of Air Temperature Lapse Rates in Alpine Regions. *Journal of Climate*, 15, 1-16.
- Stonestrom, D. A. & Constantz, J. (2004): Using Temperature to Study Stream-Ground Water Exchanges.
- Tissen, C., Benz, S., Menberg, K., Bayer, P. & Blum, P. (2019): Groundwater temperature anomalies in central Europe. *Environ. Res. Lett.*, 14(2019), 1-10.
- UBA (2011): Trends der Grundwassertemperatur. Untersuchungen von Daten der Überwachung des Gewässerzustands in Österreich. , 28.