Temperaturen in Schweizer Fliessgewässern

Langzeitbeobachtung

Températures des cours d'eau suisses
Observation à long terme

Dans le cadre du réseau national des mesures de température, la température de différents cours d'eau est mesurée continuellement depuis 1963. Il est ainsi possible de mettre en évidence les conséquences de diverses influences naturelles et anthropogènes sur l'évolution annuelle de la température de l'eau. Ces mesures permettent d'effectuer une classification approximative des stations de mesure. L'analyse des relevés de température indique une augmentation de la moyenne annuelle pouvant atteindre 1,2° C et 1,5 à 3° C en été, en basse altitude et dans la zone d'influence des lacs. En région alpine, l'augmentation de la moyenne annuelle est moins marquée à cause de l'effet compensateur de l'eau de fonte des glaciers. Quelle que soit l'altitude, toutes les stations de mesure enregistrent une élévation plus rapide de la température au printemps. Les changements de température ont une influence notable sur le développement et la composition des espèces aquatiques.

Temperatures in Swiss Rivers and Streams
Long-term Observation

Water temperatures of various rivers and streams have been continuously recorded since 1963 within the framework of the national temperature measurement network. This has made it possible to highlight the effects of various natural and anthropogenic influences on the annual development of water temperatures. This enables an approximate classification of the measurement stations. The analyses of the measurements show clear tendencies towards increased annual mean temperatures of up to 1.2 °C, and 1.5–3 °C in summer, particularly in lower altitudes, as well as in areas affected by lakes. In alpine regions the increase in annual mean is visible to a lesser extent, due to the compensating influences of melt-water from glaciers. A rapid increase in temperature is noticeable in spring, irrespective of the altitude. The temperature changes have a decisive impact on the development and on the composition of aquatic life.

Adrian Jakob

Im Rahmen des nationalen Temperaturmessnetzes werden seit 1963 die Wassertemperaturen verschiedener Fliessgewässer kontinuierlich erfasst. Dadurch können die Auswirkungen unterschiedlicher natürlicher und anthropogener Einflüsse auf den Jahresverlauf der Wassertemperaturen aufgezeigt werden. Dies erlaubt eine grobe Klassifizierung der Messstationen. Die Auswertungen der Messungen zeigen klare Tendenzen zu erhöhten Wassertemperaturen von bis zu 1,2 °C im Jahresmittel und um 1,5–3 °C im Sommer insbesondere in tieferen Lagen sowie im Einflussbereich von Seen. In alpinen Lagen sind die Temperaturerhöhungen im Jahresmittel aufgrund des kompensierenden Einflusses von Gletscherschmelzwasser weniger ausgeprägt. Unabhängig von der Höhenlage ist bei allen Messstationen ein rascherer Temperaturanstieg im Frühling zu verzeichnen. Die Temperaturänderungen wirken sich wesentlich auf die Entwicklung und Zusammensetzung von aquatischen Lebewesen aus.

1. Einleitung

Die Temperatur ist einer der physikalischen Schlüsselparameter, der die chemischen und biologischen Prozesse in einem Fliessgewässer bestimmt. Deshalb spielt die Wassertemperatur für die Zusammensetzung und Entwicklung aquatischer Lebensgemeinschaften eine wesentliche Rolle.
Die Wassertemperaturen sind einerseits das Resultat von *natürlichen Einflussfaktoren* im Einzugsgebiet wie beispielsweise Morphologie, klimatische Bedingungen und die Grundwasserexfiltration [1]. Andererseits werden die

Temperaturen in Schweizer Fliessgewässern

Langzeitbeobachtung

Températures des cours d'eau suisses
Observation à long terme

Dans le cadre du réseau national des mesures de température, la température de différents cours d'eau est mesurée continuellement depuis 1963. Il est ainsi possible de mettre en évidence les conséquences de diverses influences naturelles et anthropogènes sur l'évolution annuelle de la température de l'eau. Ces mesures permettent d'effectuer une classification approximative des stations de mesure. L'analyse des relevés de température indique une augmentation de la moyenne annuelle pouvant atteindre 1,2° C et 1,5 à 3° C en été, en basse altitude et dans la zone d'influence des lacs. En région alpine, l'augmentation de la moyenne annuelle est moins marquée à cause de l'effet compensateur de l'eau de fonte des glaciers. Quelle que soit l'altitude, toutes les stations de mesure enregistrent une élévation plus rapide de la température au printemps. Les changements de température ont une influence notable sur le développement et la composition des espèces aquatiques.

