

Ein Vergleich von räumlichen Klimadaten mit unabhängigen LWF-Messungen für die Schweiz

Markus Didion^{1*}, Matthias Haeni¹, Dirk R. Schmatz¹, Massimiliano Zappa¹, Florian Zellweger¹

¹Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf (CH)

Gegitterte Klimadaten mit einer regelmässigen räumlichen Auflösung sind eine wichtige Grundlage für Umweltstudien. Sie werden mithilfe statistischer Methoden aus Punktdaten von Messstationen erzeugt und haben insbesondere in topografisch komplexen Gebirgsregionen wie den Schweizer Alpen eine limitierte Genauigkeit. Dieser Artikel vergleicht vier für die Schweiz entwickelte gegitterte Datensätze unterschiedlicher Temperatur- und Niederschlagsvariablen mit unabhängigen Messdaten von 14 Dauerbeobachtungsflächen der Langfristigen Waldökosystemforschung (LWF) über einen Zeitraum von 20 Jahren. Die Resultate dienen als Entscheidungshilfe zur Wahl eines für eine grossflächige Anwendung zuverlässigen und homogenen Datensatzes. Die untersuchten Datensätze mit individuellen Stärken und Schwächen kommen für Anwendungen in der Schweiz infrage.

doi: 10.3188/szf.2023.0170

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail markus.didion@wsl.ch

Viele ökologische Prozesse können direkt mit der Temperatur und dem Niederschlag in Verbindung gebracht werden. Weil diese Informationen nicht flächendeckend verfügbar sind, werden in der Umweltforschung oft gegitterte Daten verwendet. Solche Daten werden in der Regel mittels statistischer Methoden wie der geostatistischen Interpolation erstellt, welche die an meteorologischen Stationen gemessenen Punktdaten flächig auf einem regelmässigen Gitter für die gesamte Schweiz darstellen.

Auf Basis des Messnetzes des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) stehen verschiedene gegitterte Datensätze zur Verfügung. Die Genauigkeit dieser Datensätze entspricht im besten Fall den zugrunde liegenden Messungen. Eine Abweichung von der Realität (Bias), die von der statistischen Methode und der räumlichen Auflösung abhängt, ist aber zu erwarten. Dies kann insbesondere in Gebirgsregionen wie der Schweiz vorkommen, wo es aufgrund der hohen topografischen Variabilität eine besondere Herausforderung ist, gegitterte Daten abzuleiten.

Dieser Artikel präsentiert vier Datensätze (Tabelle S.1, vgl. Didion et al 2023 für zusätzliche Tabellen und Abbildungen)



Abb 1 Die Meteostation am LWF-Standort Beatenberg (BEA) ist mit Sensoren für Temperatur-, Luftfeuchtigkeits-, Niederschlags-, Wind- und Strahlungsmessungen ausgestattet. Foto: Matthias Haeni

aus den Forschungsprojekten CCHydro (Zappa et al 2017), DaymetCH, Wald und Klimawandel (Meteotest, Remund et al 2016) und aus den räumlichen Klimaanalysen von MeteoSchweiz (MeteoSchweiz 2021). Er vergleicht die Übereinstimmung von Temperatur und Niederschlag (Mit-

telwerte, Minima, Maxima) sowie von daraus abgeleiteten Variablen mit unabhängigen Messdaten (Tabelle 1). Der Fokus ist auf grossflächige Anwendungen und die Abwägung der Vor- und Nachteile der jeweiligen Datensätze gerichtet. Die Untersuchungen dienen als Entscheidungshilfe

