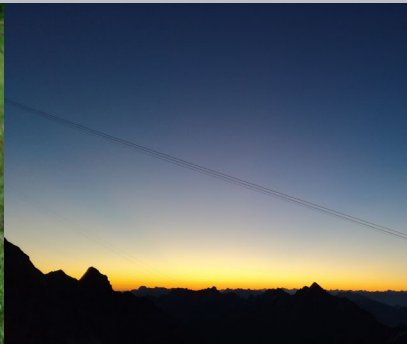


UNIA Universität Augsburg
Wissenschaftszentrum
Umwelt

Jahresbericht 2017



Virtuelles Alpenobservatorium (VAO)

PROJEKTTEAM

- Prof. Dr. Jucundus Jacobeit
jucundus.jacobeit@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 2670
- Prof. Dr. Karl-Friedrich Wetzel
karl-friedrich.wetzel@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 2277
- Prof. Dr. Ralf Ludwig
r.ludwig@lmu.de
Tel.: 089 2180 6677
- PD Dr. Christoph Beck
christoph.beck@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 2129
- PD Dr. Matthias Bernhardt
matthias.bernhardt@boku.ac.at
Tel.: +43 1 47654 5508
- PD Dr. Andreas Philipp
a.philipp@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 2266
- Severin Kaspar
severin.kaspar@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 3564
- Stefan Weishaupt
stefan.weishaupt@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 3565
- Michael Weber
m.weber@iggf.uni-muenchen.de
Tel.: 089 3187 2582

PROJEKTLAUFZEIT

- 2014-2017

PROJEKTPARTNER

- Bayerische Akademie der Wissenschaften, Abteilung Glaziologie der Kommission für Erdmessung und Glaziologie, Dr. L. Braun
- Bayerischer Lawinenwarndienst, B. Zenke
- BOKU Wien, Institute of Water Management, Hydrology and Hydraulic Engineering, Prof. Dr. K. Schulz
- Deutscher Wetterdienst, Station Zugspitze und Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg, Dr. W. Thomas, Dr. J. Seltmann
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Standort Davos), Dr. M. Lehning, Dr. C. Fierz
- Helmholtz-Zentrum München, Institut für Strahlenschutz, Dr. K. Hürkamp, Dr. J. Tschiersch
- KIT, IMK-IFU Garmisch-Partenkirchen, Prof. Dr. H. Kunstmann
- Pyrenean Institute of Ecology Zaragoza, Dr. N. Lopez-Moreno
- University of Saskatchewan, Global Institute for Water Security, Prof. Dr. J. Pomeroy
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien, Dr. E. Ludewig
- Universität Graz, Prof. Dr. W. Schöner

FÖRDERUNG

- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Virtuelles Alpenobservatorium (VAO)

Zum Abschluss des Verbundprojekts „Virtuelles Alpenobservatorium“ (VAO)

Das Konsortium der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS, siehe Abb. 1) ist in den Jahren 2014 bis 2017 vom Bayerischen Umweltministerium mit rund 3 Mio. Euro für ein Verbundprojekt gefördert worden, das den erläuterungsbedürftigen Obertitel „Virtuelles Alpenobservatorium“ (VAO) trägt. Dieser Begriff – ursprünglich gemünzt auf die Ausweitung und Einbettung der UFS in ein übergreifendes virtuelles Institut aller Höhenforschungsobservatorien im Alpenraum – wurde auch für dieses Verbundprojekt herangezogen, um u.a. die geforderte Vernetzung jedes einzelnen Teilprojektes mit mindestens einem alpinen VAO-Mitglied jenseits der UFS zum Ausdruck zu bringen. Thematisch war das VAO-Verbundprojekt sehr breit aufgefächert, die zehn Teilprojekte der UFS-Konsortialpartner verteilten sich auf die Schwerpunktthemen „Atmosphärische Variabilität und Trends“, „Alpine Umwelt: Risiken und Gefahren“, „Alpiner Wasserhaushalt“ sowie das Infrastrukturprojekt „Alpines Datenanalysezentrum“. Eines dieser zehn Teilprojekte, **„Klimawandel und Wasserbilanz in Hochgebirgsregionen“**, getragen vom Institut für Geographie der Universität Augsburg und vom Department für Geographie der LMU München, war in seinem Augsburger Teil direkt am WZU angesiedelt, aufgegliedert in einen klimatologischen Part (siehe den nachfolgenden Bericht „VAO Teilprojekt: Statistisches Downscaling meteorologischer Variablen mit hydrologischer Relevanz an der Station Zugspitze und der Station Hoher Sonnblick“) sowie in einen hydrologischen Part (siehe den nachfolgenden Bericht „VAO Teilprojekt: Monitoring und Analyse



