

FLIESSGEWÄSSER- TEMPERATUR

ZWEI MODELLANSÄTZE FÜR ZUKÜNFTIGE PROGNOSEN

Seit Längerem steigt die globale Durchschnittstemperatur der Atmosphäre und führt damit auch in der Schweiz zu einem Anstieg der Gewässertemperaturen. Verlässliche längerfristige Prognosen hierfür sind in der Schweiz auf Bundesebene zum jetzigen Zeitpunkt nicht erstellbar. Nun wurden an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) zwei Modellvarianten entwickelt, um längerfristig Antworten auf Fragestellungen bezüglich Temperaturentwicklung von Fließgewässern in der Schweiz zu ermöglichen. Parallel dazu wurde ein modulares deterministisches Modell auf der Basis des räumlich verteilten Schneedeckenmodells Alpine3D der WSL/SLF erstellt.

Thilo Herold; Bundesamt für Umwelt BAFU; Aurélien Gallice; Hendrik Huwald, EPFL; Adrian Jakob, Bundesamt für Umwelt BAFU*

RÉSUMÉ

TEMPERATURE DES COURS D'EAUX EN SUISSE – DEUX APPROCHES MODÈLES POUR DES PRONOSTICS FUTURS

Le changement climatique est un sujet de plus en plus pertinent et débattu. Depuis quelque temps, la température moyenne globale de l'atmosphère augmente et entraîne en Suisse la hausse des températures de l'eau. À l'avenir, il doit être pris en compte que la température continuera d'augmenter et la pression pour l'utilisation thermique des réserves d'eau augmentera.

Compte tenu des changements climatiques, des prévisions ou des déclarations fiables à long terme pour les potentiels d'exploitation et les risques pour les eaux de surface ne sont pas possibles pour le moment au niveau fédéral. Une prévision opérationnelle à court terme des températures de l'eau en Suisse n'est pas possible actuellement non-plus, car les modèles adaptées pour la Suisse et les bases de données correspondantes sont en partie manquants. Dans une première approche, l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a développé deux modèles pour permettre des réponses à long terme aux questions concernant l'évolution de la température des cours d'eau en Suisse.

Un modèle statistique a été développé d'un côté, qui combine des approches statistiques et analytiques, et qui donne le développement des températures, même sans résultats d'informations hydrographiques le long d'un cours d'eau. Il permet le calcul des

WASSERTemperatur IN OBERFLÄCHENGewässERN

Seit Längerem ist der anthropogen beeinflusste Klimawandel [1] ein zunehmend diskutiertes Thema. Seit Jahrzehnten steigt die globale Durchschnittstemperatur der Atmosphäre [2, 3] und führt damit auch zu einer verstärkten thermischen Veränderung des natürlichen Zustandes der Oberflächengewässer. In der Schweiz ist während der letzten Jahrzehnte eine Zunahme der durchschnittlichen Wassertemperatur der Oberflächengewässer zu beobachten (*Fig. 1*) [4, 5, 6].

Aufgrund der erwarteten Klimaänderung muss zukünftig damit gerechnet werden, dass die Lufttemperatur weiter ansteigt und als Konsequenz auch die Wassertemperatur der Schweizer Fließgewässer und Seen.

In der Schweiz wurden bisher in mehreren Forschungsprojekten die Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft untersucht. So wurden im Projekt *CCHydro* [7] sowie in den Projekten zur nachhaltigen Wassernutzung des *Nationalen Forschungsprogramms NFP 61* [8] oder *Clim-arbres* [9] die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz thematisiert. Im Bericht «Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung» [10] stehen die Klimaveränderung und

