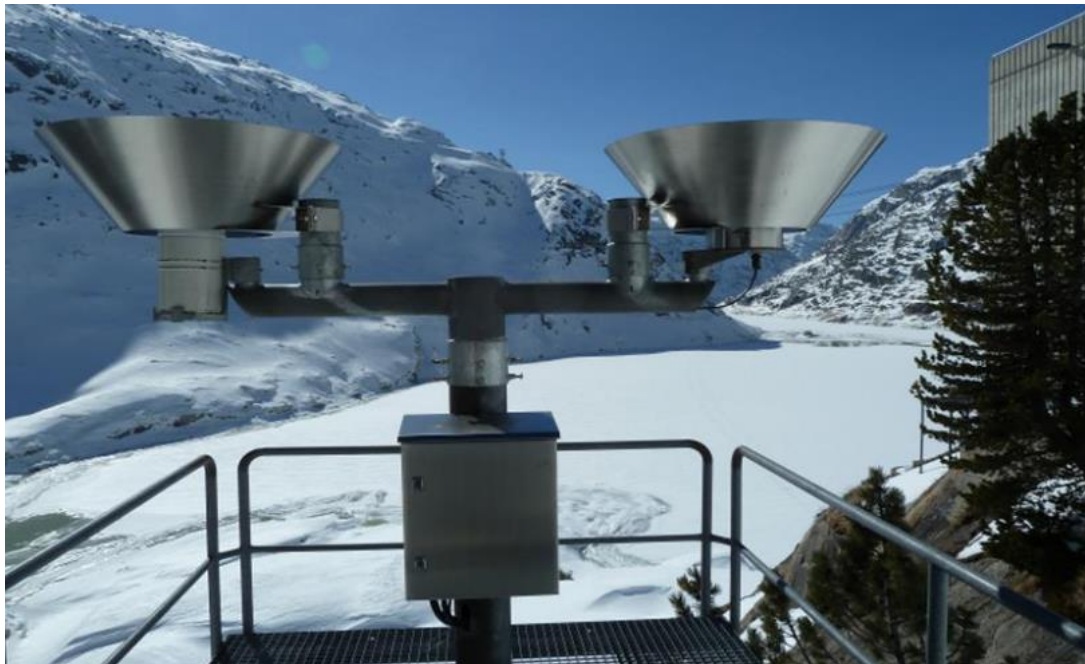


ISOSCAPES SCHWEIZ - PHASE 2

Validierung mit Fallbeispielen, Erstellen von Monatsrasterkarten 2007-2023,
Publikation der Methode



GRAZ, 21.05.2025

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Hydrologie, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

Auftragnehmer: JR-AquaConSol GmbH, Steyrergasse 21, 8010 Graz/Österreich

Autor/Autorin: Christian Reszler, Valentina Pelzmann, Albrecht Leis

Begleitung BAFU: Marc Schürch, Flavio Malaguerra

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Kurzfassung

In der ersten Phase des Projekts „Isoscapes Schweiz“ wurde ein Interpolationsmodell entwickelt, das räumliche Muster der Isotopenverhältnisse im Niederschlag (Isoscapes) in hoher räumlicher Auflösung (500 m) für die Schweiz bereitstellt. Die vorliegende Phase 2 hatte zum Ziel, die Methodik zu publizieren, das entwickelte Modell mit bisher nicht verwendeten Daten weiter zu validieren, die Einbindung zusätzlicher Stationen zur Verbesserung des Modells zu testen und schließlich kontinuierliche Raster auf monatlicher Basis bereitzustellen. Die in der Phase 1 entwickelte Methodik wurde gemeinsam mit dem BAFU in der Septemбераusgabe des Jahres 2024 in der angewandtwissenschaftlichen Zeitschrift Aqua & Gas publiziert. Bisher nicht verwendete Daten betreffen punktuelle Messungen aus Forschungseinzugsgebieten und anderen Messnetzen, wie sie in der Plattform für Isotopenmessungen WATSON europaweit zusammengefasst wurden. Außerdem wurden an ausgewählten Stationen die Ergebnisse aus dem Isoscapes Modell mit jenen aus dem Modell PISO.AI, in welchem „Machine Learning“ Ansätze zur Erstellung von Isoscapes auf europäischer Skale eingesetzt werden, verglichen. Zur Verbesserung der Isoscapes im Süden konnte aus den vorliegenden Auswertungen geschlossen werden, dass eine Aufnahme von zwei weiteren Stationen (Stabio und Robiei) in das Niederschlagsisotopen-Netz der Schweiz (ISOT) sinnvoll ist. Seit dem Frühjahr 2025 stehen monatliche Raster der Isoscapes von 2007 bis 2023 beim BAFU zur Verfügung.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Publikation	7
3 Punktuelle Niederschlagsdaten aus Forschungsprojekten	8
3.1 Experimentaleinzugsgebiet Alp-Erlenbach	8
3.2 Waldlabor Zürich	10
3.3 Daten aus der WATSON Plattform – WSL	11
3.4 Vergleich mit PISO.AI	16
4 Testung zusätzlicher Stationen im Tessin	17
4.1 Cadenazzo	18
4.2 Stabio und Robiei	19
4.3 Schlussfolgerungen für die Aufnahme der Stationen in das ISOT-Messnetz	22
5 Lieferung der Rasterdaten	22
6 Literatur	24
7 Anhang: Nachtrag zum Bericht für Isoscapes Phase 1 - Vergleich mit PISO.AI	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Titelseite des Artikels in der Zeitschrift Aqua & Gas (Septemberausgabe 2024).	7
Abbildung 2: Lage des Test-Einzugsgebiets Alp-Erlenbach nahe Zug (roter Pfeil).	8
Abbildung 3: Korrelationen der Daten an den beiden Stationen Erlenbach und Alp mit den Daten der ISOT Stationen in der Region (links) und arithmetische Mittel von Sauerstoff-18 in den Jahren 2015-2019 gegen die Seehöhe aufgetragen (rechts).	9
Abbildung 4: Simulierte und gemessene Sauerstoff-18 Werte für die Standorte der Stationen Alp (unten) und Erlenbach (oben).	10
Abbildung 5: Simulierte und gemessene Werte für Sauerstoff-18 (oben) und Deuterium (unten) für den Standort der Station im Waldlabor Zürich.	11
Abbildung 6: Gemessene Sauerstoff-18 Werte für den Standort der Station im Waldlabor Zürich verglichen mit den Werten der ISOT-Station Buchs-Suhr (BUS).	11
Abbildung 7: Gemessene Sauerstoff-18 Werte für den Standort der Station im Waldlabor Zürich gegen die Werte von ISOT-Stationen in der Region (BUS: Buchs-Suhr; KON: Konstanz; STG: St. Gallen).	11
Abbildung 8: Verteilung der Standorte mit Isotopendaten aus dem WATSON Netzwerk (modifiziert nach: https://watson-cost.eu/outputs/databases/water_data/). Die hier ausgewerteten WSL-Standorte sind mit einem schwarzen Pfeil markiert. Zusätzlich sind die Standorte des Waldlabors Zürich und das EZG Alp-Erlenbach gekennzeichnet. UNIBE steht für Uni Bern; TUM steht für TU München. Anm.: Auf der WATSON Website sind die Stationen JUS, CHI und OTH falsch verortet.	12
Abbildung 9: Simulierte und gemessene Werte für Sauerstoff-18 (oben) und Deuterium (unten) für den Standort der WSL-Station Davos. Der Wert im April 2022 (grauer Pfeil) wurde aus der Fehlerberechnung herausgenommen, da sich ein negativer Deuterium-Exzess errechnet.	13
Abbildung 10: Simulierte und gemessene Werte für Sauerstoff-18 (links) und Deuterium (rechts) für den Standort der weiteren WSL-Stationen im Zeitraum 2021-2022 (Code siehe Tabelle 1).	15
Abbildung 11: Vergleich der Werte aus den Messdaten, aus dem Isoscapes-Modell und aus dem Modell PISO.AI (Nelson et al., 2021) für die Stationen Erlenbach und Alp (von Freyberg et al., 2022; Knapp et al., 2024).	16
Abbildung 12: Vergleich der Werte aus den Messdaten, aus dem Isoscapes-Modell und aus dem Modell PISO.AI (Nelson et al., 2021) für die im Station Waldlabor Zürich (Floriantic et al., 2024). Links: Sauerstoff-18; rechts: Deuterium.	17
Abbildung 13: Vergleich der Werte aus den Messdaten, aus dem Isoscapes-Modell und aus dem Modell PISO.AI (Nelson et al., 2021) für die im Station Davos der WSL (Quelle: watson-cost.eu). Links: Sauerstoff-18; rechts: Deuterium.	17
Abbildung 14: Bestehende und zur Aufnahme in das ISOT-Netz getestete Stationen im Süden der Schweiz (Tessin).	18
Abbildung 15: Messdaten von Sauerstoff-18 an der Station Cadenazzo im Jahr 2021 (links) und 2023 (rechts) verglichen mit den Stationsdaten in der Umgebung.	18

Abbildung 16: Gerechnete Sauerstoff-18 Werte für den Standort der Station Locarno mit (grüne Linie) und ohne (rot, ursprüngliches Modell) im Jahr 2021.....	19
Abbildung 17: Vergleich gemessener Sauerstoff-18 Werte im Jahr 2024: links: monatliche Proben in Locarno verglichen mit Proben in kürzeren Intervallen in Stabio; rechts: monatliche Proben in Samedan und Grimsel verglichen mit Proben in kürzeren Intervallen in Robiei.....	20
Abbildung 18: Niederschlagsgewichtete Mittelwerte an Stationen im Raum Südschweiz von Feb. bis Dez. 2024 in Abhängigkeit der Seehöhe zur regionalen Einordnung der Stationen Stabio und Robiei. Links: Sauerstoff-18; rechts: Deuterium.	20
Abbildung 19: Gemessene Sauerstoff-18 Werte (links) und Deuterium Werte (rechts) im Raum Südschweiz im Jahr 2024. Oben: Vergleich für Stabio; unten: Vergleich für Robiei (Verwendung auch höher gelegener Stationen).	21
Abbildung 20: Korrelation der Sauerstoff-18 Werte an der Station Davos mit jenen an der Station Pontresina (bis Ende 2021links,) und Sevelen (rechts).	23
Abbildung 21: Verfügbarkeit der Daten zur Verwendung zur Generierung der Isoscapes von 2007 bis 2023. Abkürzungen siehe Bericht Isoscapes. Die roten Rechtecke kennzeichnen Datenlücken beim Ersatz der Station Pontresina (PO2) durch Samedan (SAM). In dieser Phase werden die Daten von Davos (DAV) einbezogen.....	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fehlermaße (Mean Absolut Error - MAE) der Berechnung mit dem Isoscapes-Modell im Zeitraum 2021-2022 für die Stationen der WSL.	14
--	----

1 Einleitung

Zur Finalisierung des Projekts zur Erstellung von Isoscapes für die Schweiz (Reszler et al., 2023) sind im Rahmen der Phase 2 folgende Arbeiten vorgesehen: Im ersten Schritt wird eine Publikation eingereicht. Dies erfolgt in einer angewandten, wissenschaftlichen Schweizer Zeitschrift. In einem zweiten Schritt erfolgt eine Recherche über vorhandene punktuelle Isotopendaten im Niederschlag aus der Forschung, um weitere Validierungsmöglichkeiten der Isoscapes zu testen und die Einbindung der punktuellen Daten in das Modell zu prüfen. Außerdem erfolgt eine Testung zusätzlicher Messstellen im Tessin zur Verbesserung der Datengrundlage für die Interpolation. Schließlich werden die Raster für längere Zeiträume ermittelt und geliefert.

2 Publikation

In der Septemбераusgabe von 2024 der Zeitschrift Aqua & Gas, herausgegeben durch den Schweizer Fachverband für Wasser, Gas und Wärme (SVGW), erschien der Artikel „Fingerabdruck des Wassers“ (siehe Abbildung 1). Der Artikel ist online abrufbar über

<https://www.aquaetgas.ch/wasser/trinkwasser/20240904-ag9-fingerabdruck-des-wassers/>.



Abbildung 1: Titelseite des Artikels in der Zeitschrift Aqua & Gas (Septemбераusgabe 2024).