Abb. 1: Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS), Oktober 2017

Virtuelles Alpenobservatorium (VAO)

der Wasserflüsse“), darüber hinaus sind vom Projektpartner an der LMU schneehydrologische Modellierungen durchgeführt worden. Als VAO-Vernetzungspartner war das im zentralen Alpenraum gelegene österreichische Sonnblick-Observatorium einbezogen.

Neben diesem Teilprojekt im Schwerpunktthema „Alpiner Wasserhaushalt“ war die Universität Augsburg auch an weiteren VAO-Teilprojekten beteiligt, so mit dem Institut für Physik an einer „Länderübergreifenden Untersuchung der Dynamik von atmosphärischen Wellen im Gebirge“ und am Infrastrukturprojekt „Alpines Datenanalysezentrum“. Schließlich ist im Rahmen des Teilprojekts „Trends klimawirksamer Gase und Aerosole und raumzeitliche Deposition persistenter Umweltschadstoffe“ vom federführenden Umweltbundesamt der Part „Klimawirksame Gase“ an die Geographie der Universität Augsburg delegiert worden; darüber war bereits im WZU-Jahresbericht 2016 zu lesen, mittlerweile hat sich eine weitere Projektförderung dieser Thematik durch das Umweltbundesamt ergeben, über die im nachfolgenden Beitrag „Betrachtung des regionalen CO₂-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen“ berichtet wird. Zusammenfassend darf festgestellt werden, dass die Augsburger Beteiligungen am VAO-Verbundprojekt sehr ertragreich gewesen und teilweise schon in weiterführende Projektbearbeitungen eingemündet sind.

VAO Teilprojekt: Statistisches Downscaling

Virtuelles Alpenobservatorium (VAO): Statistisches Downscaling meteorolo- gischer Variablen mit hydrologischer Relevanz an der Station Zugspitze und der Station Hoher Sonnblick

Worum geht es?

Im Rahmen des Verbund-Projektes Virtuelles Alpenobservatorium (VAO) wurden im vorliegenden Teilprojekt statistische Downscaling-Modelle entwickelt, um potentielle zukünftige Änderungen in lokalen Größen mit hydrologischer Relevanz abschätzen zu können.

Zielsetzung und Methoden

Es wurde dabei auf drei nicht lineare statistische Methoden zur Modellbildung zurückgegriffen, welche jeweils auf Basis täglicher Daten operieren. Als erstes ist der reference class forecast (RCF) zu nennen, welcher auf Zirkulationstyp-Klassifikationsverfahren (circulation type classifications, CTC) basiert (Philipp et al. 2010). Weiterhin wurden Künstliche Neuronale Netze (KNN bzw. Artificial Neural Networks, ANN) kalibriert, ein nicht lineares Regressionsverfahren (McCulloch et al. 1943). Das dritte Verfahren stellt eine Kombination aus Zirkulationstyp-Klassifikationen und ANNs dar (CTC + ANN).

Durchführung und Ergebnisse

Zunächst werden die Modelle kalibriert. Dabei werden sie mittels Beobachtungsdaten angepasst und hinsichtlich der Modellgüte bewertet (Validierung). Taugliche Modelle können anschließend auf Datensätze globaler Klimamodelle (GCMs) übertragen und Zukunftsprojektionen durchgeführt werden.

In der Kalibrierung dienen als lokale Zielgrößen (Prädiktanden) die Messzeitreihen des variablen Niederschlags (prc), der Temperatur (tmp), relativen Feuchte (rhum) und Windgeschwindigkeit (wnd) der Station Zugspitze sowie Temperatur und Niederschlag der Station Hoher Sonnblick. Die großskaligen Eingangsvariablen (Prädiktoren) stammen aus Reanalyse-Daten (20th Century Reanalysis V2). Die Modelle wurden anschließend auf verschiedene Realisationen sieben verschiedener globaler Klimamodelle übertragen, als Zukunftsszenarien dienen das RCP 45- und RCP 8.5-Szenario (Van Vuuren et al. 2011).