* Kontakt: thilo.herold@bafu.admin.ch

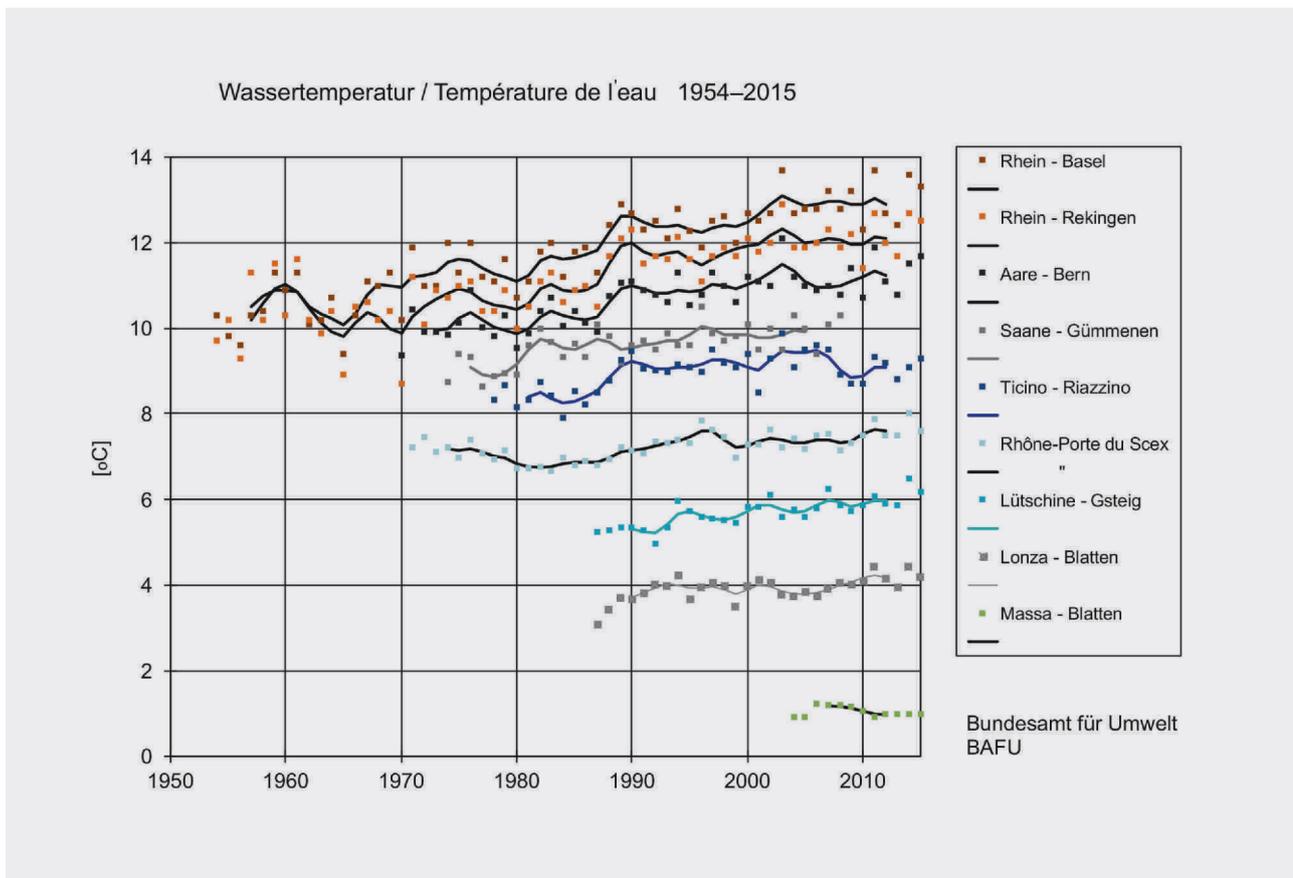


Fig. 1 Messreihen während der letzten Jahrzehnte zeigen einen allgemein ansteigenden Trend der Wassertemperatur in Oberflächengewässern. So ist die durchschnittliche Wassertemperatur seit den 1950er-Jahren z. B. in Basel um mehr als 2 °C angestiegen. Einzig Gewässer unterhalb der Gletscher weisen eine gleichbleibende oder abnehmende Tendenz auf (siehe Massa - Blatten im Diagramm).

Série de mesures au cours des dernières décennies montrent une tendance générale à la hausse de la température de l'eau dans les eaux de surface. Donc, la température moyenne de l'eau par ex. à Bâle a augmenté de plus de 2 °C depuis les années 1950. Seules les eaux au-dessous du glacier ont une tendance stable ou à la baisse (voir Massa - Blatten dans le diagramme).

die daraus resultierenden Abflussverhältnisse und deren Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung im Fokus.

In Deutschland wurde in den letzten Jahren im Rahmen des Projektes *KLIWA* [11] eine Literaturstudie durchgeführt, die das Wissen über Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Gewässerökologie zusammenstellt. Vor allem von der IKSR (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins) wurden Untersuchungen hinsichtlich Prognosen der Wassertemperatur an der internationalen Flussgebietseinheit (IFGE) Rhein mithilfe von Modellierungen durchgeführt [12].

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Kenntnisse der quantitativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperatur der Wasserkörper der Oberflächengewässer in der Schweiz, u. a. auch in Zusammenhang mit der Abflussreduktion, noch ungenügend sind.

WISSENSLÜCKEN UND BEDÜRFNISSE

Hinsichtlich der Beanspruchung der Wassertemperatur der Oberflächengewässer in der Schweiz stellt der Klimawandel eine grosse Herausforderung dar – speziell in den alpinen Gebieten. Dort dürfte der Klimawandel für den Wasserhaushalt zukünftig dominant sein, während in den dicht besiedelten Lebens- und Wirtschaftsräumen die sozioökonomische Entwicklung eher prägend wirkt. Das für ökonomische Bedürfnisse zur

Verfügung stehende Wärmepotenzial der Oberflächengewässer ist naturgemäss beschränkt. Die kombinierten Auswirkungen von thermischer Nutzung und Klimawandel auf die Ökologie der Gewässer sind derzeit noch wenig klar. Zukünftige wie auch aktuelle Abklärungen hinsichtlich der Veränderung bzw. Nutzung des thermischen Potenzials der Oberflächengewässer benötigen daher numerisch modellierte Unterstützung. Modellierungen mithilfe der verfügbaren Daten bilden die Basis für Prognosen oder Abschätzungen z. B. hinsichtlich thermischer Belastbarkeit der Gewässernutzung, Einfluss der Klimaänderung oder negative Konsequenzen für die Fischpopulationen.

Verlässliche, längerfristige Prognosen oder Aussagen zum Nutzungs- bzw. Entwicklungspotenzial der Oberflächengewässer können in der Schweiz auf Bundesebene zum jetzigen Zeitpunkt nicht erstellt werden. Eine operationelle Vorhersage der Wassertemperaturen ist aktuell ebenfalls nicht möglich, da für die Schweiz adäquat angepasste Modelle nicht verfügbar sind. Es fehlen heute weitgehend quantitative Grundlagen, um die Auswirkungen der Wärmeflüsse im Bereich Gewässertemperatur fundiert zu beurteilen.

MODELLIERUNGEN VON WASSERTEMPERATUREN

Bei Wassertemperaturmodellen wird generell zwischen zwei Varianten unterschieden: stochastische und deterministische [13].

Stochastische Modelle

Stochastische Modelle prognostizieren die Wassertemperatur mithilfe statistischer Berechnungen (z. B. multilineare Regression oder neuronale Netzwerke) in Abhängigkeit zu klimatischen oder physiographischen Inputvariablen wie z. B. Lufttemperatur, Abfluss, Höhenlage oder Gewässerbreite [14, 15]. Sie benötigen wenige Eingabedaten, die meist regional bis landesweit verfügbar sind. Beispiele hierfür sind die Modelle von *Moore et al.* [16] *Isaak et al.* [17], *Hill et al.* [18] sowie *DeWeber u. Wagner* [19]. Solche Modelle sind für räumliche Interpolationen gut geeignet, da sie relativ leicht zu verwenden und auf grossflächige Gebiete anwendbar sind. Mit diesen Modellen können Prognosen mit einer Zeitauflösung von bis zu einem Tag realisiert werden. Da in den Modellen in der Regel keine physikalisch basierten Gleichungen zur Anwendung kommen, besteht hier eine klare Einschränkung hinsichtlich der Gültigkeit von Klimaprognosen [20]. Ausnahmen bilden die kürzlich entwickelten hybriden Ansätze statistischer Modelle [14, 20, 21].

Deterministische Modelle

Andererseits werden prozessorientierte, deterministische Modelle hinsichtlich Langzeitvorhersagen als zuverlässiger betrachtet, auch wenn ihre Genauigkeit nicht unbedingt besser ist [22] als die der statistischen Modelle. Mithilfe deterministischer Modelle werden feinere räumliche und zeitliche Auflösungen erreicht. Sie berechnen die Energiebilanz eines Flusses basierend auf der Energiegleichung, die numerisch gelöst wird. Die Energieflüsse des Fliessgewässers werden so physikalisch anhand detaillierter meteorologischer und topografischer Daten berechnet, und soweit vorhanden, mithilfe hydrologischer Daten kalibriert. Da die deterministischen Modelle rechenaufwendig sind, können sie oft nur flächenmässig begrenzt angewendet werden. Dank ihrer physikalischen Grundlage können sie verwendet werden, um langfristige Prognosen im Rahmen von Klimaänderung zu liefern oder den Effekt einer Nutzungsänderung auf die Wassertemperatur zu studieren. Verschiedene in der Schweiz verwendete deterministische Modelle sind z. B. *LARSIM* [23, 24], *LARSIM-WT* [25], *WaSIM* [26, 27], *AQUASIM* [28, 29], *PREVAH* [30], *Alpin3D* [31] oder *StreamFlow* [32].