3 Punktuelle Niederschlagsdaten aus Forschungsprojekten

3.1 Experimentaleinzugsgebiet Alp-Erlenbach

Im Experimentaleinzugsgebiet Alp-Erlenbach in der Nähe von Zug (Abbildung 2) werden seit vielen Jahren zahlreiche meteorologische und hydrologische Daten erfasst, um hydrologische Prozesse auf Gebietsskala zu studieren (von Freyberg et al., 2022; Knapp et al., 2024). Zu diesen Daten zählen auch Isotopendaten im Niederschlag. An zwei Stationen, Erlenbach auf 1228 m Seehöhe und Alp auf 910 m Seehöhe, wurden und werden in hohem Intervall Niederschlagsproben gezogen und die stabilen Isotope Sauerstoff-18 und Deuterium gemessen. Die Daten sind verfügbar sowohl als Tageswerte als auch als Summenproben über mehrere Tage im Zeitraum 2015-2021. Für den Vergleich mit aus den Isoscapes extrahierten Daten wurden im Zuge der vorliegenden Arbeiten Werte über Kalendermonate mit einer Gewichtung mit dem Niederschlag gebildet. Da manchmal die Niederschlagssumme monatsüberschreitend beprobt wurde, sind Unsicherheiten möglich. Die Validierung erfolgt auf Basis von Sauerstoff-18, die Aussagen aus den Daten von Deuterium sind redundant.

In einem ersten Schritt wurde untersucht, wie die Daten an den beiden Stationen Alp und Erlenbach mit den Stationsdaten in der Region korrelieren. Abbildung 3 zeigt die Gegenüberstellung der Daten im Zeitraum 2015-2019 mit den Daten der Stationen St. Gallen, Sevelen und Buchs-Suhr, aber auch die Korrelation zwischen den beiden Stationen Alp und Erlenbach. Die Korrelation der Daten von Erlenbach mit den Daten der anderen Stationen bewegt sich zwischen einem Bestimmtheitsmaß von 0.62 und 0.77. Die höchste Korrelation ist gegeben zu den Daten der Station Sevelen, an der Grenze zu Liechtenstein gelegen, mit $R^2=0.77$. Gleich hoch ist die Korrelation zwischen den Daten der beiden Stationen. Aufgrund der Nähe der beiden Stationen im Experimentalgebiet würde man ein etwas höheres Bestimmtheitsmaß erwarten, was auf mögliche Unsicherheiten in den Daten hinweist.

Auf der rechten Seite in Abbildung 3 sind die arithmetischen Mittelwerte von Sauerstoff-18 der Stationen gegen die Seehöhe der Station aufgetragen. In dieser Darstellung wird die relativ hohe Streuung unter den Stationsdaten erkennbar. Auf gleicher Seehöhe variieren die Werte ungefähr um ± 0.1 ‰. Dennoch lässt sich ganz gut eine Trendgerade mit einer Verringerung der Werte von -0.2 ‰ pro 100 m einzeichnen. Dieser Gradient wurde von Schotterer et al. (2010) für langjährige Mittelwerte in der Schweiz angegeben.



Abbildung 2: Lage des Test-Einzugsgebiets Alp-Erlenbach nahe Zug (roter Pfeil).

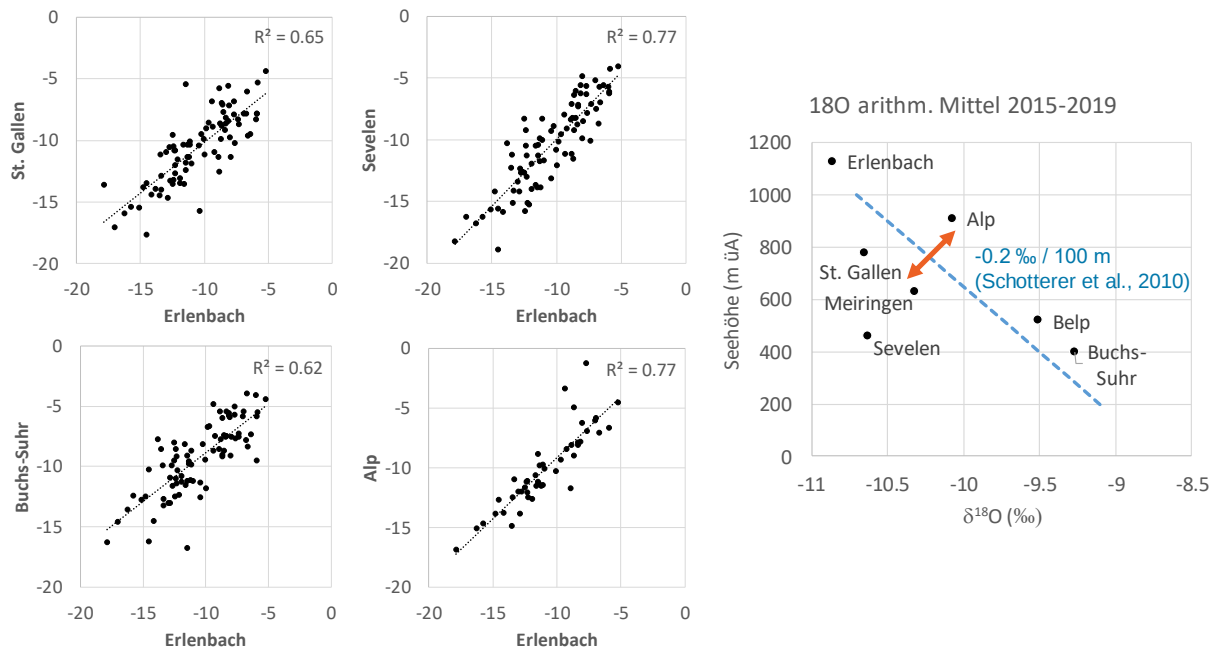


Abbildung 3: Korrelationen der Daten an den beiden Stationen Erlenbach und Alp mit den Daten der ISOT Stationen in der Region (links) und arithmetische Mittel von Sauerstoff-18 in den Jahren 2015-2019 gegen die Seehöhe aufgetragen (rechts).

In folgender Abbildung 4 sind die mit dem Modell für die Isoscapes gerechneten monatlichen Isotopengehalte von Sauerstoff-18 für die Standorte der beiden Stationen mit den Messdaten im Zeitraum 2015-2019 verglichen. Es zeigt sich, dass das Modell die gemessenen Isotopengehalte hervorragend wiedergibt. Wie in der Modellentwicklung wurde als Fehlermaß der Mean Absolute Error (MAE), wobei die Absolutbeträge der Differenzen der berechneten und der gemessenen Werte gemittelt werden, verwendet (Beispiel Sauerstoff-18):

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|\delta^{18}O_{ber,i} - \delta^{18}O_{gem,i}|}{n} \quad (Gl. 1)$$

Im Falle der höhergelegenen Station Erlenbach ist der MAE 1.18 ‰ und jener der Station Alp ist 0.95 ‰. Diese Fehler anhand der Daten im Zeitraum 2015-2019 liegen deutlich unter den mittleren Fehlern aus der Modellentwicklung (MAE=1.31 ‰ im Mittel über alle Stationen im Zeitraum 2007-2020, Reszler et al. 2024). Die Korrelation (Bestimmtheitsmaß R^2) zwischen Modell und Messung ist bei beiden Stationen deutlich höher als zwischen den lokalen Messwerten und den Messwerten der Stationen in der Region. Das heißt, durch das Modell können deutlich zuverlässigere Werte für den Standort der Stationen ermittelt werden als durch Übertragung von den Nachbarstationen.

Für Deuterium (hier nicht dargestellt) ist das Verhalten der Modellergebnisse sehr ähnlich. Über den gleichen Zeitraum 2015-2019 ergeben sich Fehler von MAE=8.58 ‰ für Erlenbach und MAE=7.59 ‰ für Alp.

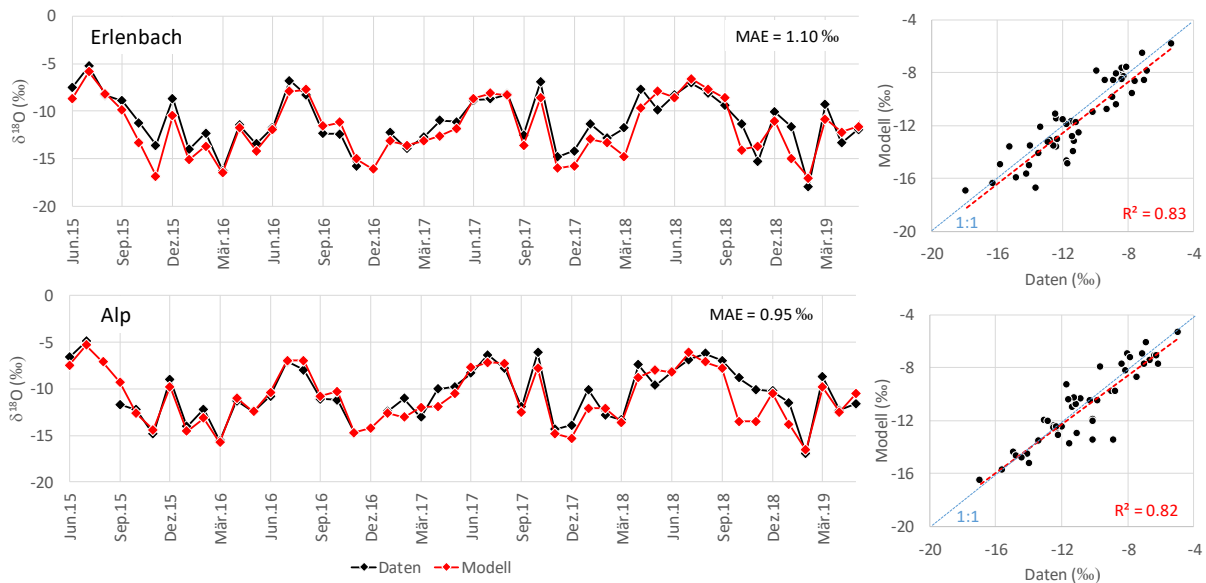


Abbildung 4: Simulierte und gemessene Sauerstoff-18 Werte für die Standorte der Stationen Alp (unten) und Erlenbach (oben).

3.2 Waldlabor Zürich

Im sogenannten „Waldlabor Zürich“ (siehe auch Abbildung 8) betreibt die ETH Zürich ein etwa 0,3 km² großes Experimentaleinzugsgebiet, in welchem auch Daten der stabilen Isotope im Niederschlag gesammelt werden (Floriantic et al., 2024). Für den Vergleich mit den Werten aus den Isoscapes wurden von der ETH Zürich über den Niederschlag gewichtete monatliche Werte von Sauerstoff-18 und Deuterium von April 2020 bis Ende 2023 zur Verfügung gestellt. Die Station liegt auf 500 m Seehöhe.

Abbildung 5 zeigt den Vergleich der aus den Isoscapes simulierten, das heißt für den Standort aus den Isoscapes extrahierten, Werten von Sauerstoff-18 (oben) und Deuterium (unten). In den Jahren 2020 und 2021 sind Abweichungen zu sehen, in den Jahren 2022 und 2023 ist die Übereinstimmung sehr gut, mit Ausnahme des Januars 2023. Dazu sind in Abbildung 6 die Messwerte im Waldlabor jenen bei der nächstgelegenen Station Buchs-Suhr (BUS) gegenübergestellt. Aufgrund der geografischen Nähe folgen die Ergebnisse aus dem Isoscapes Modell weitgehend dem Verlauf der Daten an der ISOT-Station. Die Seehöhe des Waldlabors ist etwa 100 m höher. Die sehr niedrigen Werte im Dezember 2021 und Januar 2023 beim Waldlabor wurden in Buchs-Suhr nicht erreicht (auch nicht in den anderen Stationen in der Region, St. Gallen (STG) und Konstanz (KON), hier nicht dargestellt). Lokale Effekte, wie im Falle der Winterwerte lokal aufgetretener Schneefall, könnten hier die Werte beeinflusst haben. Ebenso sind die Abweichungen der Messwerte im Waldlabor Zürich von den Messwerten der drei Stationen (BUS, KON, STG) in der Region in den Jahren 2021 und 2022 höher als im Folgejahr. Auffällig ist, dass der Deuterium-Exzess bei den Werten im Waldlabor teilweise erhöht ist, was mit gängigen Vorstellungen nicht erklärbar ist. Abbildung 7 zeigt dazu die Scatter-Plots der Sauerstoff-18 Werte unter Verwendung der drei anderen Stationen in der Region. Mit allen drei Stationen ist die Korrelation nicht sehr gut, und die Korrelation mit den Werten aus dem Isoscapes Modell ist geringfügig höher (siehe Abbildung 5 rechts). Über den gesamten Vergleichszeitraum errechnen sich Abweichungen von MAE = 1.70 ‰ für Sauerstoff-18 und MAE = 12.71 ‰ für Deuterium. Diese Werte sind höher als die Mittelwerte bei der Modellvalidierung und auch höher als bei den zuvor ausgewerteten Stationen Alp und Erlenbach.