In Abbildung 1 werden die Ergebnisse der Modellkalibrierung und -validierung zusammenfassend dargestellt. Jedes Symbol entspricht dem mittleren Ergebnis einer 15fachen Kreuzvalidierung. In allen Fällen zeigt die alleinige Anwendung der ANNs die beste Modellperformanz in der Validierung (grün), dicht gefolgt von dem kombinierten Ansatz aus CTC + ANN. Die niedrigste Modellgüte erreichen die CTC-Ansätze.

Abbildung 2 zeigt als Resultat der Übertragung der kalibrierten Modelle auf die Prädiktoren aus den GCMs die Zukunftsprojektionen für die lokalen Zielgrößen auf der Zugspitze bzw. an der Station Hoher Sonnblick bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Die dünnen Linien repräsentieren jeweils die zentrale Tendenz einer spezifischen Kombination aus GCM und statistischem Modell, wohin-

VAO Teilprojekt: Statistisches Downscaling

gegen die dicken Linien den Ensemblemittelwerten aller modellierten Zeitreihen entsprechen. Diese wurden auf einen möglichen Trend mittels Trend-Rausch-Verhältnis (Schönwiese 2006) unter Berücksichtigung einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% überprüft. Nur die beiden Szenarien der zukünftigen Temperaturentwicklung (RCP 4.5 in blau und RCP 8.5 in rot) beider Stationen

weisen einen signifikant positiven Trend auf (vgl. Abb. 2 a und b). Zwischen den beiden Szenarien nimmt erwartungsgemäß der Unterschied gegen Ende des 21. Jh. zu, der höhere Strahlungsantrieb des RCP 8.5 resultiert dabei in einer höheren Jahresmitteltemperatur. Die projizierten jährlichen Niederschlagssummen beider Stationen unterliegen im Laufe des 21. Jahrhunderts keinen starken Änderungen (Abb. 2 c und d). Dies schließt jedoch saisonale Änderungen nicht aus. Betrachtet man die Entwicklung der relativen Feuchte an der Zugspitze (Abb. 2 e), so zeichnet sich visuell ein leichter insignifikanter Rückgang im Jahresmittel ab, während im Verlauf des 21. Jh. in der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (Abb. 2 f) visuell eine leichte insignifikante Zunahme auszumachen ist. Es zeigt sich zudem, dass der Effekt des erhöhten Strahlungsantriebs des RCP 8.5 im Vergleich zu RCP 4.5 nur bei der Temperatur beider Stationen und der relativen Feuchte der Zugspitze zu signifikanten Unterschieden im projizierten Verlauf führt (U-Test, Sicherheitswahrscheinlichkeit 95%, Mann & Whitney 1947).

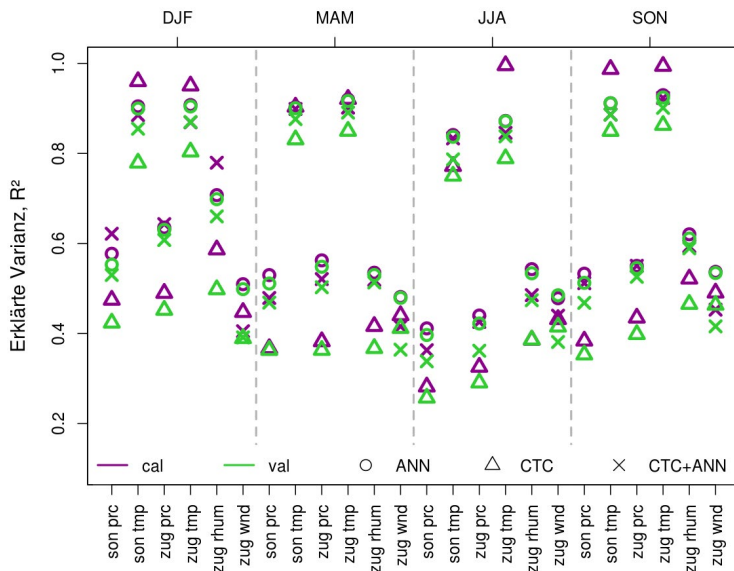


Abb.1: Modellperformanz (R^2 zwischen modellierten und beobachteten Werten) im Kalibrierungs- (cal) und Validierungszeitraum (val), saisonal differenziert für die Prädiktanden Niederschlag (prc), Temperatur (tmp), relative Feuchte (rhum) und Windgeschwindigkeit (wnd) an den Stationen Zugspitze (zug) und Hoher Sonnblick (son)

Ausblick

In Kooperation mit der LMU-München (Department für Geographie) dienen die erstellten Zeitreihen als Basis der schneehydrologischen Modellierung in der Region Zugspitze, um unter anderem zukünftige Änderungen der jährlichen Schneedynamik sowie der Gletschermassenbilanz abschätzen zu können.