Ziel der hier vorgestellten Arbeiten der *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL) war es, numerische Modelle (statistische und deterministische) bereitzustellen, die Aussagen über die Temperaturentwicklung der Oberflächengewässer betreffend klimatische und sozioökonomische Szenarien ermöglichen. Die Prozessmodellierungen sollen Informationen zu folgenden Zielrichtungen liefern:

- Wo laufen die relevanten Prozesse ab?
- Wo erfolgt die Abgrenzung von Prozessräumen?
- Welche quantitativen Aussagen zu Prozesseinwirkungen und -auswirkungen sind möglich?

Dazu wurden im Vorfeld die verschiedenen und gebräuchlichen Modelle von der EPFL evaluiert und gemäss den Bedürfnissen der Arbeit verglichen.

ERGEBNISSE DER BISHERIGEN ARBEITEN

STATISTISCHES MODELL

Die meisten statistischen Wassertemperaturmodelle, die bisher entwickelt wurden, basieren auf klassischen statistischen Me-

thoden. Diese Methoden, wie z. B. Regressionen, sind allgemein generisch, d. h. sie wurden nicht spezifisch für Wassertemperaturprognosen entwickelt und können daher genauso gut für jede andere Fragestellung angewendet werden. Solche Modelle liefern ausschliesslich Ergebnisse, die auf der verwendeten mathematischen (statistischen) Funktion basieren, d. h. auf der zugrunde liegenden Relation von Input- und Output-Variablen, ohne Berücksichtigung von kausalen Zusammenhängen. Ein gegebener Inputwert liefert also lediglich einen zugehörigen Output, den man aufgrund der Regressionsgleichung eigentlich bereits kennt. Im Gegensatz dazu verwendet das physikalisch basierte, statistische Modell von *Gallice et al.* [14] einen Ansatz, der sich von der Energiebilanzgleichung herleitet, die analytisch gelöst wird unter Berücksichtigung räumlich verteilter Inputvariablen, z. B. Lufttemperatur entlang des betrachteten Flussabschnitts. Das Modell wurde so entwickelt, dass ausschliesslich Inputvariablen verwendet werden, die von entsprechenden Messnetzen für die ganze Schweiz verfügbar sind. Zum Beispiel benötigt das Modell – neben anderen Inputvariablen – für die Ermittlung der durchschnittlichen Wochen- oder Monatswassertemperatur die mittlere Wochen- oder Monatslufttemperatur über das betrachtete Einzugsgebiet (Tagesmittel können mit diesem Modell nicht berechnet werden), allerdings eben nicht für eine simple Regression. Diese Informationen können landesweit hergeleitet werden, indem die Messdaten von mindestens drei naheliegenden *MeteoSchweiz*-Stationen interpoliert werden. Aufgrund der Komplexität der Energiebilanzgleichung enthält die analytische Lösung auch Variablen, deren Wert nicht direkt evaluiert werden kann (keine direkten Messungen vorhanden) und unter Einbezug anderer vorhandener Inputvariablen anhand klassischer, statistischer Methoden abgeschätzt werden muss. Das resultierende Modell kann daher von seiner Struktur her als physikalisch basiert bezeichnet werden, verwendet aber dennoch statistische Elemente. Dank seiner physikalischen Grundlage liefert das Modell Abschätzungen der Wassertemperatur, deren Informationsgehalt über die zu erwartenden Regressionen verwendeter Inputdaten hinausgehen und somit die oben erwähnten Nachteile rein statistischer Modelle umgehen. Mehr Details über das Modell, inkl. der Herleitung des Modells und die Evaluation seiner Genauigkeit, werden im Artikel von *Gallice et al.* [14] beschrieben.

Modellnutzung

Da das Modell flächendeckend vorhandene Daten verwendet, können auch dann Berechnungen zur Wassertemperatur in Fliessgewässern durchgeführt werden, wenn keine Abflussmen- und Wassertemperaturmessungen vorliegen. Letztere werden nicht zwingend als Modelleingabeparameter benötigt. Falls vorhanden, können diese Variablen jedoch zusätzlich verwendet werden. Das Modell wird in diesem Fall als eine Art räumliches Interpolationswerkzeug verwendet, um die Wassertemperatur z. B. zwischen zwei (Temperatur-)Messstationen herzuleiten. Hilfreich ist diese Funktionalität zur Identifikation von Flussabschnitten, bei denen die Wassertemperatur (Monats- oder Wochenmittel) ökologisch kritische Werte (z. B. für Fische) erreichen könnte. Es wäre auch möglich, maximale oder minimale Werte berechnen zu lassen. In diesem Fall würden entsprechende maximale oder minimale Werte zur Kalibrierung benötigt. Als Folge würde sich dann die Jahresganglinie entsprechend verschieben. Als limitierender Faktor wirkt sich bei diesem Mo-