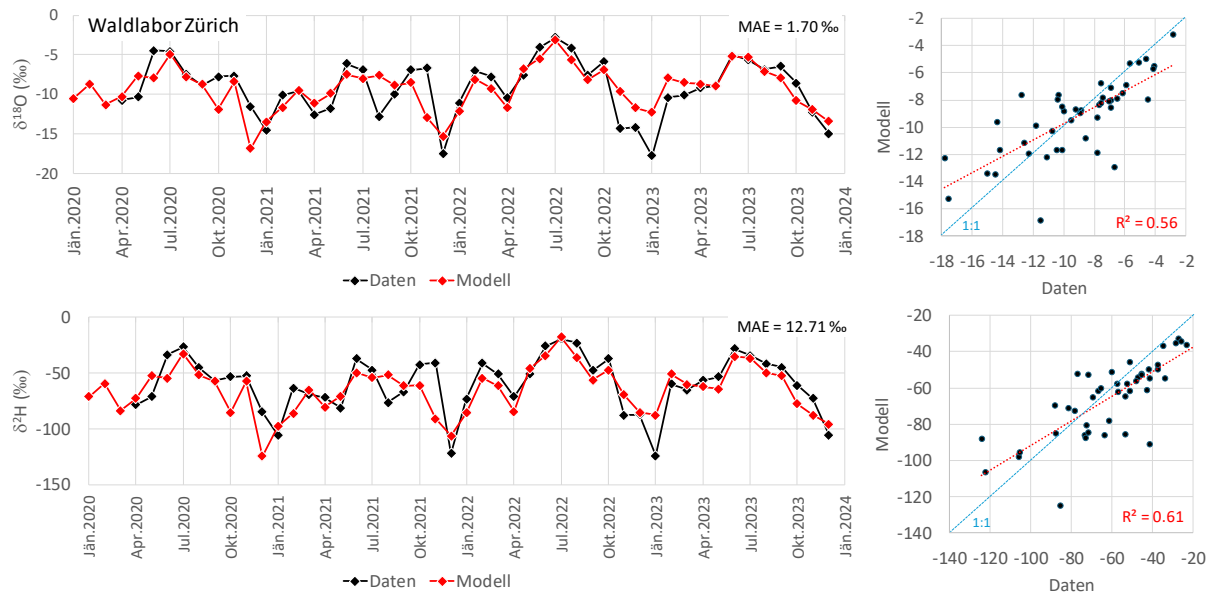


Abbildung 5: Simulierte und gemessene Werte für Sauerstoff-18 (oben) und Deuterium (unten) für den Standort der Station im Waldlabor Zürich.

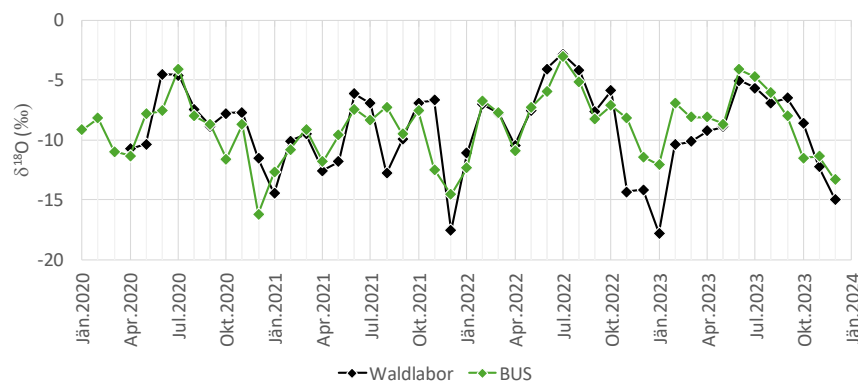


Abbildung 6: Gemessene Sauerstoff-18 Werte für den Standort der Station im Waldlabor Zürich verglichen mit den Werten der ISOT-Station Buchs-Suhr (BUS).

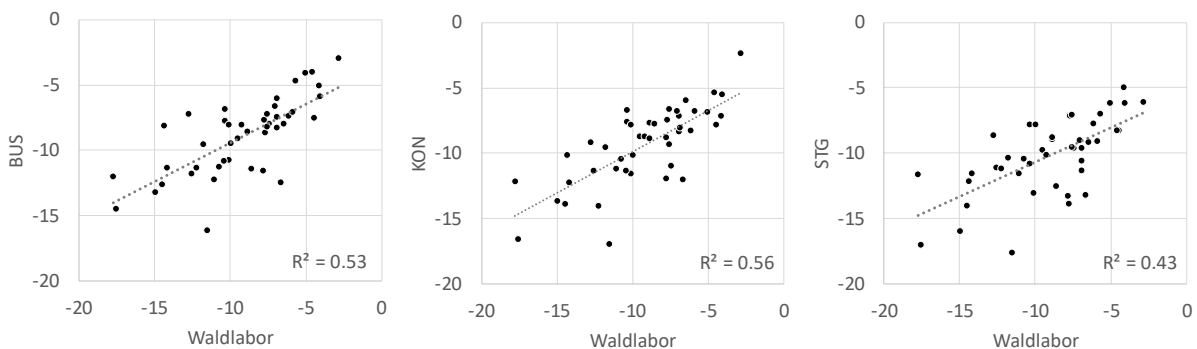


Abbildung 7: Gemessene Sauerstoff-18 Werte für den Standort der Station im Waldlabor Zürich gegen die Werte von ISOT-Stationen in der Region (BUS: Buchs-Suhr; KON: Konstanz; STG: St. Gallen).

3.3 Daten aus der WATSON Plattform – WSL

Im Zuge der Cost-Action WATSON (z.B. Penna & van Meerveld et al., 2024) wurden Datenverfügbarkeiten von stabilen Isotopen europaweit räumlich erfasst. Von der Eidgenössischen Forschungsanstalt

für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) wurden Daten von mehreren Stationen in der Schweiz (Abbildung 8) zur Verfügung gestellt und mit den Werten aus den Isoscapes verglichen. Daten sind mit Beginn 2021 verfügbar, mit Ausnahme der Station Davos (DAV), bei welcher ab Mitte 2020 Daten vorhanden sind. Das Probenintervall beträgt ungefähr 14 Tage, wobei der Zeitpunkt der Probennahme auch innerhalb eines Monats liegen kann. In der vorliegenden Arbeit wurden die Messwerte über die Gewichtung mit den miterfassten Niederschlagsmengen auf Kalendermonatswerte gebracht. Wenn am Monatsbeginn bzw. am Monatsende keine Proben genommen wurden, ist dies mit Unsicherheiten behaftet. In diesem Fall wurden die Messwerte der monatsübergreifenden Probe jeweils mit der Hälfte des Niederschlags in die Gewichtung für den Vormonat und in die Gewichtung für den nachfolgenden Monat einbezogen. Daraus gewonnene Monatswerte mit negativem Exzess wurden nicht verwendet.

Abbildung 8 zeigt die Verteilung der Standorte mit Isotopendaten aus dem WATSON Netzwerk. Die hier ausgewerteten WSL-Standorte sind mit den Abkürzungen gemäß der Stationskennung auf der WATSON Plattform bezeichnet und mit einem schwarzen Pfeil markiert. Es wurden Stationen ausgewählt, die etwas weiter von ISOT-Stationen entfernt liegen, oder in deren Region sich aus der Isoscapes Validierung höhere Unsicherheiten ergaben.

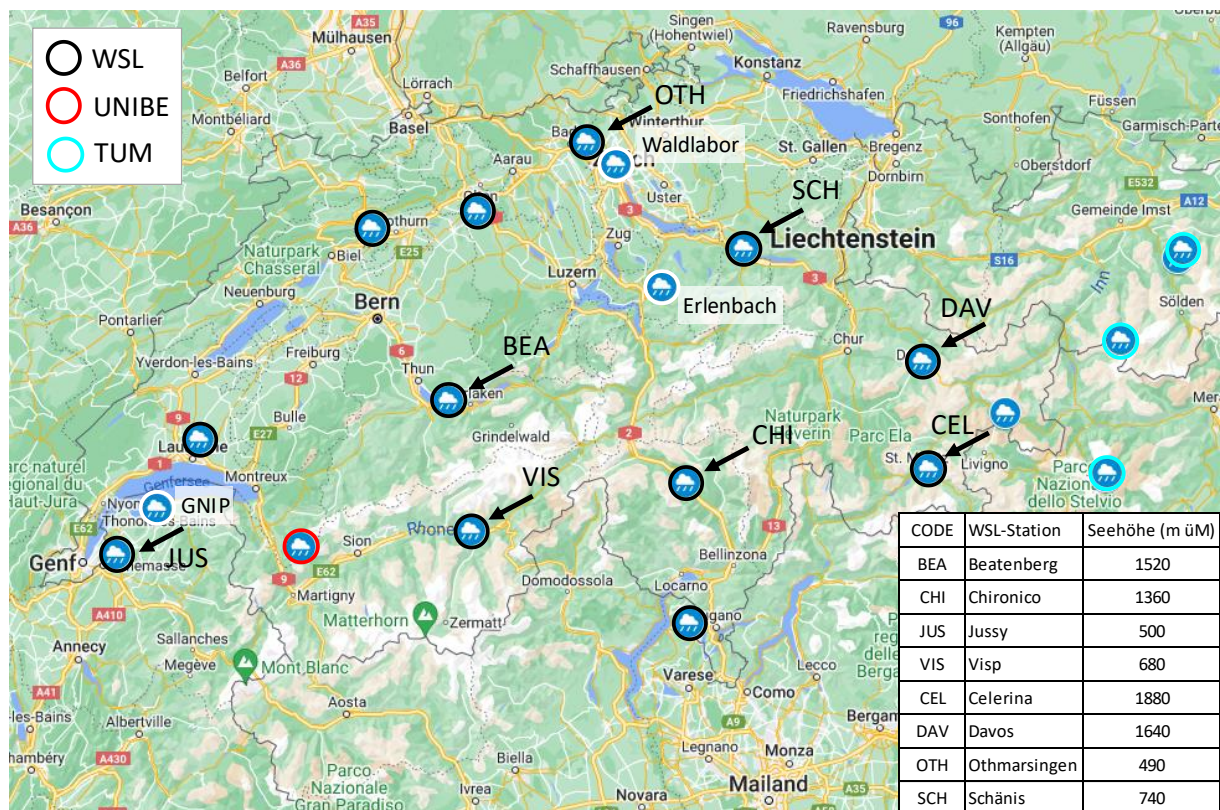


Abbildung 8: Verteilung der Standorte mit Isotopendaten aus dem WATSON Netzwerk (modifiziert nach: https://watson-cost.eu/outputs/databases/water_data/). Die hier ausgewerteten WSL-Standorte sind mit einem schwarzen Pfeil markiert. Zusätzlich sind die Standorte des Waldlabors Zürich und das EZG Alp-Erlenbach gekennzeichnet. UNIBE steht für Uni Bern; TUM steht für TU München. Anm.: Auf der WATSON Website sind die Stationen JUS, CHI und OTH falsch verortet.

Die längste Datenreihe unter den WSL-Stationen existiert für die Station Davos (DAV) mit Beginn im Juli 2020. Folgende Abbildung 9 zeigt den Vergleich der Ergebnisse aus dem Isoscapes Modell für Sauerstoff-18 (oben) und Deuterium (unten) für den Standort der Station. Die Ergebnisse von Mitte 2020 bis Ende 2022 sind durchweg hervorragend. Es ergaben sich ein MAE = 1.0 ‰ für Sauerstoff-18

und ein MAE = 7.41 ‰ für Deuterium. Das Bestimmtheitsmaß ist in beiden Fällen mit $R^2 = 0.93$ äußerst hoch.

Der Wert für April 2022 musste aber aus der Fehlerberechnung herausgenommen werden. In dieser Zeit wurde bezüglich Sauerstoff-18 bei einer Sammelprobe am 3.4.2022 ein Wert von -20.10 ‰, bei einer Sammelprobe am 21.4.2022 ein Wert von -2.80 ‰ und bei einer Sammelprobe am 6.5.2022 ein Wert von -9.70 ‰ gemessen. Der sehr hohe Wert in der Mitte des Monats führt in der niederschlagsgewichteten Mittelbildung zu dem hohen Monatswert für April ($\delta^{18}\text{O} = -8.31$ ‰). Der sehr niedrige Wert am Beginn des Monats besitzt in der Mittelwertbildung keinen großen Einfluss. Für den ermittelten Monatswert ergibt sich ein negativer Deuterium-Exzess. Dieses Beispiel zeigt, dass in ungünstigen Fällen, wenn die Sammelprobe monatsübergreifend gezogen wurde und sowohl am Ende des Vormonats als auch am Beginn des Folgemonats Niederschläge auftraten, eine Vergleichbarkeit mit Sammelproben aus Kalendermonaten nur eingeschränkt gegeben ist.