Variable	Beschreibung
<i>Tmean</i>	Tägliche Mitteltemperatur
<i>Tmax</i>	Tägliche Maximumtemperatur
<i>Tmin</i>	Tägliche Minimumtemperatur
<i>Rsum</i>	Niederschlagssumme
GDD	Anzahl der Wachstumsgradtage basierend auf Tagen mit <i>Tmean</i> über 5 °C
LSF	Tag des letzten Spätfrosts mit <i>Tmin</i> unter 0 °C vor dem 30. Juni
CDD	Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Trockentage während der Vegetationsperiode von April bis September, an denen die <i>Rsum</i> weniger als 1 mm pro Tag beträgt
R10	Anzahl der Starkniederschlagstage pro Jahr mit mehr als 10 mm Niederschlag

Tab 1 Übersicht der Variablen

zur Wahl eines passenden Datensatzes für die gewünschte Anwendung. Als Referenz kommen die unabhängigen Messdaten aus dem Programm «Langfristige Wald-ökosystemforschung» (LWF) (Schaub et al 2011, Abbildung 1, Tabelle S.2) zur Anwendung. Ausführliche Beschreibungen der Methoden und ergänzende Diskussion sowie ein erweitertes Literaturverzeichnis sind im Online-Supplement (Didion et al 2023) publiziert.

Resultate

Temperatur

Die Abweichung der gegitterten Temperaturwerte von den Messwerten an den 14 LWF-Standorten variiert nach Datensatz, Standort und Messgrösse (Abbildung 2). Für *Tmean* und *Tmin* sind die Abweichungen vom Messwert generell ausgeglichen, mit Ausnahme des Datensatzes CCHydro, für den eine Tendenz der Überschätzung auf 8 bzw. 9 der 14 Standorte für *Tmean* und *Tmin* ersichtlich ist. *Tmax* hingegen wird in fast allen Fällen unterschätzt. Die geringsten Abweichungen bestehen bei *Tmean*, wobei insbesondere die Daten von Meteotest gleich verteilt sind zwischen Über- und Unterschätzung (Tabelle S.3). Eine ausgewogene Über- und Unterschätzung kann für die gegitterten Daten von MeteoSchiweiz für *Tmin* und *Tmax* festgestellt werden, da die minimale und die maximale Abweichung in diesen Fällen sehr ähnlich, in den übrigen Datensätzen jedoch schief verteilt sind.

Bei allen Datensätzen bestehen teilweise grosse Unterschiede zwischen den Modellschätzungen für einzelne Standorte mit Über- und Unterschätzungen, die sich im Mittel kompensieren. Das zeigt der im Vergleich zu den absoluten Abweichungen geringere Fehler (Root Mean

Squared Error, RMSE). Die Ergebnisse für den standortspezifischen Bias der Tageswerte (Abbildung S.1) zeigen ein differenzierteres Bild und unterstützen die allgemeinen Beobachtungen, die auf den Mittelwerten über alle Standorte basieren. Sie zeigen auch, dass die niedrigen Werte für den mittleren Bias über alle Standorte ein Ergebnis der sich kompensierenden standortspezifischen Über- und Unterschätzungen sind. Die Breiten der Kurven in Abbildung S.1a verdeutlichen die grosse Variabilität der täglichen Biaswerte zwischen den LWF-Standorten und den gegitterten Datensätzen. Für einige Standorte ist die Verteilung der Biaswerte schief und um mehrere °C vom Idealwert 0 °C verschoben. Die Muster sind über die Zeit hinweg sehr konsistent (Abbildung S.1b).

Die Abweichungen zwischen gegitterten und gemessenen Daten sind in den Wintermonaten (Dezember bis Februar)