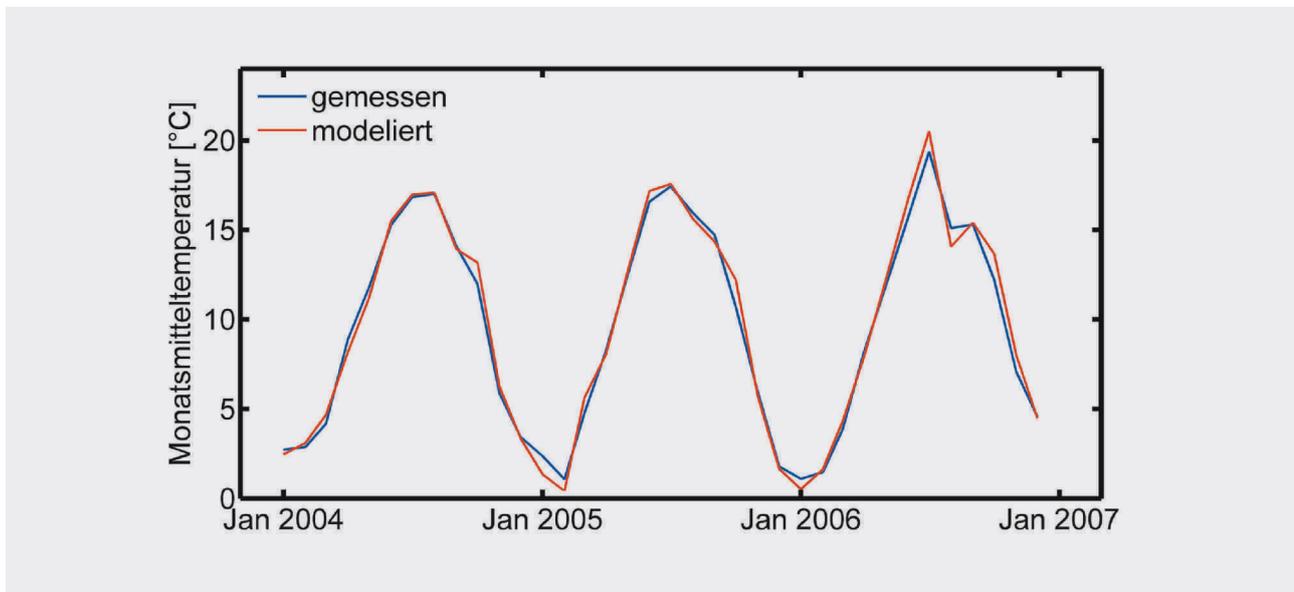


Fig. 2 Vergleich der gemessenen Monatsmitteltemperatur im Fluss La Menthue neben Yvonand (BAFU Messstation 2369) mit den statistisch hergeleiteten Daten des Modells der EPFL [14]. Die Simulationsperiode verläuft über drei Jahre.

Comparison of the temperature moyenne mensuelle mesurée dans la rivière La Menthue près de Yvonand (station OFEU en 2369) avec les données statistiquement dérivées de modèle de l'EPFL [14]. La période de simulation fonctionne sur trois ans.

dell die geringe Zeitaufösung von Wochenmittelwerten aus. Ein Berechnungsbeispiel des physikalisch-statistischen Modells ist in *Figur 2* dargestellt.

DETERMINISTISCHES MODELL – STRUKTUR UND ABLAUF

In dem von der EPFL modular aufgebauten Gesamtmodell wurden existierende und neu entwickelte Module direkt miteinander gekoppelt, sodass jederzeit eine modulare Erweiterung möglich ist. Die Basis bildet das *Alpine3D*-Modell [31], das am WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos entwickelt wurde. *Alpine3D* hat den Vorteil eines integrierten physikalisch basierten Schneemodells, was eine realistische Simulation hochalpiner Gebiete erlaubt. Im Prozessablauf der Berechnung wird zuerst eine *Alpine3D*-Simulation ausgeführt, deren Datenoutput über den Verteiler *TauDEM* [33] dann direkt von *StreamFlow* zur weiteren Teilgebietsberechnung übernommen wird. Vertiefte Informationen zu *StreamFlow*, wie zum Beispiel alle zugrunde liegenden Gleichungen, die im Modell numerisch verwendet werden, sind im Artikel von *Gallice et al.* [32] zu finden. Die Kombination *Alpine3D/StreamFlow* ist in einem hohen Mass skalierbar. Es kann auf lokaler, regionaler, aber auch überregionaler Skalierungsebene eingesetzt werden. Dies ist hinsichtlich der sich unterschiedlich auswirkenden Klimaveränderung wichtig, da sich die globalen Veränderungen auf lokaler oder regionaler Ebene unterschiedlich auswirken können [1].

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte innerhalb des Gesamtmodells beschrieben (*Fig. 3*).

1. Modellierungsschritt

Alpine3D gliedert das Berechnungsgebiet in ein regelmässiges Gitter und behandelt jede Bodensäule getrennt (*Fig. 3, Punkt 1*). Das Modell bietet den Vorteil, dass es den vertikalen Wasser- und Wärmetransport nicht nur in der Schneedecke berechnet, sondern auch im Boden, was für die spätere Berechnung der Bodenwassertemperatur entscheidend ist. Ausserdem simuliert

Alpine3D auch die Schneeschmelze sehr akkurat, was einen weiteren entscheidenden Vorteil für die hydrologische Modellierung hochalpiner Einzugsgebiete darstellt.

2. Modellierungsschritt

Nachdem die *Alpine3D*-Simulation durchgeführt ist und bevor *StreamFlow* angewendet werden kann, wird das Einzugsgebiet in einzelne hydrologische Teilgebiete aufgeteilt (*Fig. 3, Punkt 2*). Dafür wird das quelloffene Standardprogramm *TauDEM* verwendet, das die Teilgebiete und das Gewässernetz gemäss des verwendeten digitalen Höhenlinienmodells automatisch abbildet.

3. Modellierungsschritt

In *StreamFlow* wird jedes von *TauDEM* ermittelte Teilgebiet als ein lineares Eimermodell simuliert, d.h. jedes Teilgebiet wird als ein Eimer betrachtet, dessen Ablauf proportional zum Wasserpegel im Eimer ist. Jedes Eimermodell bekommt als Inputparameter die kumulierte Abflussmenge, die in *Alpine3D* an der Basis aller zum Teilgebiet gehörenden Bodensäulen kalkuliert wurden (*Fig. 3, Punkt 3*).

4. Modellierungsschritt

Anhand der Eimermodelle werden dann die Abflussmenge und die Wassertemperatur der jeweiligen Teilgebietsabflüsse berechnet (*Fig. 3, Punkt 4*). Diese Grössen werden danach benutzt, um die Wasserabflussmenge und -temperatur im Gewässernetz selbst zu berechnen (*Fig. 3, Punkt 5*). Dabei wird die Energiehaushaltsgleichung im Gewässernetz von *StreamFlow* numerisch gelöst unter Einbezug des Wärmeaustauschs mit der Atmosphäre und dem Flussbett einschliesslich kurz- und langwelliger Strahlung, eines sensiblen (turbulenter konvektiver Wärmefluss zwischen Oberfläche und Atmosphäre) und latenten Wärmeaustauschs (gekoppelt an Phasenübergänge wie Verdunstung und Kondensation) und der Reibung am Flussbett.