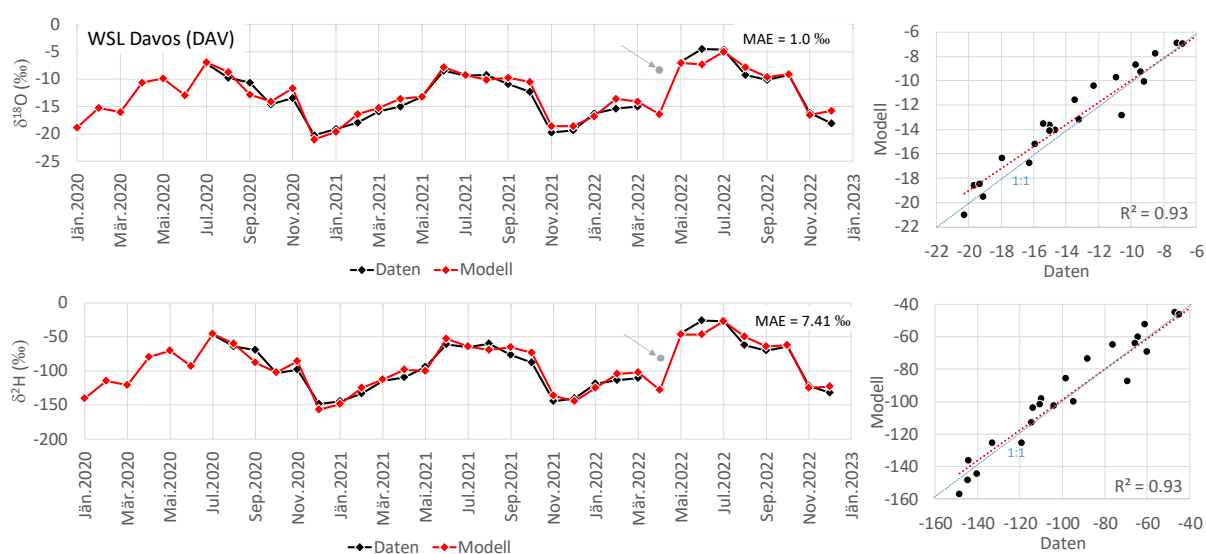


Abbildung 9: Simulierte und gemessene Werte für Sauerstoff-18 (oben) und Deuterium (unten) für den Standort der WSL-Station Davos. Der Wert im April 2022 (grauer Pfeil) wurde aus der Fehlerberechnung herausgenommen, da sich ein negativer Deuterium-Exzess errechnet.

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse aus dem Isoscapes Modell den Messdaten im Zeitraum 2021-2022 gegenübergestellt, und in Tabelle 1 sind die dazugehörigen Fehlermaße (MAE) aufgelistet. Am besten sind die Ergebnisse für Othmarsingen (OTH, bei Zürich), Jussy (JUS, beim Genfer See), Schanis (SCH, in der Nähe der Grenze zu Liechtenstein) und Davos (DAV). Im Falle von OTH, JUS und SCH liegt das am Vorhandensein von Stationen in der Nähe, z.B. bei JUS ist das die ISOT-Station Nyon. Im Falle von Davos liegen keine Stationen in unmittelbarer Nähe, die nächsten ISOT-Stationen sind Pontresina/Samedan (südlich) und Sevelen (nördlich). Dennoch werden die Isotopengehalte im Niederschlag in Davos durch die Interpolation der Werte dieser beiden Stationen sehr gut nachgebildet.

Schlechter sind die Ergebnisse an der Station Visp (VIS, Wallis), Beatenberg (BEA, am Thunersee), Celerina (CEL) und Chironico (CHI). Betreffend Visp ist dies der Fall trotz der Nähe zur ISOT-Station Grächen St. Niklaus auf großer Seehöhe (1605 m), Visp liegt aber im Rhonetal. Für die etwas schlechteren Ergebnisse in der Interpolation könnten Unterschiede in den mikroklimatischen Gegebenheiten eine Rolle spielen. Ebenso könnte dies bei der Stationen Beatenberg (BEA) und Chironico (CHI) der Fall sein. Letztere liegt im Bereich der Grenzen der Kantone Uri und Tessin. Da hier auch verschiedene Klimazonen aufeinandertreffen, sind höhere Unsicherheiten in den Isoscapes in

diesem Bereich durchaus möglich (siehe Bericht Isoscapes, Phase 1). Die Berechnung in Chironico ergab systematisch abgereicherte Werte. Bei der Station Celerina (CEL) hingegen sind die Ergebnisse trotz Nähe zu den ISOT-Stationen Pontresina/Samedan (im Jahr 2022 nur wenige Daten) etwas schlechter. Wie es auch bei CHI der Fall sein kann, kann das neben den generellen Unsicherheiten in den Isoscapes auch an den Unsicherheiten in den Daten (Verortung, Lücken) liegen.

Tabelle 1: Fehlermaße (Mean Absolute Error - MAE) der Berechnung mit dem Isoscapes-Modell im Zeitraum 2021-2022 für die Stationen der WSL.

	Code	18O (‰)	2H (‰)
Beatenberg	BEA	1.76	13.31
Chironico	CHI	2.50	11.24
Jussy	JUS	1.05	8.88
Visp	VIS	1.87	14.65
Celerina	CEL	1.32	10.32
Davos	DAV	0.97	7.34
Othmarsingen	OTH	0.97	7.63
Schänis	SCH	1.10	8.91

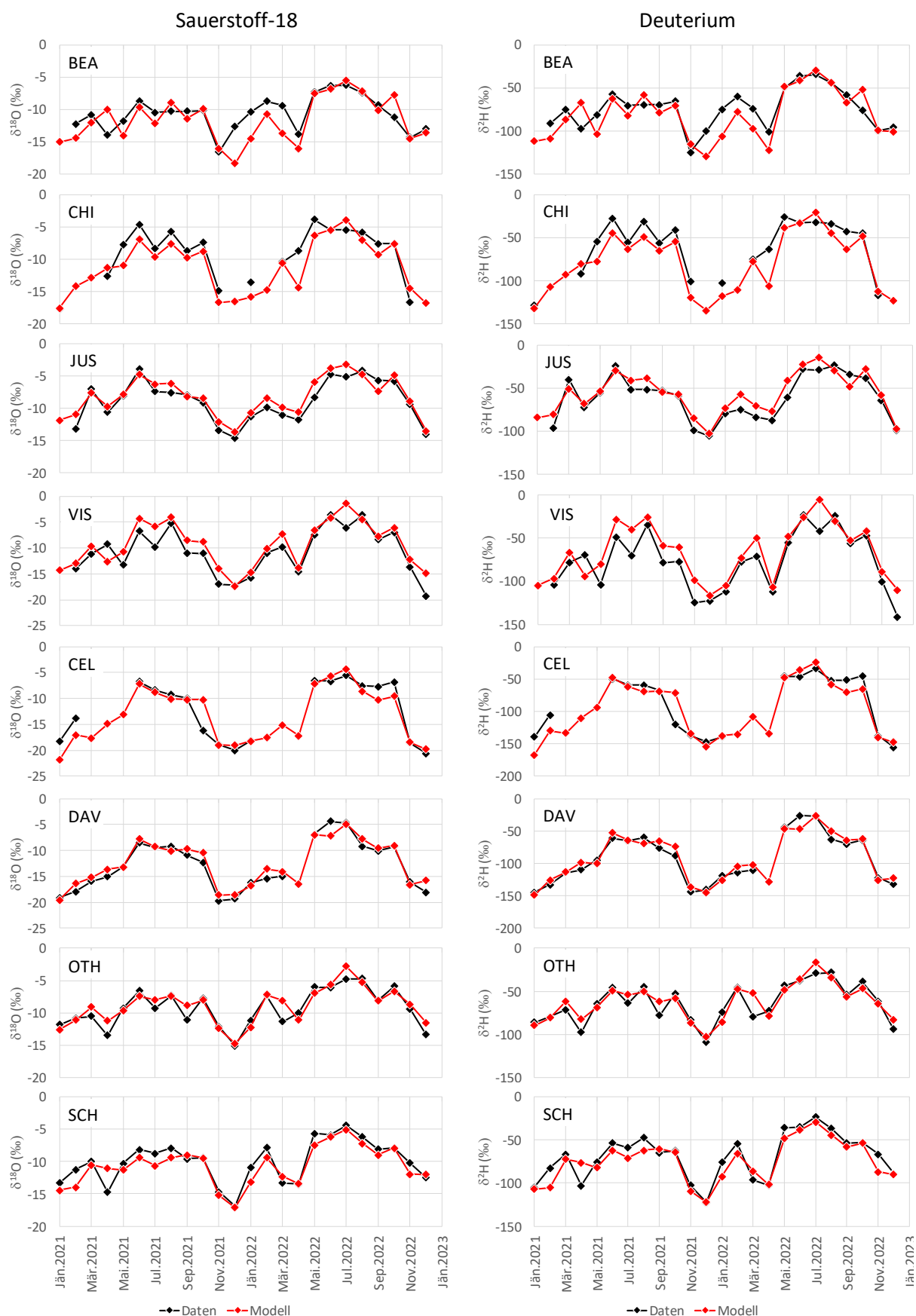


Abbildung 10: Simulierte und gemessene Werte für Sauerstoff-18 (links) und Deuterium (rechts) für den Standort der weiteren WSL-Stationen im Zeitraum 2021-2022 (Stationsbezeichnung bzw. -Code siehe Tabelle 1).

3.4 Vergleich mit PISO.AI

An den in den Abschnitten zuvor gezeigten Standorten wurden die Werte aus dem Modell PISO.AI (Nelson et al., 2021), in dem Künstliche Intelligenz (KI), in diesem Fall Maschinelles Lernen (Machine Learning), zur Erstellung von Isoscapes eingesetzt wurde, extrahiert und mit den Messwerten und den Werten aus den Isoscapes verglichen. In beiden Modellen wurden die Daten der oben angeführten Stationen nicht für die Entwicklung (Auswahl der Variablen und Kalibrierung im Falle des Isoscapes-Modells und Training im Falle des KI-Modells) verwendet; es handelt sich dabei also um einen objektiven Vergleich. Das KI-gestützte Modell PISO.AI wurde auf Basis von vorhandenen Isotopendaten aus dem GNIP-Netzwerk auf europäischer Skala entwickelt. Die räumliche Auflösung im Modell PISO.AI beträgt 0.5° , was einer (horizontalen) Ausdehnung von ungefähr 46 km in der Region Schweiz/Österreich entspricht. Das Isoscapes-Modell basiert zusätzlich zu den GNIP-Stationen auch auf Isotopendaten aus lokalen Netzen, und die räumliche Auflösung beträgt 500 m. Auf der anderen Seite beinhaltet das Modell PISO.AI zahlreiche räumliche meteorologische und klimatische Datensätze (Variablen), die europaweit verfügbar sind. Durch den Machine Learning Ansatz ist es möglich, zahlreiche Variablen mit den Isotopendaten recheneffizient zu verknüpfen. Monatliche Daten sind von der Website bis Ende 2020 abrufbar. Ein quantitativer Vergleich erfolgte auch über den MAE (Gl. 1).

In folgender Abbildung 11 ist dieser Vergleich für die Stationen Alp und Erlenbach (vgl. Kap. 3.1) anhand der Sauerstoff-18 Daten dargestellt (Anm.: die Ergebnisse für Deuterium sind äquivalent und daher hier nicht dargestellt). Durch das Modell für die Isoscapes in der Schweiz kann vor allem die Dynamik besser abgebildet werden. Der MAE ist aus dem Isoscapes-Modell für die Station Erlenbach 1.10 ‰ und für die Station Alp 0.95 ‰, während er im Falle des Modells PISO.AI 1.43 ‰ bzw. 1.33 ‰ beträgt. Dies ist vor allem durch die höhere räumliche Auflösung aber auch durch die Datenprüfung und die Einbeziehung sämtlicher verfügbarer Stationen (ISOT und Nachbarstaaten, z.B. ANIP) im Isoscapes-Modell begründet.