VAO Teilprojekt: Statistisches Downscaling

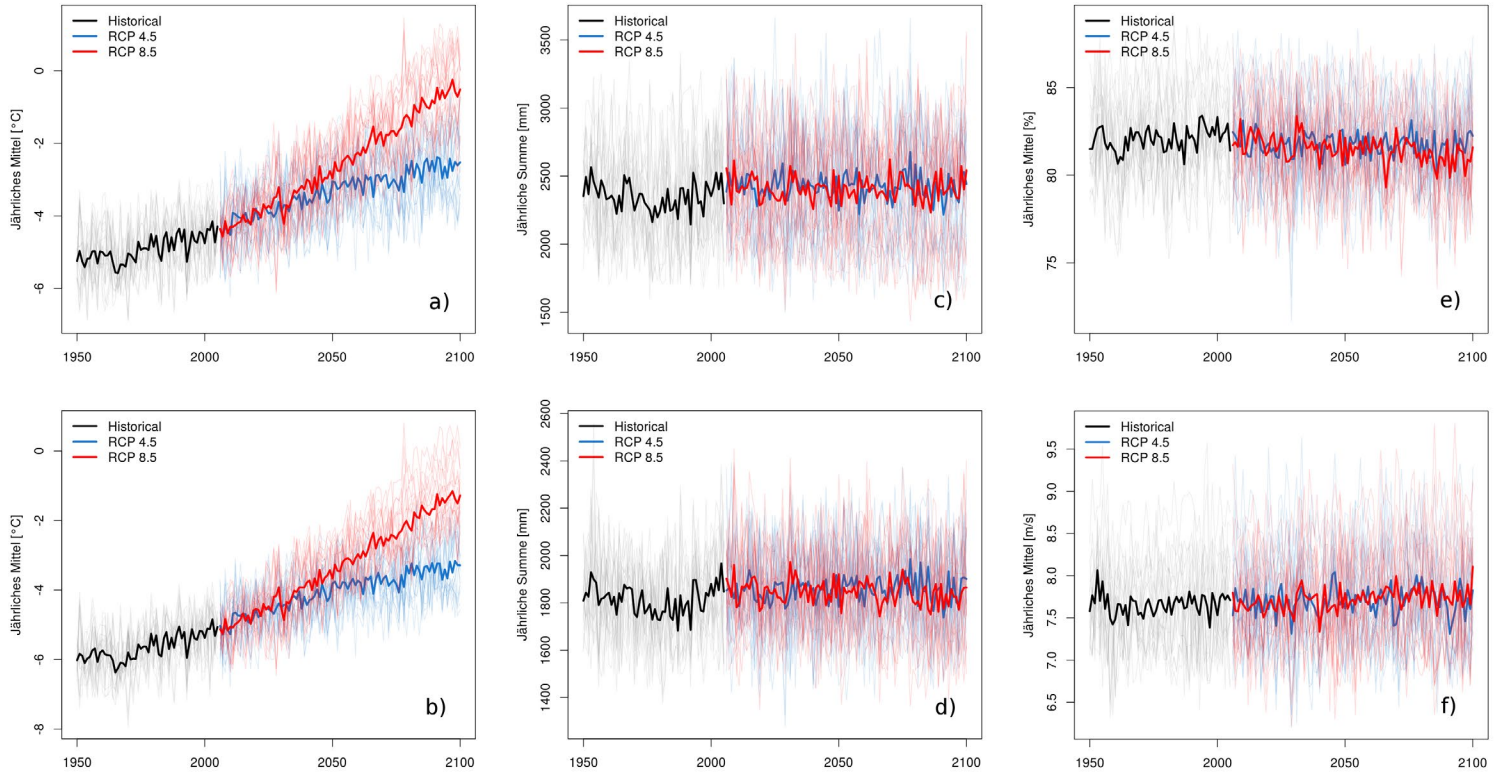


Abb. 2: Ergebnisse der Projektionsrechnung für die Station Zugspitze: a) Temperatur, c) Niederschlag, e) relative Feuchte und f) Windgeschwindigkeit sowie die Station Hoher Sonnblick: b) Temperatur und d) Niederschlag jeweils für die beiden Zukunftsszenarien RCP4.5 und RCP8.5