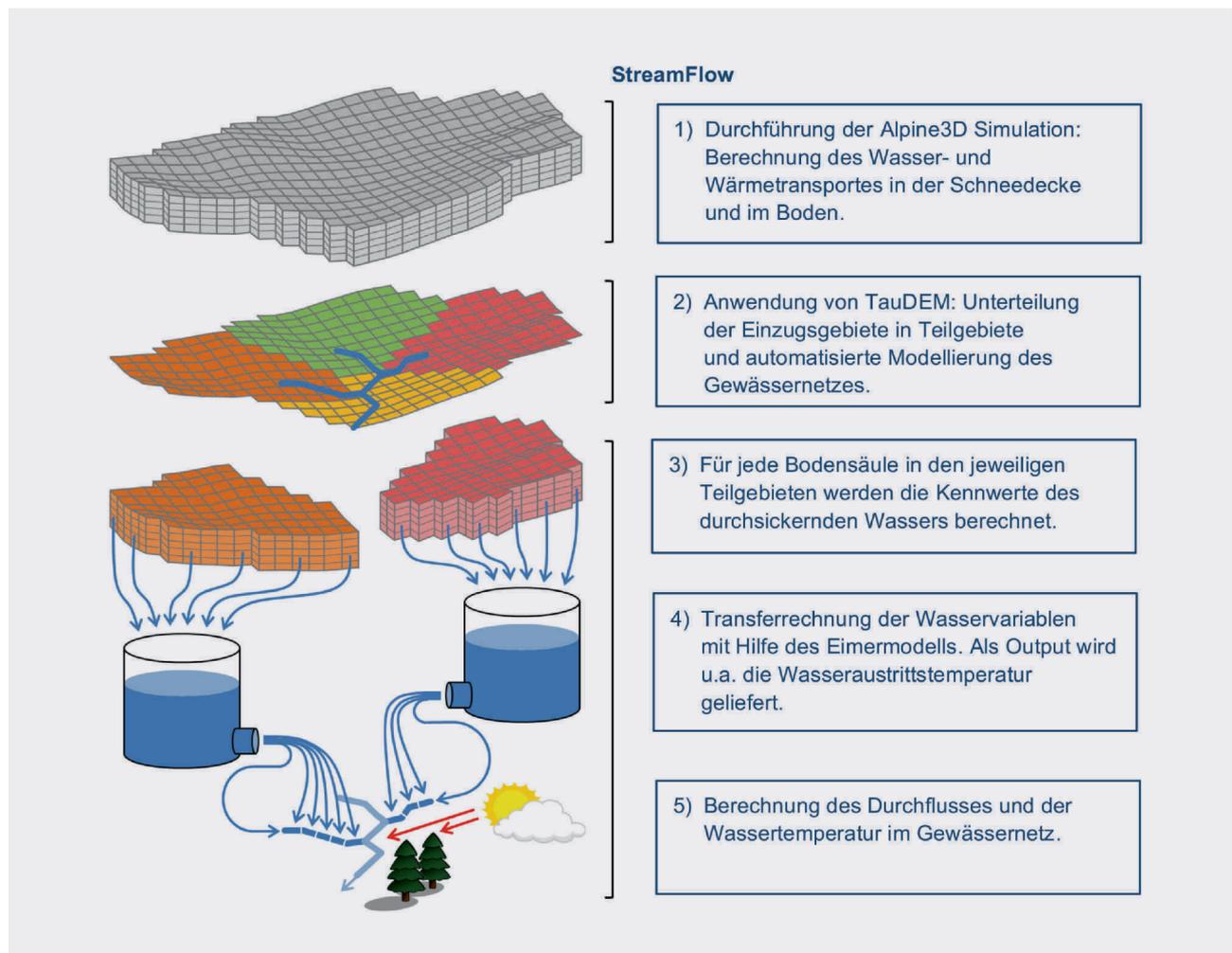


Fig. 3 Grafische Darstellung des Arbeitsablaufs von StreamFlow (übernommen aus [32])

Schéma du processus de travail de StreamFlow (adopté de [32])

5. Visualisierung der Modellierungsergebnisse

Aktuell bietet *StreamFlow* die Möglichkeit, das stündliche Mittel der Abflussmenge und der Wassertemperatur an jedem Punkt des modellierten Gewässernetzes zu berechnen.

Figur 4 zeigt als Beispiel die von *StreamFlow* berechnete Temperaturverteilung über das Dismagebiet bei Davos GR für den 2. Oktober 2012. Solche Abbildungen können auch für die modellierte Abflussmenge und den Pegel erzeugt werden. Die feine Zeitauflösung des Modells erlaubt, den Tagesgang der Wassertemperatur zu simulieren.

Im Gegenzug erfordert das Modell qualitativ gute und zeitlich hoch aufgelöste Inputdaten – eigentlich die gleichen Daten, die auch von *Alpine3D* benötigt werden. Daher sollten sich idealerweise mehrere Wetterstationen in der Umgebung des Modellierungsgebietes befinden.

Für die Modellierung der Daten in *Figur 5* wurden die Temperaturen der Zuflüsse (Bäche und/oder Grundwasser) und der Quelle (Beginn des Gewässerlaufes) nicht berücksichtigt, da diesbezügliche Informationen im untersuchten Gebiet nicht vorlagen. In solchen Fällen werden diese Werte in *StreamFlow* abgeschätzt unter Berücksichtigung der in *Alpine3D* ermittelten Bodentemperatur und führen daher auch zu schwächer korrelierenden Ergebnissen. Liegen jedoch Messwerte für Quell- und Zuflusstemperatur vor, dann führt dies auch zu

einer verbesserten Korrelation zwischen Mess- und Modellwerten.

AUSBLICK

Herausforderungen, sei es bezüglich der klimatischen oder sozioökonomischen Entwicklung, bestehen bereits heute hinsichtlich der thermischen Ressourcenverfügbarkeit der Schweizer Oberflächengewässer. Es ist damit zu rechnen, dass sich diese zukünftig noch weiter akzentuieren. Um ein ausgeglichenes Ressourcenmanagement zu erstellen, ist es wichtig, die Ausgangssituationen zu analysieren, Wirkungen abzuschätzen, Handlungs- und Umsetzungsschritte zu formulieren und diese auch zu bewerten. Dafür werden in erster Linie zuverlässige Datengrundlagen zu den Oberflächengewässertemperaturen benötigt. Auf diesem Fundament können mithilfe numerischer Modellierung von Mensch-Umwelt-Systemen aussagekräftige Empfehlungen und Gesichtspunkte dargelegt werden.