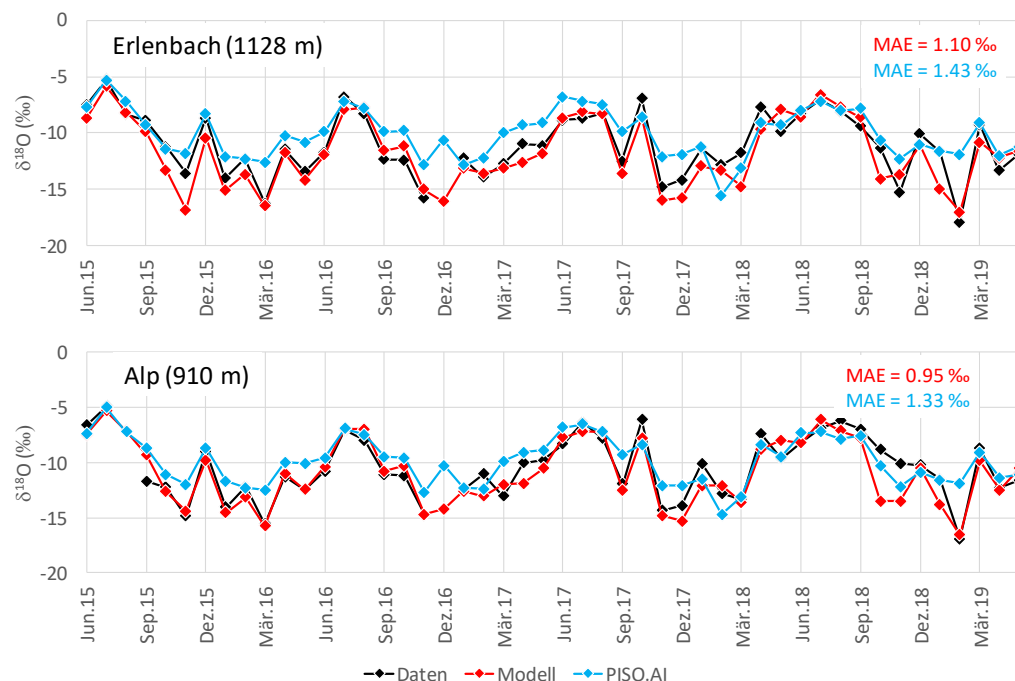


Abbildung 11: Vergleich der Werte aus den Messdaten, aus dem Isoscapes-Modell und aus dem Modell PISO.AI (Nelson et al., 2021) für die Stationen Erlenbach und Alp (von Freyberg et al., 2022; Knapp et al., 2024).

Im Falle des Beispiels Waldlabor Zürich steht zum Vergleich ein überlappender Zeitraum von April bis Dezember 2020 mit insgesamt 9 Werten zur Verfügung (Abbildung 12). Dieser ist relativ kurz und die Aussagekraft des Vergleichs ist geringer als bei den Stationen zuvor. Auch hier sind die Ergebnisse aus dem Isoscapes-Modell besser.

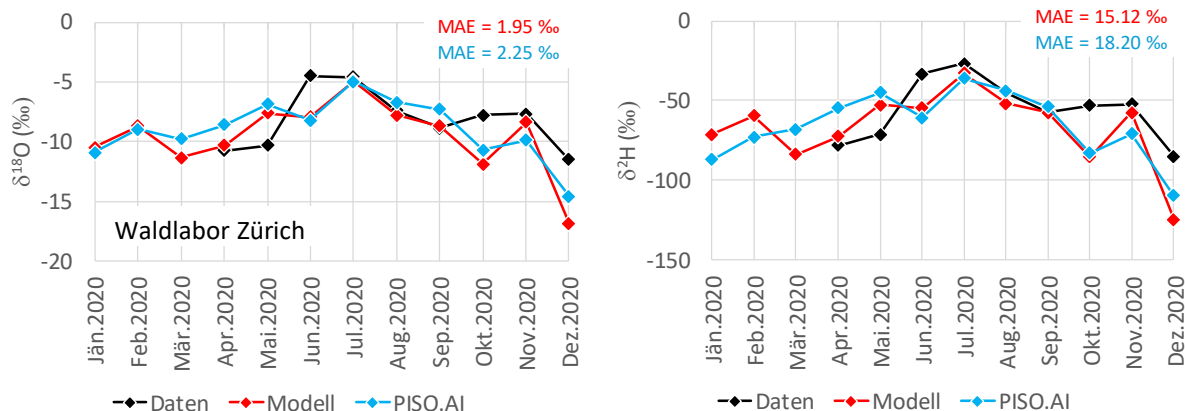


Abbildung 12: Vergleich der Werte aus den Messdaten, aus dem Isoscapes-Modell und aus dem Modell PISO.AI (Nelson et al., 2021) für die Station Waldlabor Zürich (Floriantic et al., 2024). Links: Sauerstoff-18; rechts: Deuterium.

Die Aufzeichnungen bei den WSL Stationen beginnen mit 2021, mit Ausnahme bei der Station Davos, von der seit Mitte 2020 Daten verfügbar sind. Der Vergleich für Davos ist für das halbe Jahr 2020 (6 Werte) aber nicht sehr aussagekräftig. Man erkennt allerdings, dass beide Modelle für diesen Zeitraum ähnliche Ergebnisse liefern. Das PISO.AI Modell ist bei Deuterium leicht besser.

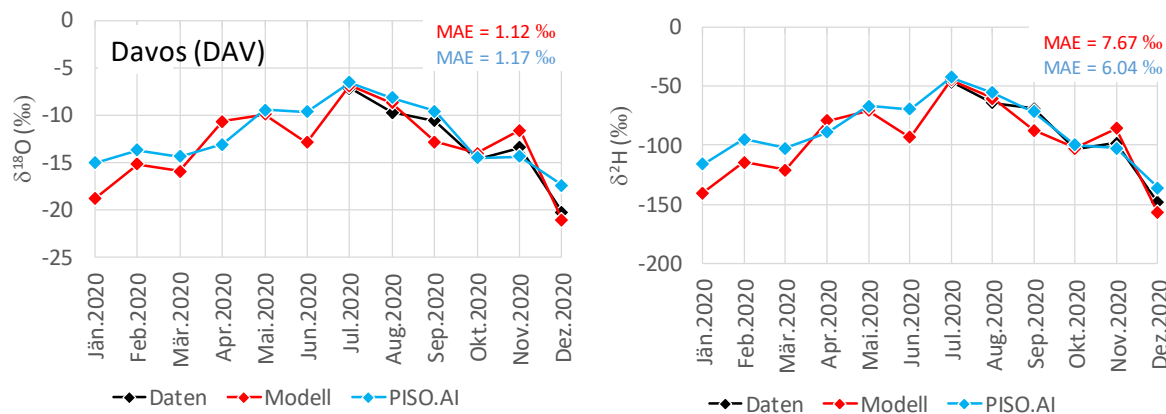


Abbildung 13: Vergleich der Werte aus den Messdaten, aus dem Isoscapes-Modell und aus dem Modell PISO.AI (Nelson et al., 2021) für die im Station Davos der WSL (Quelle: watson-cost.eu). Links: Sauerstoff-18; rechts: Deuterium.

4 Testung zusätzlicher Stationen im Tessin

Zur Verbesserung der Datenlage im Tessin wurden im Zuge der vorliegenden Phase 2 drei Niederschlagsstationen ausgewählt, um zu prüfen, ob neu gewonnene Daten (2024) die Ermittlung der Isoscapes verbessern und – vor allem – um eine Redundanz zur Station Locarno-Monti zu ermöglichen. Wie sich bei der Entwicklung der Isoscapes herausstellte, werden die Isoscapes bei Ausfall der Station Locarno-Monti sehr unsicher (Reszler et al., 2024). Es sind dies die Stationen Cadenazzo auf 205 m Seehöhe, Stabio auf 353 m Seehöhe und Robiei auf 1898 m Seehöhe (Abbildung 14). Die Stationen

Robiei und Stabio sollen darüber hinaus an den Grenzen des Kantons Tessin zu einer weiteren Verbesserung der Isoscapes führen. Robiei liegt an der Südseite des Alpenkammes, in einer Region, in welcher hohe Gradienten in den Isotopengehalten im Niederschlag detektiert wurden. Stabio liegt ganz im Süden, an der Grenze zu Italien, und könnte – auch aufgrund von fehlenden Stationen in Italien – hier zu einer Verbesserung der Isoscapes führen.

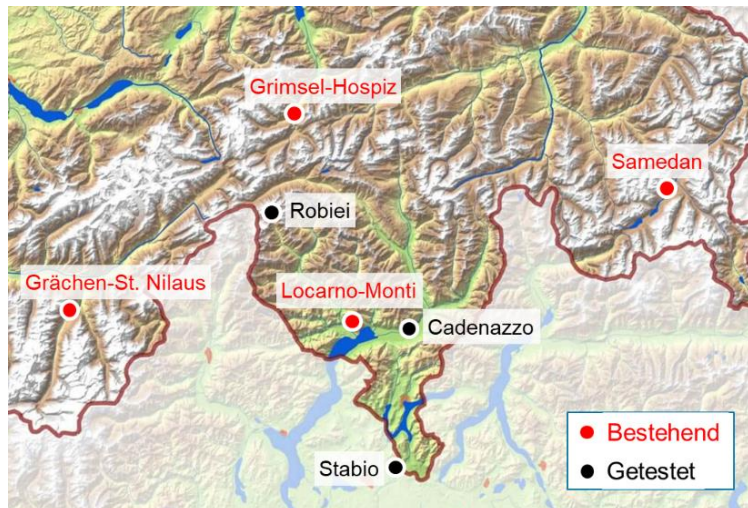


Abbildung 14: Bestehende und zur Aufnahme in das ISOT-Netz getestete Stationen im Süden der Schweiz (Tessin).

4.1 Cadenazzo

Für die Station Cadenazzo wurden monatliche Sammelproben in den Jahren 2021 und 2023 (und auch aktuell 2024, siehe folgendes Kapitel) gezogen. Abbildung 15 zeigt die monatlichen Sauerstoff-18 Werte im Vergleich mit jenen von Stationen in der Region. Im Jahr 2021 sind die Werte etwas angereicherter gegenüber jenen von Locarno, was aufgrund der etwas niedrigeren Seehöhe plausibel ist. Im Jahr 2023 ist dieser Unterschied nicht so stark. Der Messwert im März 2021 stellte sich allerdings als sehr unsicher heraus; der Deuterium-Exzess errechnete sich zu einem negativen Wert. Deutlich abgereicherter sind die Werte an der höher gelegenen Station Pontresina und jene der Nachfolgestation Samedan, wobei auch hier der Unterschied im Jahr 2023 – vor allem in den Sommermonaten – zu den Stationen im Tessin auffällig gering ist.

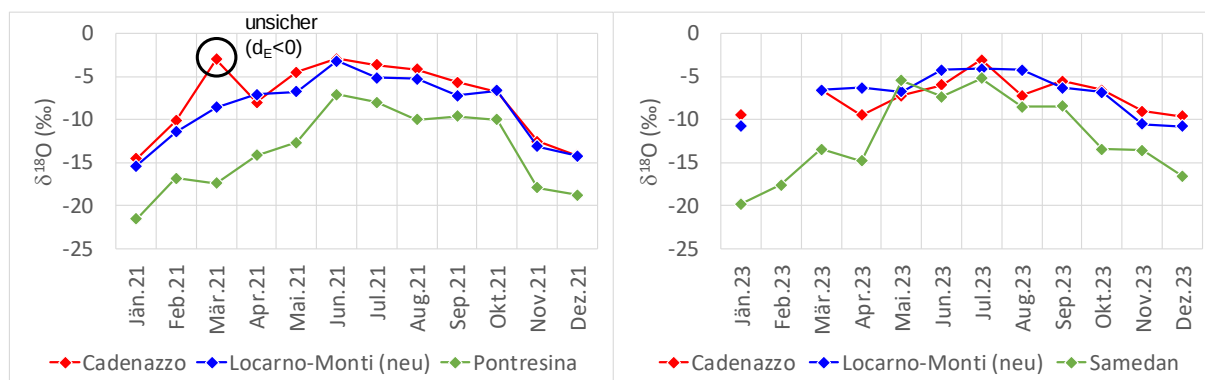


Abbildung 15: Messdaten von Sauerstoff-18 an der Station Cadenazzo im Jahr 2021 (links) und 2023 (rechts) verglichen mit den Stationsdaten in der Umgebung.

Um den Wert einer zusätzlichen Station im Tessin für die Güte der Interpolation zu zeigen, wurden mit dem Interpolationsmodell Sauerstoff-18 Werte für Locarno (ohne die Messwerte dieser Station)

einmal ohne (wie bei der Kreuzvalidierung in der Entwicklungsphase) und einmal mit den Werten für Cadenazzo im Jahr 2021 errechnet. Abbildung 16 zeigt die deutlich besseren Ergebnisse unter Einbeziehung der Station Cadenazzo. Der Fehler (MAE) verringert sich in diesem Jahr gegenüber dem ursprünglichen Modell von 3.17 ‰ auf 1.11 ‰. Das heißt also, sollten von der Station Locarno-Monti keine Daten verfügbar sein, würde das Vorhandensein von Messwerten an der Station Cadenazzo die Unsicherheiten in den Isoscapes im Tessin sehr deutlich verringern. Anm.: Der Wert im März 2021 für Cadenazzo wurde bei der Interpolation einbezogen, um die Wirkung dieses sehr unsicheren Wertes zu zeigen.