VAO Teilprojekt: Statistisches Downscaling

Literatur

- Mann, H. B., Whitney, R. (1947): On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other, *The annals of mathematical statistics*, S. 50-60.
- McCulloch, W. S., Pitts, W. (1943): A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *The bulletin of mathematical biophysics*, 5, S. 115-133.
- Philipp, A., Bartholy, J., Beck, C., Erpicum, M., Esteban, P., Fettweis, X., Huth, R., James, P., Jourdain, S., Kreienkamp, F., Krennert, T., Lykoudis, S., Michalides, S. C., Pianko-Kluczynska, K., Post, P., Álvarez, D. R., Schiemann, R., Spekat, A., Tymvios, F. S. (2010): COST-733CAT - a database of weather and circulation type classifications, *Physics and Chemistry of the Earth*, 35, S. 360-373.
- Schönwiese, C. D. (2006): *Praktische Methoden für Meteorologen und Geowissenschaftler*, Stuttgart.
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K. (2011): The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, 109, S. 5-31.

VAO Teilprojekt: Monitoring und Analyse der Wasserflüsse

Worum geht es?

Die Alpen sind aufgrund ihrer hohen Niederschlagsraten und Funktion als Zwischenspeicher von enormer hydrologischer Bedeutung für die Vorländer und tragen zur Sicherung der Wasserversorgung bei. Ungeachtet dessen sind der alpine Wasserhaushalt, die verschiedenen Schmelzwasserprozesse und klimabedingten Veränderungen sowie Entwicklungen der Hydrologie im Hochgebirge bisher in unzureichendem Maße erforscht. Vor diesem Hintergrund förderte das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz im Verbundprojekt „Virtuelles Alpenobservatorium“ (VAO) das dreiteilige Projekt „Klimawandel und Wasserbilanz in Hochgebirgsregionen“. Ein Teilbereich dieses Projekts umfasst das Monitoring von Wasserhaushaltsgrößen und Tracer-basierte hydrologische Untersuchungen, um Wasserflüsse sowie die Zusammensetzung der Abflusskomponenten zu quantifizieren und die Abflussprozesse zu verstehen. Dies bildet die Grundlage und Voraussetzung zur nötigen Anpassung an die klimasensiblen Änderungen in der Hydrosphäre, mit denen die Bevölkerung unter anderem im Bereich der Wirtschaft, der Versorgung mit Energie und Trinkwasser konfrontiert werden wird. Als Untersuchungsregion dient das Zugspitzplatt südlich des Zugspitzgipfels, weil die dort bestehende Infrastruktur und die Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) die kontinuierliche Datenerfassung erheblich erleichtert. Das Gebiet wird ausschließlich über den Partnach-Ursprung entwässert, was eine genauere Bilanzierung und exemplarische hydrologische Modellierung des Gebirgsraums ermöglicht, welche in einem zweiten Arbeitspaket am Geographischen Institut der LMU München durchgeführt wurde.

Zielsetzung und Methoden

Die zentralen Zielsetzungen des Forschungsteilprojekts fokussieren auf die Erfassung der für die Wasserbilanz im alpinen Raum besonders wichtigen Schmelzwasserflüsse aus Gletscher- und Schneeschmelze mittels innovativer Modellierungs- und Monitoringkonzepte sowie kontinuierlicher, zeitlich und räumlich hochaufgelöster schnee- und glazialhydrologischer Messungen im Zugspitzgebiet. Unterschiedliche Methoden und Methodenkombinationen wurden eingesetzt, um den Abfluss und die Abflusssanteile aus Oberflächenabfluss, Schneeschmelze und Grundwasser an der Partnachquelle zu erforschen, über die das gesamte Zugspitzplatt entwässert. Abflussänderungen in hochalpinen Entwässerungsnetzen sind vor allem auf die zeitliche und räumliche Variabilität von festen und flüssigen Niederschlägen sowie Veränderungen der Schneedeckenlagerung und des Glazialvolumens durch Schmelzprozesse zurückzuführen. Das nivale alpine Abflussregime der Partnach ist durch hohe schmelzwasserbedingte sommerliche Abflüsse und niedrige Abflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr (ausbleibende Niederschläge in flüssiger Form) charakterisiert.