DATENGRUNDLAGEN

Schon seit Jahrzehnten werden in der Schweiz wichtige Informationen zu den Temperaturen der Flüsse erhoben. Dank dieser wertvollen Datengrundlage sind Aussagen zum generellen Zustand dieser Bereiche in der Schweiz möglich. Weitere zielgerichtete Anpassungsempfehlungen werden aktuell in ei-

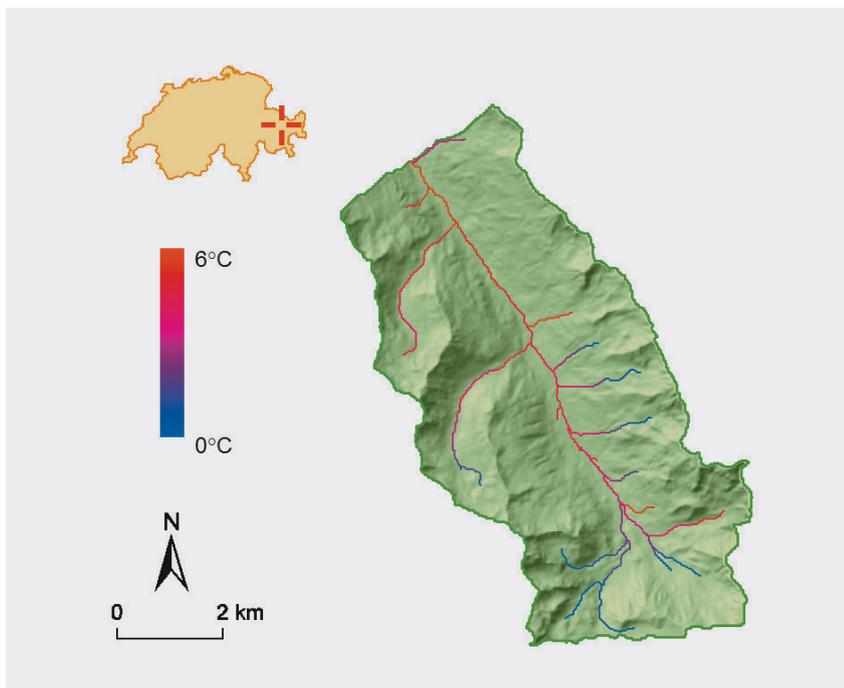


Fig. 4 Die von StreamFlow berechnete Wassertemperatur im Dischmabach, am 2. Oktober 2012 um 15 Uhr

Calcul par StreamFlow, des températures de l'eau dans le torrent Dischma, le 2 Octobre 2012, à 15 heures

nem neuen Messnetzkonzept erarbeitet. Dabei wird es wichtig sein, zuverlässige und landesweite Informationen zur Wassertemperatur kleinerer Fließgewässer, aber auch der Reservoirs (Seen, Stauseen) zu erhalten. Ebenso besteht hinsichtlich der Quelltemperatur (Ursprung der Flüsse) ein grosser Abklärungsbedarf. Entlang der Gewässer ist es zudem wichtig, Informationen zur Beschattungssituation aber auch über lokal signifikante Grundwasserinfiltrationen zu erhalten.

MODELLIERUNGEN

Die beiden an der EPFL entwickelten Modelle haben in verschiedenen Bereichen aussichtsreiche Nutzungsmöglichkeiten.

Semi-statistisches/physikalisches Modell
Das semi-statistisch/physikalisch basierte Modell (Energiebilanz) geht über die Aussagemöglichkeiten klassischer Modelle hinaus, indem es zusätzliche Informationen bezüglich des relativen Anteils verschiedener Temperaturkomponenten, wie z.B. Quelle, Seitenzufluss

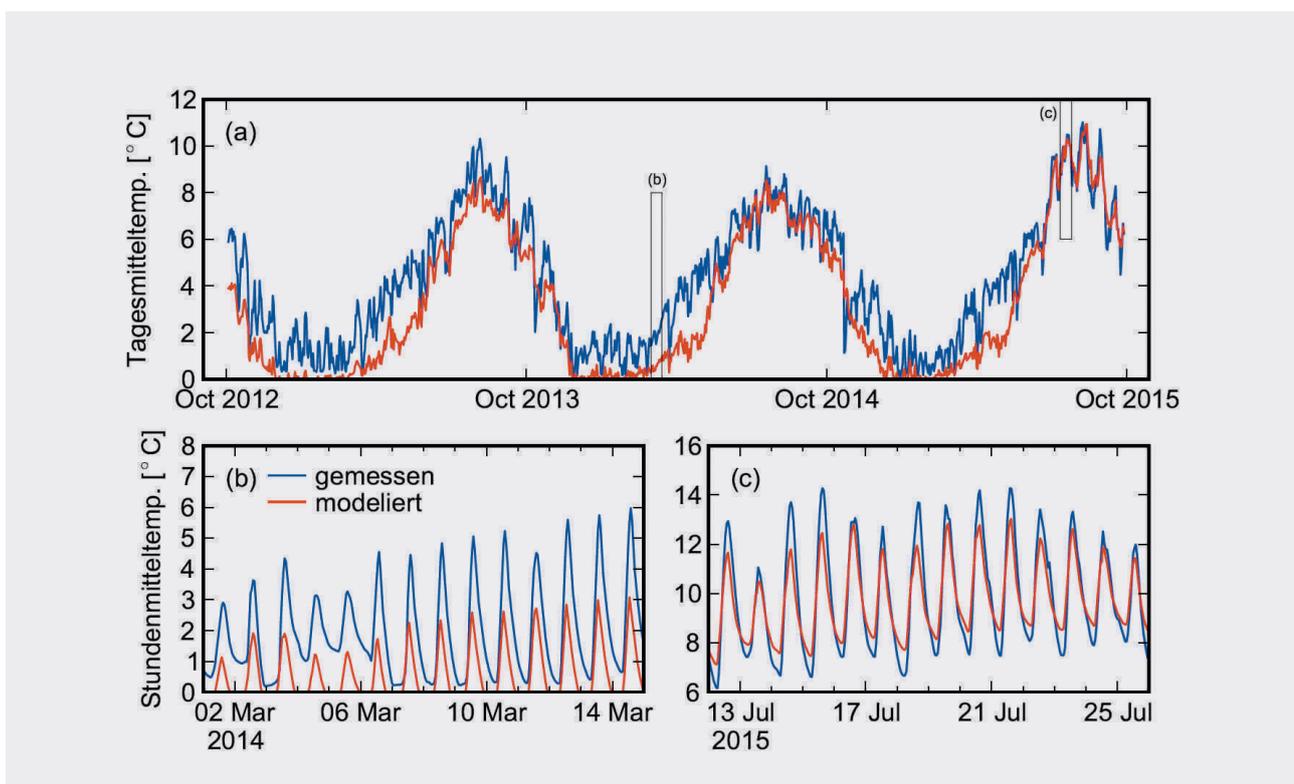


Fig. 5 Vergleich zwischen der gemessenen und der mit StreamFlow simulierten Wassertemperatur im Dischmabach (BAFU Messstation 2327).