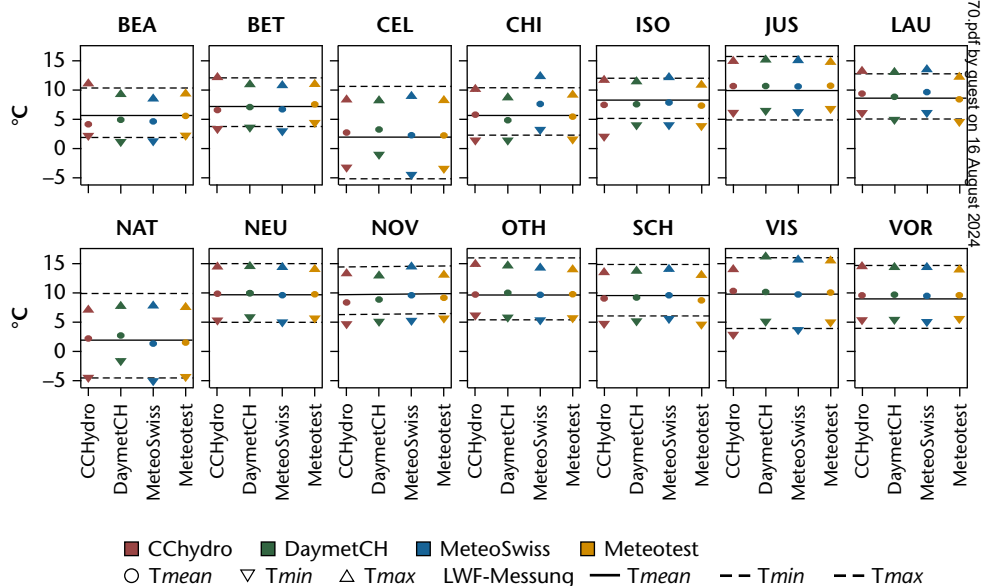


Abb 2 Langjährige Mittel der Minimum-, Mittel- und Maximumtemperatur (Symbole) für die vier gegitterten Datensätze (Farben) im Vergleich zu den Messwerten (horizontale Linien) an den 14 LWF-Standorten (vgl. Tabelle S.2).

am grössten und in den Sommermonaten (Juni bis August) am geringsten. Die statistischen Auswertungen zeigen, dass Jahreszeit und Höhe über Meeresspiegel der LWF-Standorte einen signifikanten ($p < 0.001$) Einfluss auf die Modellgenauigkeit haben (nicht dargestellt).

Niederschlag

An den meisten LWF-Standorten überschätzen die Gitterwerte die Messwerte (Abbildung 3). Die Abweichungen zwischen Gitterwerten und Messwerten der saisonalen und jährlichen Niederschlagssummen unterscheiden sich deutlich zwischen den Standorten. Die täglichen Abweichungen können zu mehreren 100 mm Unterschied in den Jahresniederschlagssummen für einzelne LWF-Standorte führen. Die Modellgenauigkeit von CCHydro und Meteotest übertrifft die von DaymetCH und MeteoSchiweiz. Es existieren zwei Gruppen von Standorten mit signifikant unterschiedlicher Modellgenauigkeit. Generell sind die Abweichungen der Modellschätzungen an den höher gelegenen Standorten (Beatenberg, Celerina, Chironico und Nationalpark) grösser als an den tiefer gelegenen. Die statistische Auswertung (ANOVA) bestätigt den signifikanten Einfluss der Höhenlage und der Jahreszeit ($p < 0.01$).