Um die räumliche Heterogenität aller Wasserbilanzkomponenten genau zu messen, wurden die Datenreihen des bereits vorhandenen Messnetzwerks, bestehend aus drei schneehydrologischen Stationen auf dem Zugspitzplatt (siehe Abb. 1), fortgeführt und durch weitere Stationen des bayerischen Lawinenwarndienstes (LWD), des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Universität Augsburg im Gebiet ergänzt.

Eine hydrologische Messstation in der Nähe der Karstquelle „Partnach-Ursprung“ erlaubt eine kontinuierliche Registrierung des Gesamtabflusses, welcher durch

VAO Teilprojekt: Monitoring und Analyse der Wasserflüsse

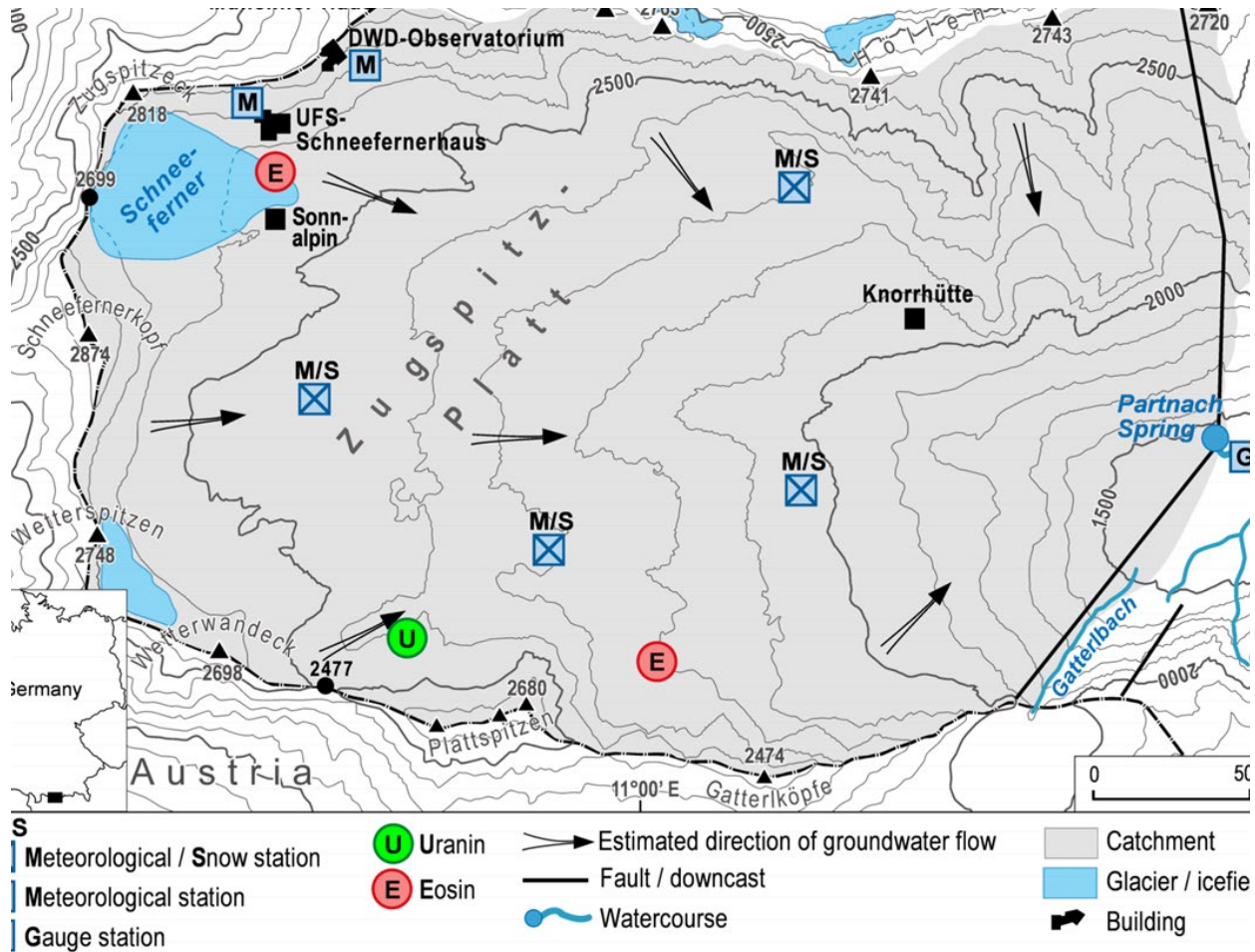


Abb. 1: Messnetzwerk am Zugspitzeplatt mit den meteorologischen Messstationen, der Pegelstation am Partnach-Ursprung, den Eingabeorten der Markierungsversuche (Uranin und Eosin) und der vermuteten Grundwasserfließrichtung (Rappl et al. 2010)

VAO Teilprojekt: Monitoring und Analyse der Wasserflüsse

eine zuverlässige Wasserstand-Abflussbeziehung mittels Salzverdünnungsmessungen berechnet wird. Physikochemische Parameter wie elektrische Leitfähigkeit (EL) und Temperatur sowie die Bestimmung der isotopischen Zusammensetzung des Gletschereises, der Abflüsse, der Niederschläge und der Schneedecken zu verschiedenen Zeitpunkten liefern den Beleg für unterschiedliche Abflussprozesse im Karstsystem und ermöglichen die Trennung von Abflusskomponenten wie den Schmelzwasserabfluss.

Durchführung und Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden umfangreiche Untersuchungen des Schneedeckenaufbaus und seiner isotopischen Zusammensetzung vorgenommen (siehe Abb. 2). Die Proben wurden durch Massenspektrometrie analysiert, um die Isotopenzusammensetzung der Schneeschicht zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu bestimmen. Die Ergebnisse der Beprobung der vergangenen Winterhalbjahre