(a) Tagesmitteltemperatur in drei hydrologischen Jahren: 2013, 2014 und 2015; (b) und (c) Stundenmitteltemperatur in zwei verschiedenen Perioden von 15 Tagen (die Perioden sind in (a) dargestellt). Die Differenz (b) zwischen gemessener und modellierter Ganglinie resultiert daraus, dass der Inputparameter Lufttemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$ war, während die Wassertemperatur auf 0°C begrenzt ist (übernommen aus [32]).

Comparaison entre la température de l'eau mesurée et simulée par StreamFlow dans le torrent Dischma (station de mesures OFEV 2327).

(a) température moyenne quotidienne sur trois années hydrologiques: 2013, 2014 et 2015; (b) et (c) température moyenne horaire dans deux périodes différentes de 15 jours. La différence dans (b) entre la ligne mesurée et le modèle résultant du fait que les paramètres d'entrée de la température de l'air était $< 0^{\circ}\text{C}$, pendant que la température de l'eau était limitée à 0°C (adopté de [32]).

STREAMFLOW – PROGRAMMBESCHREIBUNG

Zurzeit bietet *StreamFlow* (noch) keine Benutzeroberfläche. Die Programmkonfiguration ist durch eine Textdatei einfach modifizierbar. Darin werden alle durch *StreamFlow* verfügbaren Optionen angepasst. *StreamFlow* ist, wie *Alpine3D*, in C++ codiert, was im Vergleich zu anderen Programmiersprachen von Vorteil für die Simulationslaufzeit ist. Bei der Modellimplementierung wurde speziell darauf geachtet, einen klaren, strukturierten und gut dokumentierten Code zu entwickeln. Das erleichtert den Zugang für künftige Modellentwickler, da das Programm relativ leicht verständlich ist und einfach weiterentwickelt werden kann.

	Eingangsparameter	Modellierte Parameter
Stochastisches Modell	Lufttemperatur ¹⁾ / (min. 3 Stationen) Vegetationsbedeckung entlang des Flusses ^{1) 3)} Topografische Beschattung entlang des Flusses ^{1) 3)} Topografie des Wassernetzes ^{1) 3)} Neigung des Flussbetts ^{1) 3)}	Wassertemperatur (Wochenmittel oder Monatsmittel)
Deterministisches Modell	Lufttemperatur ¹⁾ Relative Feuchtigkeit ¹⁾ Kurz-, langwellige Strahlung ¹⁾ Windgeschwindigkeit ¹⁾ Niederschlag ¹⁾ Höhenlinienmodell ¹⁾ Landnutzung ¹⁾ Wassertemperatur Beginn Modellgrenze ²⁾ Wassertemperatur Mitte Modellgrenze ²⁾ Wassertemperatur Ende Modellgrenze ²⁾	Wassertemperatur (Stundenmittel) Abfluss (Stundenmittel) Wasserstand (Stundenmittel)

¹⁾ müssen eingegeben werden

²⁾ können zur Korrelationsverbesserung eingegeben werden

³⁾ können aus SwissTopo-Karten hergeleitet werden

Darstellung der Eingabeparameter für das von der EPFL entwickelte statistische Modell und dem deterministischen Modell Alpine3D/StreamFlow.

Représentation des paramètres d'entrée pour le développement du modèle statistique EPFL et le modèle déterministe Alpine3D/(StreamFlow).

Eine Limitierung für die fachliche Verwendung der aktuellen Modellversion ist, dass die Beschattung durch die Ufervegetation (noch) nicht berücksichtigt ist. Dadurch ist der Modelleinsatz momentan auf hochliegende oder vegetationsfreie Wasserläufe begrenzt. Künstliche Ableitungen sind im Moment ebenfalls nicht verfügbar, ihre Implementierung im Modell könnte aber relativ einfach eingebaut werden.

Der Quellcode von *StreamFlow* kann nach kostenloser Anmeldung über eine URL heruntergeladen werden: <http://models.slf.ch/p/streamflow/source/tree/HEAD/>
Die komplette Dokumentation ist ebenfalls online verfügbar: <http://models.slf.ch/p/streamflow/doc/>

oder «In-stream»-Kompartimente liefert. Saisonale Schwankungen können ebenso berücksichtigt werden. Da das Modell auf relativ einfach durchzuführenden Berechnungen aufbaut und die Wassertemperatur nur am Abflusspunkt des Einzugsgebietes berechnet, kann es mit geringem Rechenaufwand über grosse Flächen angewendet werden. Es ist in der Schweiz für unbeobachtete Einzugsgebiete über einen mehrjährigen Zeitraum validiert worden. Liegen Modellprognosen hinsichtlich der meteorologischen Inputparameter vor, können mit dem Modell auch Prognosen erstellt werden.

Deterministisches Modell

Das deterministische Modell *StreamFlow* eignet sich in seiner derzeitigen Form besonders für die Beschreibung eher kleiner, allenfalls stärker strukturierter Gebiete und Prozessabläufe im alpinen Raum sowie zeitlich hoch aufgelöster Ereignisse. Auch hierfür gibt es wieder, je nach Fragestellung, ein ganzes Spektrum verschiedener Einsatzmöglichkeiten. Einerseits können Prognosen und Szenarien aufgrund der quantitativ beschriebenen Systemgrößen und ihrer Wechselwirkungen für das Gewässernetz erstellt werden. Aber auch ganz praktische Be-

einflussungen, wie z. B. die lokale thermische Nutzung der Wasserkörper können bei entsprechend gegebener Datensituation mithilfe dieses Modells beschrieben werden.

Im Bereich der mathematischen Modellentwicklung stehen verschiedene Aktivitäten im Fokus weiterer Abklärungen. Einerseits soll die Zweckmässigkeit, Einsatzfähigkeit oder Integration bestehender Modelle für die Prognosen des Bundes stetig überprüft werden. Andererseits bietet es sich an, aufgrund des flexiblen und modernen Entwicklungsstandes von *Alpine3D/StreamFlow*, diese Modulkombination praktisch orientiert einzusetzen und weitere Komponenten bedarfsgerecht zu integrieren, wie z. B. ein Vegetationsschatten-Modul, ein Infrastruktur-Modul oder ein Gewässermorphologie-Modul. Wichtig wäre auch der Anschluss an ein Stausee- oder Reservoir-Modul, bei dem der *In-* und *Outflow* der Wassertemperatur in die Berechnungsalgorithmen von *Alpine3D/StreamFlow* integriert werden kann.