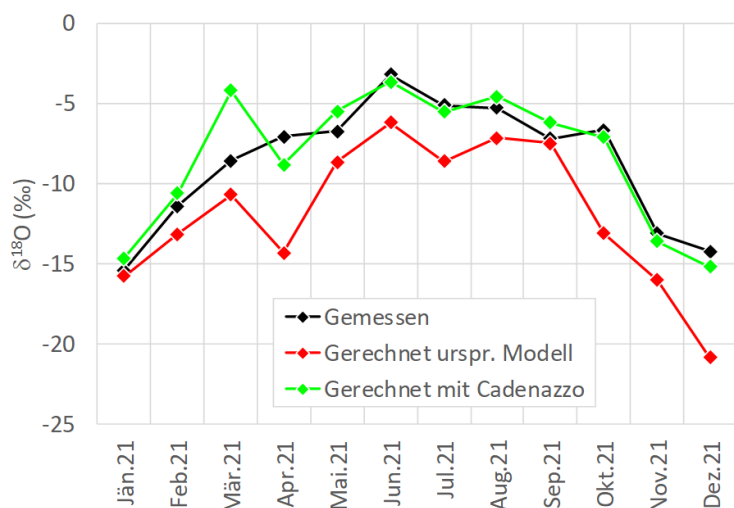


Abbildung 16: Gerechnete Sauerstoff-18 Werte für den Standort der Station Locarno mit (grüne Linie) und ohne (rot, ursprüngliches Modell) im Jahr 2021.

4.2 Stabio und Robiei

Über das Ziel einer Datenredundanz hinaus gehen die Bemühungen, die Güte der Isoscapes an den Grenzen des Kantons Tessin durch zusätzliche Stationen zu verbessern. Hierfür wurden an den Stationen Stabio und Robiei der MeteoSchweiz Proben im Jahr 2024 im einwöchentlichen Intervall gemessen. Abbildung 17 vergleicht die an diesen Stationen gemessenen Sauerstoff-18 Werte mit den monatlichen Proben an den bestehenden ISOT-Stationen. Im Falle der Station Stabio (353 m üM.) ist ein Gleichklang mit den monatlichen Daten in Locarno (379 m üM.) zu erkennen (Abbildung links). Auch der relativ geringe Wert im November wurde bei beiden Stationen verzeichnet. Im Vergleich mit Locarno liegt die Station geringfügig niedriger, vor allem aber weiter südlich, was die im Mittel etwas höheren, d.h. angereicherten, Werte in Stabio erklärt. Der Vergleich der Werte der Station Robiei (1898 m üM.) mit monatlichen Werten von Stationen in ähnlicher Höhenlage (Grimsel auf 1950 m üM. und Samedan auf 1711 m üM.) zeigt, dass die Werte in Robiei im Mittel höher, also etwas angereicherter sind, als bei den anderen beiden Stationen (Abbildung rechts). Hier spiegelt sich der etwas höhere Einfluss von Wetterlagen mit Südanströmung im Bereich der Station Robiei wider. Dies ist genau der Bereich an der Grenze des Kantons Tessin zu den Kantonen Uri, Wallis und Bern, in welchem aufgrund kleinräumiger Unterschiede in den atmosphärischen Bedingungen höhere Gradienten der Isotopengehalte und daher auch phasenweise höhere Unsicherheiten in den Isoscapes auftreten.

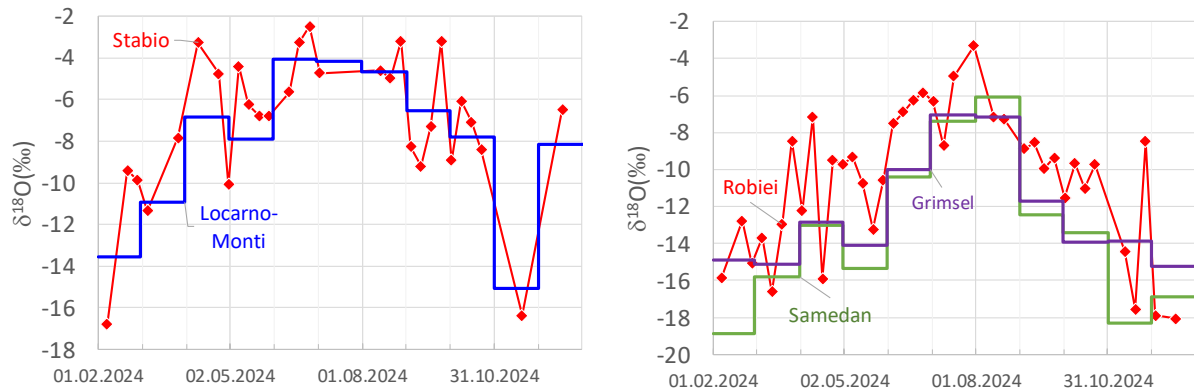


Abbildung 17: Vergleich gemessener Sauerstoff-18 Werte im Jahr 2024: links: monatliche Proben in Locarno verglichen mit Proben in kürzeren Intervallen in Stabio; rechts: monatliche Proben in Samedan und Grimsel verglichen mit Proben in kürzeren Intervallen in Robiei.

Für Stabio und Robiei wurden aus den Messdaten für die einzelnen Kalenderwochen mit dem jeweiligen Wochenniederschlag, zur Verfügung gestellt von MeteoSchweiz, niederschlagsgewichtete Mittelwerte für die Kalendermonate und gesamt über den Zeitraum Februar bis Dezember 2024 gebildet. In Abbildung 18 sind die niederschlagsgewichteten Werte zusammen mit den entsprechenden Werten bei Stationen in der Region gegen die Seehöhe aufgetragen. Während das Mittel an der Station Stabio direkt auf der Regressionsgeraden zu liegen kommt, weicht jenes von der Station Robiei etwas ab. Die Mittelwerte in Robiei liegen zwischen jenen in Locarno im Süden und Grimsel im Norden. Geografisch würde sich der Wert in Robiei gut einfügen, hinsichtlich der Seehöhe der Station müsste der Wert aber – wie auch oben beschrieben – näher bei jenem der Station Grimsel liegen. Auch an dieser Darstellung sind die kleinräumigen Unterschiede in den atmosphärischen Bedingungen, die sich in diesem Fall in unterschiedlichen Seehöhengradienten ausdrücken, gut erkennbar.

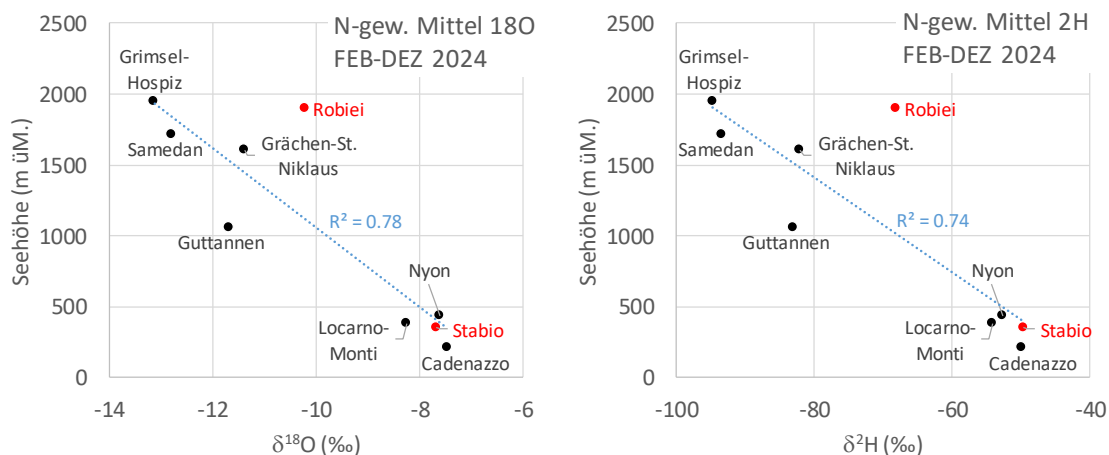


Abbildung 18: Niederschlagsgewichtete Mittelwerte an Stationen im Raum Südschweiz von Feb. bis Dez. 2024 in Abhängigkeit der Seehöhe zur regionalen Einordnung der Stationen Stabio und Robiei. Links: Sauerstoff-18; rechts: Deuterium.

Schließlich wurde der zeitliche Verlauf der Monatswerte im Jahr 2024 der beiden Stationen Stabio und Robiei mit jenem an benachbarten Stationen verglichen (Abbildung 19). Zum regionalen Vergleich für Stabio (Abbildung 19 oben) wurden die ISOT-Station Locarno und die Station Cadenazzo herangezogen. Seit dem Sommer 2024 werden auf der GNIP-Datenbank monatliche Messwerte an der Station Milano (Mailand) veröffentlicht. Diese wurden ebenfalls eingetragen. Stabio zeigt etwas höhere Werte als die

anderen Stationen im Frühjahr, aber einen ähnlichen Verlauf. Das restliche Jahr weichen die Werte nur geringfügig von jenen in Locarno und Cadenazzo ab. Interessant ist der große Unterschied zwischen dem Novemberwert an den Schweizer Stationen und jenem in Milano. Dieser Unterschied dürfte den Grund haben, dass in Milano der Niederschlag als Regen fiel und weiter im Norden, im Tessin, als Schnee. Der Seehöhenunterschied von Milano zu den Schweizer Stationen beträgt knapp 200 m.

Zum Vergleich der Daten betreffend die Station Robiei (Abbildung 19 unten) wurden Daten der höher gelegenen Stationen Grimsel und Samedan einbezogen. Die Daten bewegen sich im Gleichklang, aber gemäß den unterschiedlichen Seehöhen auf unterschiedlichem Niveau. Einzelne Wintermonate zeigen aber eine Abweichung dieses Gleichklangs (Grimsel im Januar und Februar und Locarno im Dezember). Schneefall ja oder nein dürfte hier einen starken Einfluss auf die Werte besitzen.

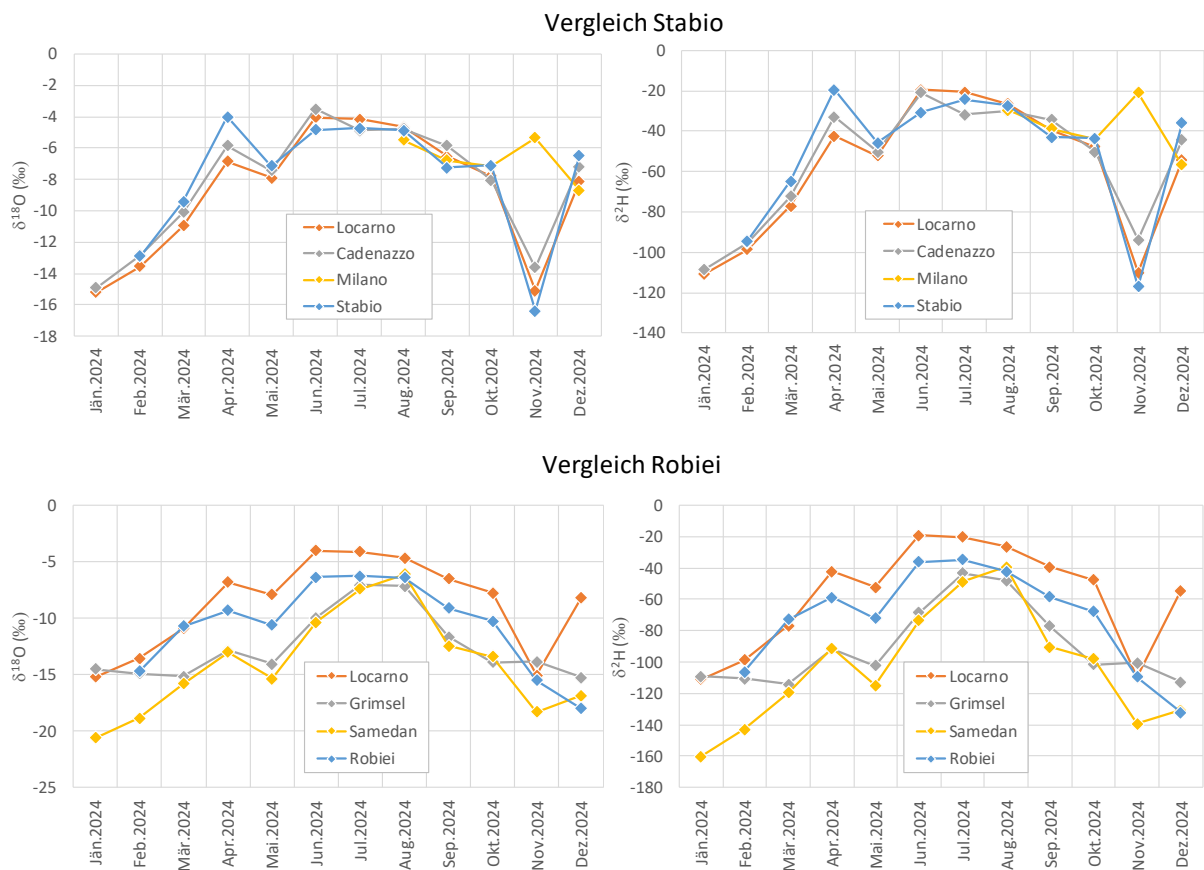


Abbildung 19: Gemessene Sauerstoff-18 Werte (links) und Deuterium Werte (rechts) im Raum Südschweiz im Jahr 2024. Oben: Vergleich für Stabio; unten: Vergleich für Robiei (Verwendung auch höher gelegener Stationen).