Abgeleitete Variablen

Die mittlere Abweichung der vier abgeleiteten Variablen GDD, LSF, CDD und R10

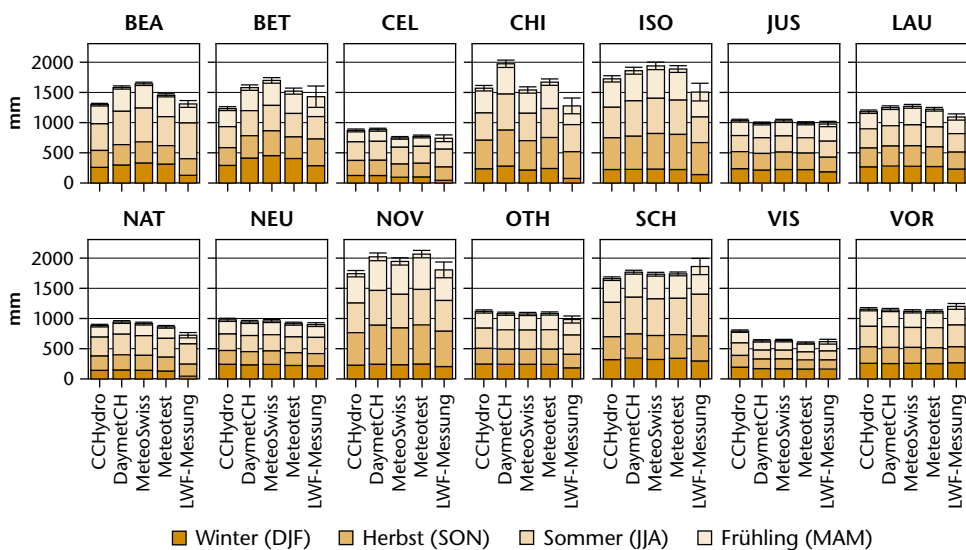


Abb 3 Langjährige Mittel der aufsummierten täglichen Niederschlagssummen nach Jahreszeit für die vier gegitterten Datensätze und die Messwerte mit doppeltem Standardfehler der Jahressumme an den 14 LWF-Standorten (vgl. Tabelle S.2).

(Tabelle 1) über die 14 LWF-Standorte ist moderat bis gut, wobei sich standort-spezifische Über- und Unterschätzungen ähnlich wie bei Temperatur und Niederschlag kompensieren. Die Variabilität zwischen den Standorten ist mit Ausnahme von CDD jedoch sehr gross (Abbildung 4) mit statistisch signifikanten Unterschieden ($p < 0.001$) bei den Abweichungen der Gitterwerte von den Messwerten für die Datensätze, die Standorte und über die Jahre hinweg. Die von der Mitteltemperatur abgeleiteten GDD und LSF sind unterschätzt: Die Anzahl GDD ist im Mittel

über alle Jahre zwischen 4% (MeteoSwiss) und 7% (Meteotest) geringer mit Maxima von mehr als 20% weniger Häufigkeit. LSF tritt bis zu drei Wochen früher auf als beobachtet (positiver Bias). R10 wird generell überschätzt (negativer Bias).

Diskussion

Die Mitteltemperatur wurde in allen vier Datensätzen insgesamt gut dargestellt. Die Variabilität zwischen den Standorten (Abbildungen 2 und 3) deutet auf Einschränkungen der gegitterten Daten in Bezug auf die lokale Genauigkeit hin

(z.B. Berndt & Haberlandt 2018, Roberts et al 2019). Die Ergebnisse zeigen auch, dass die lokale Genauigkeit nicht mit der räumlichen Auflösung eines Datensatzes zusammenhängt (Behnke et al 2016). Beispielsweise schnitt DaymetCH mit einer Auflösung von 100 m nicht besser ab als andere Datensätze mit gröberer Auflösung. Auch die Berücksichtigung von Unterschieden zwischen der Höhe eines bestimmten Rasterpixels und der standortspezifischen Höhe innerhalb dieses Rasterpixels (CCHydro) führte nicht zu einer Verbesserung der Genauigkeit. In Anbetracht der komplexen Topografie der Schweiz zeigen diese Ergebnisse, wie wichtig es ist, lokale oder regionale Merkmale wie Kaltluftseen in der räumlichen Interpolationsmethode zu berücksichtigen (Frei 2014). Diese sind entscheidend für die Bestimmung von Verbreitungsarealen von Baumarten in der Schweiz (Huber et al 2019).