weisen eine starke Heterogenität der isotopischen Zusammensetzung der Schneedecke im räumlichen und zeitlichen Verlauf auf und zusätzlich finden isotopehydrologische Fraktionierungsprozesse während den Phasenübergängen innerhalb der Schneedecke statt. Deshalb kann die isotopische Zusammensetzung des Schneeschmelzwassers während der Schmelzperiode nur bedingt vorhergesagt werden. Nur die massenspektrometrischen Analyseergebnisse der Konzentration an stabilen Isotopen (2H und 18O) des abfließenden Schneeschmelzwassers, des flüssigen Niederschlags und des Gletschereises geben genaue Kenntnisse über den Input ins Karstsystem. Diese Inputkomponenten wurden daher parallel an verschiede-

nen Stellen auf dem Zugspitzplatt und an der Karstquelle seit dem Sommer 2014 beprobt und gemessen.

Das Quellwasser stammt allerdings zu Beginn der Schmelze nicht direkt aus Schmelzwasser, sondern hauptsächlich aus dem tiefen Karstspeicher der phreatischen Zone. Dieses mit zunehmender Verweildauer höher mineralisierte „Karstwasser“ wird im Laufe der Schneeschmelze durch das weniger mineralisierte Schmelzwasser nach und nach verdrängt und ausgetauscht, was durch die saisonale Variabilität der EL nachgewiesen werden kann. Wie Abb. 3 exemplarisch für das Abflussjahr 2016 zeigt, nimmt die



Abb. 2: Schneedeckenaufnahmen und Beprobungen im Winterhalbjahr

VAO Teilprojekt: Monitoring und Analyse der Wasserflüsse

EL des Partnachwassers während der Schneeschmelze ab, weil das schwachmineralisierte Schmelzwasser zu einer Verdünnung des Karstwassers führt. Die niedrigste EL wird meistens Anfang Juli erreicht. Danach geht der kontinuierliche Zufluss aus der Schmelze zurück und die EL im Abfluss steigt bis zum Ende des Jahres wieder an. Der Anteil des Direktabflusses aus Schmelzwasser und Niederschlägen steigt bis zum Höhepunkt der Schneeschmel-

ze auf maximal ca. 80 %.