Grundsätzlich muss sich die Wahl des geeigneten Modelles immer an der Zielsetzung orientieren. Mit den Modellberechnungen sollen aktuelle und zukünftige temperaturrelevante Fragen bezüglich der Einzugsgebiete der Fliessgewässer beantwortet werden. Wie wirken sich z. B. die Grösse, Höhenlage, Exposition oder Landnutzung auf die Wassertemperatur aus. Wie verändert sich die Gewässertemperatur mit der Schaffung neuer Stauseen, oder wie wirkt sich die thermische Nutzung des Oberflächenwassers in Koppelung mit der Klimaerwärmung auf die Wassertemperatur aus. Dabei sollen Prognosen, Szenarien oder Sensitivitätsstudien die Auswirkungen der Veränderungen besser abzuschätzen helfen.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LATIF, M. (2012): *Globale Erwärmung*. Stuttgart: Ulmer
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change) (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Genf, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>
- [3] NOAA NCDC (National Oceanic And Atmospheric Administration National Climatic Data Center) (2015): *State of the Climate: Global Analysis for December 2014*, <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/>
- [4] BAFU: *Hydrologisches Jahrbuch*, www.bafu.admin.ch/publikationen

- [5] Jakob, A.; Binderheim, E.; Schädler, M.; Pfamatter, F. (2010): *Temperaturen in Schweizer Fließgewässern*, GWA 3/2010, S 221–231
- [6] REID, Ph. C. et al. (2015): *Global impacts of the 1980s regime shift*, *Global Change Biology* Published by John Wiley & Sons Ltd.
- [7] BAFU (2012): *Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro)*. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 S.
- [8] NFP61 (2015): *Leitungsgruppe NFP 61 (2015): Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz – NFP 61 weist Wege in die Zukunft. Gesamtsynthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung»*, Bern
- [9] BAFU (2012): *Rapport Clm-arbres*, www.cmfef.ch/Publication/2012_clim_arbres_final.pdf, La Maison de la Rivière, hepia (Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève)
- [10] SGHL 2011: *Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Hydrologische Kommission (CHy) (Hrsg.) 2011: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 38, 28 S.*, Bern
- [11] KLIWA: *Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft*, www.kliwa.de
- [12] IKSR (2015): *Klimaanpassungsstrategie für die IFGE Rhein*, *Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)*, ISBN 3-941994-77-8
- [13] Caissie, D. (2006): *The thermal regime of rivers: a review*, *Freshwater Biol.*, 51, 1389–1406, doi:10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x
- [14] Gallice, A. et al. (2015): *Stream temperature prediction in ungauged basins: review of recent approaches and description of a new physics-derived statistical model*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19:3727–3753, doi:10.5194/hess-19-3727-2015
- [15] Benyahya, L. (2007): *A review of statistical water temperature*, *Canadian Water Resources Journal* 32(3):179-192
- [16] Moore, R. (2013): *Empirical modelling of maximum weekly average stream temperature in British Columbia, Canada, to support assessment of fish habitat suitability*, *Can. Water Resour. J.*, 38, 135–147, doi:10.1080/07011784.2013.794992
- [17] Isaak, D. J. et al. (2010): *Effects of climate change and wildfire on stream temperatures and salmonid thermal habitat in a mountain river network*, *Ecological Applications*, 20, 1350–1371
- [18] Hill, R. A. et al. (2013): *Predicting thermal reference conditions for USA streams and rivers*, *Freshwater Science*, 32, 39–55, doi:10.1899/12-009.1
- [19] DeWeber, J. T.; Wagner, T. (2014): *A regional neural network ensemble for predicting mean daily river water temperature*, *Journal of Hydrology*, 517, 187–200, doi:10.1016/j.jhydrol.2014.05.035
- [20] Piccolroaz, S. (2016): *Prediction of river water temperature: a comparison between a new family of hybrid models and statistical approaches*, *Hydrological Processes*, doi:10.1002/hyp.10913, <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10913>
- [21] Toffolon, M., Piccolroaz, S. (2015): *A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge*, *Environmental Research Letters*, 10, 114 011, <http://stacks.iop.org/1748-9326/10/i=11/a=114011>
- [22] Ficklin, D. L. (2014): *Climate change and stream temperature projections in the Columbia River basin: habitat implications of spatial variation in hydrologic drivers*, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 4897–4912, doi:10.5194/hess-18-4897-2014, www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/4897/2014/
- [23] Bremicker, M. (2000): *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele*. *Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11*. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg
- [24] Ludwig, K.; Bremicker, M. (2006): *The Water Balance Model LARSIM – Design, Content and Applications*, *Freiburger Schriften zur Hydrologie, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg i. Br., Germany, Band 22, ISSN 0945-1609*
- [25] Haag, I.; Luce, A. (2008): *The integrated water balance and water temperature model LARSIM-WT*. *Hydrol. Process.* 22 (1046–1056)
- [26] Schulla, J. (1997): *Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaaänderungen*. *Diss. 12018, ETH Zürich*, 163 S.
- [27] www.wasim.ch
- [28] Reichert, P. (1994): *«AQUASIM – A tool for simulation and data analysis of aquatic systems»*, *Water Sci. Tech.*, 30(2), 21–30
- [29] Reichert, P. (1995): *«Design techniques of a computer program for the identification of processes and the simulation of water quality in aquatic systems»*, *Environmental Software* 10(3), 199–210
- [30] Viviroli, D. (2009): *An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools*. *Environmental Modelling & Software* 24 (1209–1222)
- [31] Lehning, M. (2006): *ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology*. *Hydrological Processes*, 20(10):2111–2128, doi: 10.1002/hyp.6204
- [32] Gallice, A. (2016): *StreamFlow 1.0: An extension to the spatially distributed snow model Alpine3D for hydrological modeling and deterministic stream temperature prediction*. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, doi:10.5194/gmd-2016-167, unter Review
- [33] Tarboton, D. G. (1997): *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*, *Water Resources Research*, 33, 309–319, doi:10.1029/96WR03137, <http://dx.doi.org/10.1029/96WR03137>

> SUITE DU RÉSUMÉ

valeurs hebdomadaires ou mensuelles de températures de l'eau le long d'une section quelconque de la rivière.

En parallèle, a été créé un modèle déterministe et modulaire basé sur le modèle du manteau neigeux spatialement distribué Alpine3D de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL. Le modèle est complété par les deux composantes TauDEM et flux de données (*StreamFlow*). Cette combinaison permet une grande capacité d'évolution de la zone de modélisation associée à une haute résolution temporelle des valeurs de température de l'eau (moyennes horaires).