Die Mitteltemperatur entsprach den unabhängigen LWF-Messdaten besser als die Minimum- und die Maximumtemperatur. Die Verteilung der Biaswerte für die Abweichung der gegitterten Daten von den Messungen weist eine grosse Variabilität in standortspezifischen Über- und Unterschätzungen auf. Dies zeigt, dass gegitterte Daten vor der Anwendung in der Forschung sorgfältig geprüft werden müssen (Lembrechts et al 2020). Die jah-

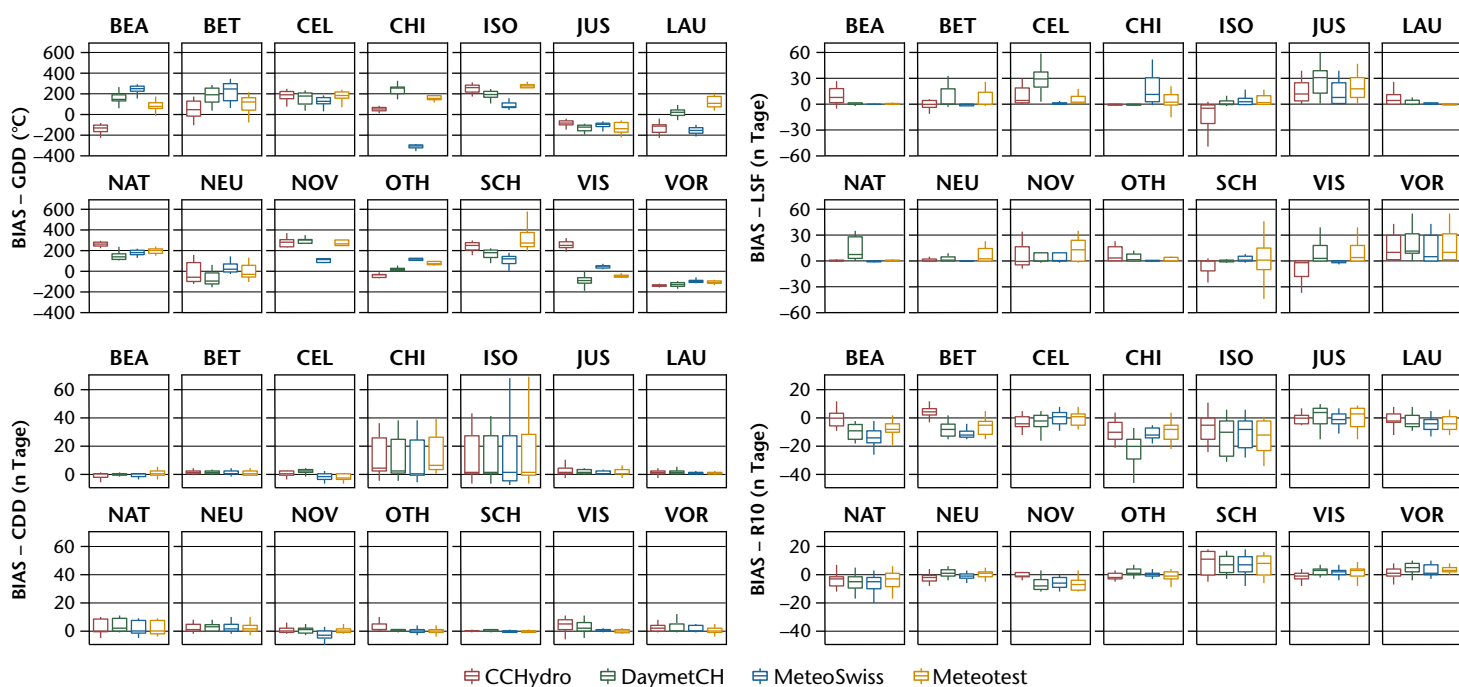


Abb 4 Boxplots des Bias der Abweichung zwischen den vier gegitterten Datensätzen und den täglichen Daten der Messwerte an den 14 LWF-Standorten (Tabelle S.2) im Zeitraum 1997-2019. Es gilt für A) Wachstumsgradtage (GDD), B) Tag des letzten Spätfrosts (LSF), C) Anzahl Tage/Jahr mit Niederschlagssumme <1 mm (CDD) und D) Anzahl Tage/Jahr mit Niederschlagssumme >10 mm (R10). Ausreisser ausserhalb des 95%-Konfidenzintervalls sind nicht gezeigt.

reszeitlichen Unterschiede im Bias mit einer besseren Übereinstimmung im Sommer als im Winter stehen im Einklang mit den Erwartungen (Begert & Frei 2018).