Der Tracer-basierte Ansatz mittels der stabilen Isotope und der elektrischen Leitfähigkeit ermöglicht eine Separation der Abflusskomponenten und zusammen mit dem Monitoring der hydrometeorologischen Eingangsgrößen eine detailliertere Wasserhaushaltsbilanzierung. Die so erhobenen und aufgezeichneten Daten sind wichtige Instrumente zur Validierung von schneehydrologischen

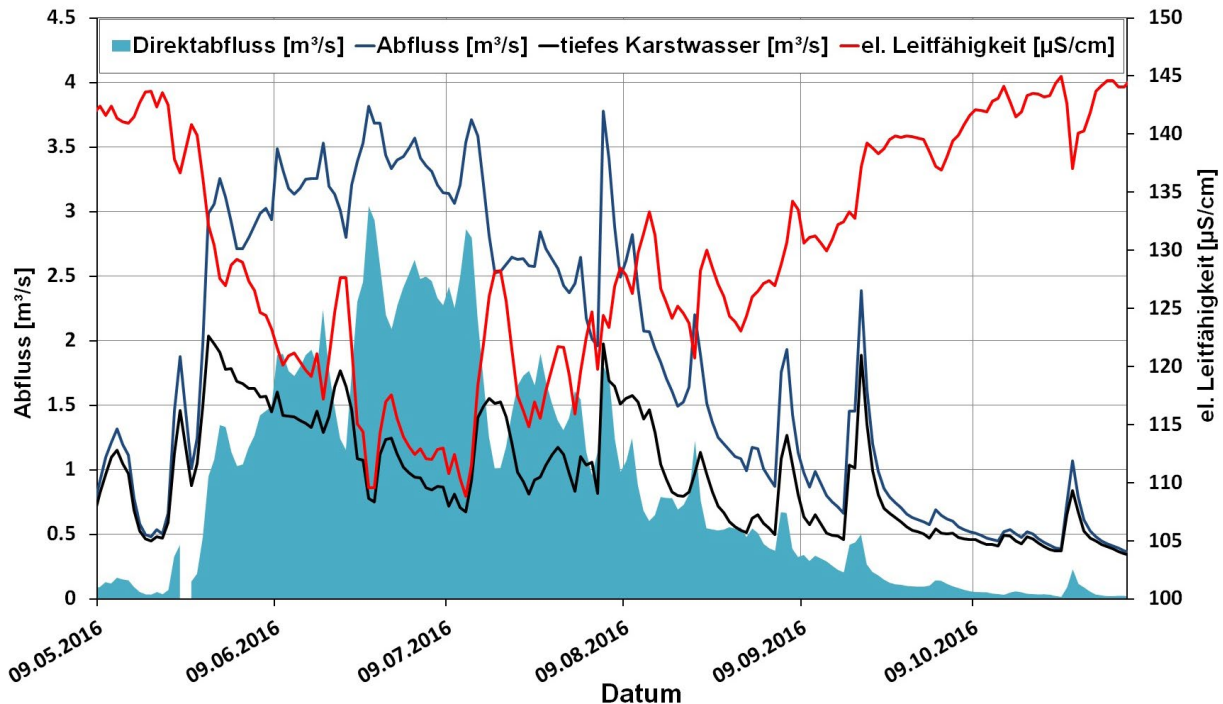


Abb. 3: Separation des tiefen Karstwassers vom Direktabfluss im hydrologischen Sommerhalbjahr 2016 mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit als geochemischer Tracer an der Partnach-Pegelstation

VAO Teilprojekt: Monitoring und Analyse der Wasserflüsse

Modellen zur Abschätzung zukünftiger Verhältnisse. Die Fortführung des hochalpinen Monitorings erlaubt mit zunehmender Datenfülle und kontinuierlicher langjähriger Historie ein genaueres Verständnis der Abflussgenese im Hochgebirge und eine genauere Abschätzung des Einflusses durch das derzeitige Klimageschehen. Es ist daher als Teil der Grundlagenforschung ein unverzichtbarer Bestandteil in der Hochgebirgshydrologie und Klimafolgeforschung.

Literatur

- Bernhardt, M., Härer, S., Jacobeit, J., Wetzel, K.-F., Schulz, K. (2014): Das Virtuelle Alpenobservatorium – Forschungsschwerpunkt alpine Hydrologie, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 58, S. 241–243.
- Rapp, A., Wetzel, K.-F., Büttner, G., Scholz, M. (2010): Tracerhydrologische Untersuchungen am Partnach-Ursprung, *Hydrologie und Wasserwirtschaft* 54, S. 220–230.
- Wetzel, K.-F., Weishaupt, S. (2017): Monitoring and tracer-based hydrological investigations in the Partnach region, *Abstracts, VAO Symposium 2017*, Bolzano.