Interessant ist, dass die Monatswerte von Robiei im Winter (Januar, Februar) eher bei jenen in Locarno-Monti und im Hochsommer (Juli, August) eher bei jenen von Grimsel und Samedan liegen. Dies deutet darauf hin, dass die Seehöhenabhängigkeit im Hochsommer stärker ausgeprägt war und in den Monaten Januar und Februar der Niederschlag wie auch an den niedriger liegenden Stationen im Tessin vorwiegend als Regen fiel, wahrscheinlich aufgrund dominierender Anströmung warmer Luft aus Süden. Ähnliche Schlüsse konnten auch bereits im Zuge der Entwicklung des Modells in Phase 1 gezogen werden.

4.3 Schlussfolgerungen für die Aufnahme der Stationen in das ISOT-Messnetz

Aus den vorliegenden Auswertungen kann geschlossen werden, dass eine Aufnahme der Stationen Stabio und Robiei in das ISOT-Netz und ein Start von regelmäßigen (kalender)monatlichen Beprobungen sehr sinnvoll ist. Bei Verwendung der Station Stabio ist eine Einbindung der Station Cadenazzo nicht notwendig.

Bezüglich der Berechnung zukünftiger Isoscapes-Raster ist darüber hinaus anzudenken, die ab 2024 in der GNIP-Datenbank verfügbaren Daten der Station Milano als Absicherung der Interpolation im Süden (kaum Schneefall, Werte werden im Winter gegen Süden deutlich höher) in das Modell einzubeziehen.

5 Lieferung der Rasterdaten

Ziel der Phase 2 im Projekt Isoscapes Schweiz war die Lieferung von Rasterdaten im gesamten Entwicklungszeitraum 2007-2020 und erweitert für den Zeitraum 2021-2023. Zu diesem Zweck wurden die Isotopendaten aus dem Entwicklungszeitraum 2007 bis 2020 gegebenenfalls durch mittlerweile verfügbare Daten ergänzt (z.B. Thonon-Les-Bains bis Ende 2021) und sämtliche Daten aus den Ländern Schweiz, Österreich und Deutschland für die Jahre 2021 bis 2023 nachgeführt.

Im Zuge der vorliegenden Arbeiten mit den Daten im Zeitraum 2021-2023 ergaben sich einige Änderungen im verwendeten Stationsnetz. In das Modell wurden zusätzliche Stationen eingebaut:

- Die Station Samedan (SAM) ersetzt die Station Pontresina (PO2) mit einer kurzen Datenlücke von ein paar Monaten. Darüber hinaus traten bei den ersten Messdaten in Samedan größere Unsicherheiten auf (unplausible Werte).
- An der Station Cadenazzo (CAD) wurden die hier analysierten Werte in den Jahren 2021 und 2023 im Modell verwendet.
- Die Station Widnau (WID) an der Grenze zu Österreich wurde ab November 2023 in das Messprogramm aufgenommen (2 Werte verfügbar, aber für weitere Jahre vorgesehen).
- An der Station Silvretta-Stausee (SIV) in Vorarlberg in Österreich, auf einer Seehöhe von 1980 m üM. gelegen, wurden Proben nachgemessen und monatliche Daten ab 2016 auf der Plattform der ANIP-Stationen veröffentlicht. Die Daten werden in bestimmten Monaten verwendet, in denen weder in Pontresina noch in Obergurgl ein Wert verfügbar ist (z.B. 07/2020 und 11/2020). In der restlichen Zeit werden die Daten nicht verwendet, um die bisher ausgewerteten Muster nicht zu verändern.
- Die Daten der WSL Station Davos (DAV) werden für das Jahr 2022, als weder in Pontresina noch in Samedan Daten vorhanden sind, verwendet. Die Auswertungen im vorliegenden Bericht zeigten eine gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Daten (Kap. 3.3). Dies liegt auch daran, dass die Werte in Davos sehr gut mit jenen in Pontresina und auch einigermaßen gut mit jenen in Sevelen korrelieren (Abbildung 20).

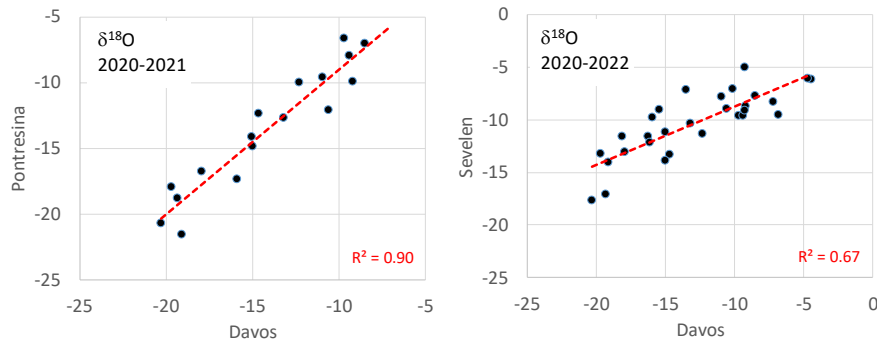


Abbildung 20: Korrelation der Sauerstoff-18 Werte an der Station Davos mit jenen an der Station Pontresina (bis Ende 2021, links) und Sevelen (rechts).

Folgende Abbildung 21 zeigt die Verfügbarkeit der Daten zur Verwendung zur Generierung der Isoscapes von 2007 bis 2023. Die Abkürzungen sind dem Bericht zur Phase 1 zu entnehmen. Während der Datenlücken beim Ersatz der Station Pontresina (PO2) durch Samedan (SAM) (rote Rechtecke) werden die plausibel erscheinenden Daten der WSL Station Davos (DAV) einbezogen.



Abbildung 21: Verfügbarkeit der Daten zur Verwendung zur Generierung der Isoscapes von 2007 bis 2023. Abkürzungen siehe Bericht Isoscapes. Die roten Rechtecke kennzeichnen Datenlücken beim Ersatz der Station Pontresina (PO2) durch Samedan (SAM). In dieser Phase werden die Daten von Davos (DAV) einbezogen.

6 Literatur

Floriancic, M. G., Scott T. A., & Kirchner, J. W. (2024): Young and new water fractions in soil and hillslope waters. *Hydrology and Earth System Sciences* 28.18 (2024): 4295-4308.

Knapp, J. L., Napitupulu, T., von Freyberg, J., Rücker, A., Studer, B., Zappa, M., & Kirchner, J. W. (2024); Multi-year time series of daily solute and isotope measurements from three Swiss pre-Alpine catchments. *Scientific Data*, 11(1), 393.

Nelson, D. B., Basler, D., & Kahmen, A. (2021): Precipitation isotope time series predictions from machine learning applied in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(26), e2024107118.

Penna, D. & van Meerveld, I. and the WATSON Extended Core Group (2024): Isotope applications in the Critical Zone across Europe: the latest activities of the WATSON COST Action, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-18018, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-18018>, 2024.

Reszler, C., Pelzmann, V., & Leis, A. (2023): ISOSCAPES SCHWEIZ. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bericht JR-AquaConSol, Graz, 79 S.
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/studien.html>

Reszler, C., Pelzmann, V., Leis, A., & Schürch, M. (2024): Fingerabdruck des Wassers. *Aqua & Gas*, 2024(9), 30-35.

Schotterer, U., Schuerch, M., & Rickli, R. (2010): Water Isotopes in Switzerland: Latest Findings of the National ISOT Network. *GWA: Gas, Wasser, Abwasser*, (12).

Von Freyberg, J., Rücker, A., Zappa, M., Schlumpf, A., Studer, B., & Kirchner, J. W. (2022): Four years of daily stable water isotope data in stream water and precipitation from three Swiss catchments. *Scientific data*, 9(1), 46.

7 Anhang: Nachtrag zum Bericht für Isoscapes Phase 1 - Vergleich mit PISO.AI

Im Bericht zur Entwicklung der Isoscapes in der Schweiz (Phase 1) wurde ein kurzer Vergleich der Ergebnisse aus dem Isoscapes Modell und dem KI-Modell PISO.AI (Nelson et al., 2021) durchgeführt. Dieser Vergleich wird im vorliegenden Anhang etwas ausführlicher beschrieben bzw. werden Ergebnisse und Daten bis Ende 2020 (Ende des Zeitraums in PISO.AI, Stand 2025) nachgeführt. Aufgrund der längeren Datenreihen ist dieser Vergleich aussagekräftiger als jener in Kap. 3.4 im aktuellen Bericht.

Betrachtet werden Stationen, die nicht zum Training des PISO.AI Modells verwendet wurden. Zum objektiven Vergleich wird die Isoscapes Modellberechnung unter Weglassen dieser Station (wie in der Kreuzvalidierung) herangezogen. Da die Interpolation in beiden Modellen darauf ausgelegt ist, dass der Wert an einer Station – bis auf geringfügige Abweichungen, z.B. Nugget in Kriging im Isoscapes Modell – widergegeben wird, soll dies die Modellgüte zwischen den Stationen bewerten. Als quantitatives Fehlermaß wird der Mean Absolute Error (MAE, Gl. 1) verwendet.

Stationen, die innerhalb der Domain des Isoscapes Modell liegen, aber nicht zum Training in PISO.AI verwendet wurden (siehe Nelson et al., 2021), sind die Stationen Bregenz, Schoppernau und Obergurgl aus dem Österreichischen Isotopennetzwerk (ANIP). Bei der ISOT Station Grächen-St. Niklaus beginnt die Datenreihe erst ab 2011, weshalb sie in PISO.AI nicht Eingang fand. Nicht in PISO.AI verwendet wurden des Weiteren die Station Thonon-Les-Bains, eine GNIP Station auf der Französischen Seite des Genfer Sees, und die im Jahre 2012 aufgelassene Station Vaduz in Liechtenstein. Als Ersatz für letztere ab 2012 dient die Station Sevelen. Die Lage der Stationen ist der Karte im Bericht zur Modellentwicklung (Phase 1, Reszler et al., 2023) zu entnehmen.

Wie erwähnt wurde bei der Betrachtung einer Station deren Daten bei der Isoscapes-Berechnung weggelassen und aus der Interpolation die Werte an diesem Standort extrahiert. Für denselben Standort wurden aus der PISO.AI Website die monatlichen Datenreihen extrahiert. In folgender Abbildung A1 sind die monatlichen Werte aus beiden Modellen für Sauerstoff-18 aufgetragen und mit den Messdaten verglichen. Der zeitliche Ausschnitt wurde für die Stationen je nach Verfügbarkeit der Daten unterschiedlich gewählt. Die MAE-Maße beziehen sich auf den gezeigten Zeitraum. In Tabelle A1 sind die MAE Werte für die gesamte im Zeitraum von 2007 bis 2020 verfügbare Datenreihe (Sauerstoff-18 und Deuterium) aufgelistet.

Generell zeigt sich bei sämtlichen ausgewerteten Stationen, dass die Dynamik, d.h. die Maximalwerte im Sommer und die Minimalwerte im Winter, durch das Isoscapes Modell besser getroffen wird. PISO.AI erzeugt etwas gedämpfte Reihen. Durch diese stärkere Dynamik kommen die Ergebnisse mit dem Isoscapes Modell aber näher an die Messdaten heran, und die Fehler sind durchweg geringer. Die Simulation mit dem Isoscapes Modell an den Stationen Bregenz und Schoppernau profitiert vom Vorhandensein der jeweiligen anderen Station. Die Stationen liegen relativ nahe beieinander, die Daten korrelieren gut und sind daher gut von einer Station auf die andere übertragbar. Den unterschiedlichen Seehöhen wird in den Modellen Rechnung getragen. Außerdem existiert auf Schweizer Seite in nicht sehr großer Entfernung noch die Station St. Gallen, deren Daten auch gut mit jenen der österreichischen Stationen korrelieren (siehe Bericht Phase 1, manuelle Datenanalyse) und auch im Modell PISO.AI verwendet wurden. Es werden daher hier mit beiden Modellen sehr gute

Ergebnisse erzielt; die MAE Maße mit dem Isoscapes Modell liegen im Bereich von 1 % und darunter (Tabelle A1).