Wie erwartet sind die Unterschiede zwischen dem täglich gemessenen und dem vorhergesagten Niederschlag sehr gross und können sich in einem Jahr auf mehrere Hundert Millimeter summieren (Abbildung 3). Die grössten Unterschiede traten in der Wintersaison auf, was durch die Verwendung unbeheizter Instrumente und den damit verbundenen Einschränkungen bei der Messung des Schneefalls erklärt werden kann (Rasmussen et al 2012). Solche Einschränkungen können auch die allgemein limitierte Leistung der gegitterten Datensätze beim Niederschlag erklären. Die Ergebnisse stimmen mit den Erkenntnissen anderer Studien überein, die eine beschränkte Genauigkeit gegitterter Daten bei der Modellierung des Niederschlags festgestellt haben (Berndt & Haberlandt 2018, Hofstra et al 2009).

Weitere Variablen aus gegitterten Temperatur- und Niederschlagsdaten für die ökologische Forschung können die Ungenauigkeiten verstärken (Lembrechts et al 2020). Die Ergebnisse zeigen, dass die Schätzungen von GDD, LSF, CDD und R10 auf der Grundlage gegitterter Daten nur mässig mit den Messungen übereinstimmen. Dies ist ein wichtiges Ergebnis, da die Verwendung solcher Daten Auswirkungen auf viele Anwendungen hat, einschliesslich der Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Waldwachstum (Thürig & Bugmann 2020) oder die Phänologie (Rutishauser & Studer 2007).

Die Resultate deuten darauf hin, dass die Qualität einer Interpolationsmethode eine geringere räumliche Auflösung kompensieren kann. Dies ist bedeutend, da es für Gebirgsregionen schwierig vorherzusagen ist, wo die Höhe entscheidenden Einfluss auf die Temperatur hat. Das kann sich auf kleinen Skalen unterhalb der räumlichen Auflösung eines Datensatzes ändern. Diese Bedingungen limitieren auch die Möglichkeit einer Korrektur für die Unterschiede in den Meereshöhen zwischen Gitterpunkt und Station (Dobler et al 2012; Minder et al 2010).

Für die Genauigkeit gegitterter Daten ist die Tatsache bedeutsam, dass Messungen an meteorologischen Stationen in der Regel standardisiert sind und auf offe-

nem, flachem Gelände in zwei Metern Höhe über dem Boden durchgeführt werden. Das heisst, dass die Genauigkeit gegitterter Daten, die auf solchen Messungen basieren, weiter eingeschränkt sein kann für Anwendungen, bei denen diese Bedingungen nicht zutreffen.