Für die hochgelegenen Bereiche in den Alpen ist das Vorhandensein von entsprechenden Höhenstationen wichtig. Die Anzahl solcher Stationen mit Daten über den gesamten Modellzeitraum 2007-2020 ist gering; es bestehen nur zwei Stationen: Grimsel und Pontresina. Die ab 2011 in das ISOT-Netzwerk aufgenommene Station Grächen-St. Niklaus auf über 1600 m Seehöhe stellt eine wertvolle Ergänzung dar. Sie deckt einen wichtigen Bereich im Wallis ab, in welchem unterschiedliche Klimazonen aufeinandertreffen. An dieser Station zeigen sich mit beiden Modellen die höchsten Abweichungen. Es fehlt an Stationen in der Nähe mit ähnlicher Charakteristik der Niederschläge, bzw. sind die Gradienten zwischen den bestehenden Stationen sehr hoch. Dies führt zu relativ schlechten Ergebnissen in beiden Modellen. Zum Beispiel sind die niedrigen Winterwerte 2013 bis 2015 von beiden Modellen nicht nachbildbar. Wie angemerkt, ist auch hier die Dynamik im Isoscapes Modell leicht höher, was auch ein etwas besseres Fehlermaß bewirkt (Sauerstoff-18: MAE = 1.93 % beim Isoscapes Modell gegenüber MAE = 2.6 % bei PISO.AI).

Ebenfalls interessant ist die Analyse der Modellgüte an der Station Obergurgl in Österreich (Tirol) auf knapp unter 2000 m Seehöhe. Die Station liegt zwar schon etwas außerhalb der Schweiz, die Daten sind aber wertvoll, da diese Station im Südosten der Schweiz noch einen gewissen Einfluss besitzt; Stationen in der Schweiz fehlen in dieser Region. Die Daten der etwas weiter westlich gelegenen Station Pontresina bestimmen die Verteilung der Isotopengehalte im Niederschlag in dieser Region. Auch bei Ausfall dieser Station kann die Station Obergurgl sehr wichtig sein. Der Vergleich ist außerdem ein Test, wie sich das Modell in den hohen Lagen in dieser Region (Südostschweiz) verhält. Die Ergebnisse aus dem Isoscapes Modell sind im Darstellungszeitraum 2007 bis 2012 als äußerst gut zu bezeichnen (MAE=1.41 %). Betrachtet man den gesamten Datenzeitraum sind die Fehler höher. Aus dem Modell PISO.AI ergeben sich relativ hohe Fehler (2.7 % im Zeitraum 2007-2012 bzw. 2.6 % im Zeitraum 2007-2020). In dieser Region dürfte das KI-Modell also nicht sehr zuverlässige Ergebnisse liefern. Zum Training waren nicht ausreichend Stationen verfügbar.

Betreffend die Station Thonon-Les-Bains in Frankreich (Daten von 2012 bis 2018) ergeben sich aus beiden Modellen sehr gute Ergebnisse. Die Werte dieser Station korrelieren gut mit jenen an der ISOT-Station Nyon, welche in beiden Modellen verwendet wird. Aus dem Isoscapes Modell ergibt sich für Sauerstoff-18 ein MAE von 0.93 % und für Deuterium ein MAE von 7.5 %. Fehler in dieser Größenordnung sind für ein Interpolationsmodell als hervorragend zu bezeichnen.

Schließlich existierte bis 2012 eine Station in Vaduz in Liechtenstein, die im Schweizerischen ISOT-Netzwerk eingebunden war. Ab 2013 wurde diese Station durch eine Station in Sevelen auf Schweizerischem Gebiet ersetzt. Daten der Ersatzstation wurden nicht in der Kreuzvalidierung verwendet. Die nächstgelegenen Stationen sind die Station St. Gallen in der Schweiz und die Station Bregenz in Österreich, die einen Einfluss auf die Güte der Ergebnisse am Standort dieser Station besitzen. Die Station Bregenz wurde im Isoscapes Modell eingebunden, was zu guten Ergebnissen an der Station Vaduz führt (MAE = 1.29 %).

Bei Deuterium ist die Situation betreffend die Unterschiede in den beiden Modellen äquivalent. Die Fehlermaße für die von 2007 bis 2020 verfügbare Datenreihe wurden ebenfalls in Tabelle A1 eingetragen. Auf eine Darstellung der Zeitreihen wie bei Sauerstoff-18 wurde aber verzichtet.

Tabelle A1: Fehlermaße (Mean Absolute Error – MAE) von Sauerstoff-18 und Deuterium bei Verwendung des Isoscapes Modells („Modell“) und PISO.AI.

Station	Betreiber/ Netzwerk	Seehöhe (m ü.M.)	MAE $\delta^{18}\text{O}$ (‰)		MAE $\delta^2\text{H}$ (‰)		Daten		Lücken
			Modell	PISO.AI	Modell	PISO.AI	von	bis	
Bregenz-AT	ANIP	410	1.03	1.38	7.9	11.1	2007	2020	2013, 2019
Schopernau-AT	ANIP	835	0.86	1.20	6.8	9.7	2007	2020	---
Obergurgl-AT	ANIP	1940	1.83	2.18	14.7	17.8	2007	2020	2012, 2013, 2018, 2020
Grächen-St. Niklaus	ISOT	1605	1.93	2.60	14.7	19.7	2011	2020	2012
Thonon-Les-Bains-FR	GNIP	385	0.93	1.25	7.5	10.6	2012	2018	2013
Vaduz-LI	ISOT	460	1.29	1.63	9.8	11.5	2007	2012	---

Der vorliegende Vergleich der Ergebnisse zwischen dem Isoscapes Modell und dem KI Modell PISO.AI hatte zum Ziel, die Interpolationsgüte zwischen den Stationen aus beiden Modellen zu bewerten. Als **Fazit** lässt sich sagen, dass die deutlich besseren Ergebnisse im Isoscapes Modell vorwiegend auf die Verwendung von einem dichteren Stationsnetz und der automatisierten Datenprüfung (Deuterium-Exzess und Niederschlagsmenge), die auch zum Ausschluss eines Wertes an einer Station in der Interpolation führen kann, zurückzuführen ist. Ebenfalls wichtig sind die Stationen aus fremden Messnetzen zur Verbesserung der Interpolation im Bereich der Landesgrenze. Neben der Redundanz bei einer möglichen Datenlücke an einer ISOT Station, führen unterschiedliche Messmethoden (Labors, Unsicherheiten) in der Regel auch zu einer Verringerung der Gesamtunsicherheiten in der regionalen Zusammenschau bzw. Interpolation.

Einen nicht unerheblichen Einfluss besitzt auch die unterschiedliche Gitterweite in den Modellen. Während das Isoscapes Modell auf einer Gitterweite von 500 m arbeitet und auch das aktuelle Höhenmodell auf dieser Skale entsprechend zum Einsatz kommt, rechnet PISO.AI auf europäischer Skale mit einer Auflösung von 0.5° , was in der Region Schweiz-Österreich etwa einer Zellweite von 46 km entspricht. Bei größerer Zellgröße „verschmiert“ sich das Höhenmodell vor allem in den gebirgigen Bereichen, was dazu führt, dass sich die Seehöhen an den Stationen und jene aus dem Höhenmodell deutlich unterscheiden können. In Situationen, in denen Seehöhenabhängigkeit dominiert, kann dies höhere Unsicherheiten in der Interpolation bewirken.

Das KI-Modell PISO.AI besitzt allerdings den Vorteil, dass eine europaweite Anwendung möglich ist und die Daten rasch durch Eingabe der Koordinaten für einen Punkt aus der sehr übersichtlichen Website extrahierbar sind. Eine weitere Stärke von PISO.AI ist die Einbeziehung sämtlicher verfügbarer Wetter- und Klimadaten in Europa, und der Umgang mit dieser Datenfülle ist durch die Anwendung eines KI-Modells recheneffizient möglich. Zum Beispiel stellte sich aus der KI-Analyse die Wichtigkeit weiterer Klimaparameter, zum Beispiel der Dampfdruck und die Luftfeuchte heraus, welche auch aus physikalischer Sicht wichtige Einflussfaktoren auf die Fraktionierung der Isotopengehalte im Niederschlag darstellen. Derartige Daten müssen meist mithilfe großräumiger Wettermodelle erarbeitet werden und sind auf kleiner Skale kaum verfügbar bzw. verwendbar. Schließlich kann bei Verwendung von PISO.AI empfohlen werden, zu prüfen, ob in der betrachteten Region Stationen beim Training des KI-Modells Eingang fanden. Der vorliegende Vergleich zeigte, dass aus dem Modell PISO.AI eine in Bezug zu den Messwerten zu stark gedämpfte Dynamik der monatlichen Werte erzeugt wurde. Vor allem die niedrigen Winterwerte können mit PISO.AI bei den Höhenstationen nicht wiedergegeben werden. Dies sollte beim Einsatz des Modells im Alpenraum bedacht werden.

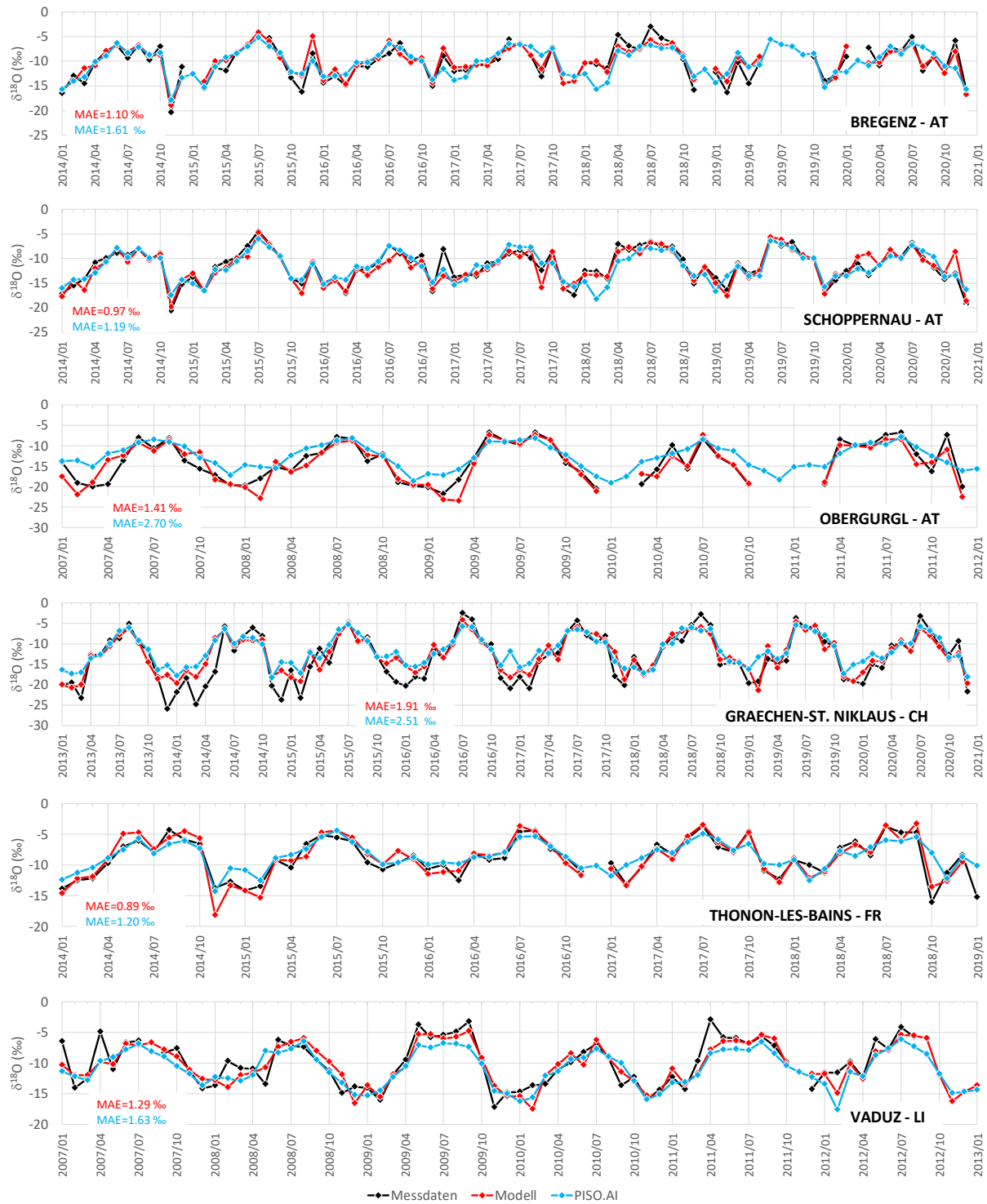


Abbildung A1: Vergleich der Sauerstoff-18 Werte aus den Messdaten, aus dem Isoscapes-Modell (rot) und aus dem Modell PISO.AI (hellblau, Nelson et al., 2021) für die Stationen, die nicht in PISO.AI eingingen. Die MAE Maße (in gleicher Farbe wie die Simulation) beziehen sich auf den gezeigten Ausschnitt. Aufgrund der automatisierten Berechnung der Fehler in der Kreuzvalidierung im Falle des Isoscapes Modells wird bei Fehlen oder bei Ausschluss (z.B. gemäß dem Deuterium-Exzess-Kriterium) eines Messwertes auch kein Simulationsergebnis ausgegeben