Relevanz für die Praxis

Räumlich konsistente und flächendeckende Klimadaten werden für die ökologische Forschung immer wichtiger. Die vorliegende Studie thematisiert die Einschränkungen bei der Verwendung solcher Daten für die Forschung (Didion et al 2023). Die Bedeutung einer sorgfältigen Auswahl räumlicher Daten für eine bestimmte Anwendung ist insbesondere in Gebirgsregionen gross, wo die lokalen Bedingungen zu einer erheblichen Variabilität führen können. Die Auswertungen zeigen, dass Extreme wie Temperaturmaxima weniger genau reproduziert werden können als Mittelwerte. Angesichts der erwarteten Zunahme extremer Temperatur- oder Niederschlagsereignisse ist dies eine wichtige Erkenntnis.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter Berücksichtigung der Limitierungen in der Genauigkeit auf lokaler Ebene alle vier gegitterten Datensätze verwendbar sind. Dennoch lassen sich für die einzelnen Datensätze bestimmte Stärken hervorheben: Die gegitterten Temperaturdaten von MeteSchweiz weisen die geringste Abweichung von den LWF-Messdaten und die geringste Verzerrung auf. Niederschlagsdaten von CCHydro weisen die beste Übereinstimmung mit den Messdaten auf. Neben den untersuchten Variablen Temperatur und Niederschlag stehen teilweise Daten zu weiteren Variablen zur Verfügung (Tabelle S.1), was für Anwendungen für eine Vielzahl von Flächen mit hohen Ansprüchen an die Homogenität ein wichtiger Faktor sein kann. CCHydro, MeteSchweiz und Meteotest bieten darüber hinaus gegitterte Daten basierend auf Klimaszenarien an. Dabei sollte auch für die weiteren Variablen die Methode und deren Qualität geprüft werden. Bei allen Datensätzen muss berücksichtigt werden, dass sie für Offenlandbedingungen repräsentativ sind. Zudem sind die Einschränkungen beim Vergleich der Niederschlagsdaten zu beachten, die sich aus den verwendeten unbeheizten Sensoren ergeben. ■

Dank

An Barbara Allgaier Leuch und Dirk N. Karger (beide WSL) für die kritische Durchsicht des Manuskripts sowie an zwei anonyme Gutachter für Kommentare zu einem früheren Entwurf.

Literatur

Komplettes Literaturverzeichnis in:

- DIDION M, HAENI M, SCHMATZ DR, ZAPPA M, ZELLWEGER F (2023)** Ein Vergleich von räumlichen Klimadaten mit unabhängigen LWF-Messungen für die Schweiz – ergänzende Daten, Methoden, Diskussion und Literatur. 12 p. doi: 10.5281/zenodo.7849438
- METEOSCHWEIZ (BUNDESAMT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMATOLOGIE (2021)** Räumliche Klimaanalysen. www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/raeumliche-klimaanalysen.html (18.04.2023).
- REMUND J, RIHM B, HUGUENIN-LANDL B (2016)** Klimadaten für die Waldmodellierung für das 20. und 21. Jahrhundert. Bern: Meteotest. 39 p. ISBN: 978-3-258-07996-7.
- SCHAUB M, DOBBERTIN M, KRÄUCHI N, DOBBERTIN MK (2011)** Preface—long-term ecosystem research: understanding the present to shape the future. *Environ Monitoring and Assessment* 174 (1): 1–2. doi: 10.1007/s10661-010-1756-1.
- ZAPPA M, LIECHTI K, DELLER M, BARBEN M (2017)** Wasserhaushalt der Schweiz 2.0. Eine validierte, modellgestützte Methode für die Bilanzierung der Wasserressourcen der Schweiz. *Wasser, Energie, Luft* 109 (3): 203–12.

Une comparaison de données climatiques spatiales avec des mesures LWF indépendantes pour la Suisse

Les données climatiques maillées avec une résolution spatiale régulière sont une base importante pour les études environnementales. Elles sont générées à l'aide de méthodes statistiques à partir de données ponctuelles de stations de mesure et ont une précision limitée, en particulier dans les régions montagneuses à la topographie complexe comme les Alpes suisses. Cet article compare quatre ensembles de données maillées de différentes variables de température et de précipitations développées pour la Suisse avec des données de mesure indépendantes de 14 placettes d'observation permanentes de la recherche à long terme sur les écosystèmes forestiers (LWF) sur une période de 20 ans. Les résultats servent d'aide à la décision pour le choix d'un jeu de données fiable et homogène pour une application à grande échelle. Les jeux de données examinés, qui comportent chacun des points forts et des points faibles, entrent en ligne de compte pour des utilisations en Suisse.