Temperatures in Swiss Rivers and Streams
Long-term Observation

Water temperatures of various rivers and streams have been continuously recorded since 1963 within the framework of the national temperature measurement network. This has made it possible to highlight the effects of various natural and anthropogenic influences on the annual development of water temperatures. This enables an approximate classification of the measurement stations. The analyses of the measurements show clear tendencies towards increased annual mean temperatures of up to 1.2 °C, and 1.5–3 °C in summer, particularly in lower altitudes, as well as in areas affected by lakes. In alpine regions the increase in annual mean is visible to a lesser extent, due to the compensating influences of melt-water from glaciers. A rapid increase in temperature is noticeable in spring, irrespective of the altitude. The temperature changes have a decisive impact on the development and on the composition of aquatic life.

Adrian Jakob

Im Rahmen des nationalen Temperaturmessnetzes werden seit 1963 die Wassertemperaturen verschiedener Fliessgewässer kontinuierlich erfasst. Dadurch können die Auswirkungen unterschiedlicher natürlicher und anthropogener Einflüsse auf den Jahresverlauf der Wassertemperaturen aufgezeigt werden. Dies erlaubt eine grobe Klassifizierung der Messstationen. Die Auswertungen der Messungen zeigen klare Tendenzen zu erhöhten Wassertemperaturen von bis zu 1,2 °C im Jahresmittel und um 1,5–3 °C im Sommer insbesondere in tieferen Lagen sowie im Einflussbereich von Seen. In alpinen Lagen sind die Temperaturerhöhungen im Jahresmittel aufgrund des kompensierenden Einflusses von Gletscherschmelzwasser weniger ausgeprägt. Unabhängig von der Höhenlage ist bei allen Messstationen ein rascherer Temperaturanstieg im Frühling zu verzeichnen. Die Temperaturänderungen wirken sich wesentlich auf die Entwicklung und Zusammensetzung von aquatischen Lebewesen aus.

1. Einleitung

Die Temperatur ist einer der physikalischen Schlüsselparameter, der die chemischen und biologischen Prozesse in einem Fliessgewässer bestimmt. Deshalb spielt die Wassertemperatur für die Zusammensetzung und Entwicklung aquatischer Lebensgemeinschaften eine wesentliche Rolle.
Die Wassertemperaturen sind einerseits das Resultat von *natürlichen Einflussfaktoren* im Einzugsgebiet wie beispielsweise Morphologie, klimatische Bedingungen und die Grundwasserexfiltration [1]. Andererseits werden die

Temperaturen in Schweizer Fliessgewässern

Langzeitbeobachtung

Températures des cours d'eau suisses
Observation à long terme

Dans le cadre du réseau national des mesures de température, la température de différents cours d'eau est mesurée continuellement depuis 1963. Il est ainsi possible de mettre en évidence les conséquences de diverses influences naturelles et anthropogènes sur l'évolution annuelle de la température de l'eau. Ces mesures permettent d'effectuer une classification approximative des stations de mesure. L'analyse des relevés de température indique une augmentation de la moyenne annuelle pouvant atteindre 1,2° C et 1,5 à 3° C en été, en basse altitude et dans la zone d'influence des lacs. En région alpine, l'augmentation de la moyenne annuelle est moins marquée à cause de l'effet compensateur de l'eau de fonte des glaciers. Quelle que soit l'altitude, toutes les stations de mesure enregistrent une élévation plus rapide de la température au printemps. Les changements de température ont une influence notable sur le développement et la composition des espèces aquatiques.

Temperatures in Swiss Rivers and Streams
Long-term Observation

Water temperatures of various rivers and streams have been continuously recorded since 1963 within the framework of the national temperature measurement network. This has made it possible to highlight the effects of various natural and anthropogenic influences on the annual development of water temperatures. This enables an approximate classification of the measurement stations. The analyses of the measurements show clear tendencies towards increased annual mean temperatures of up to 1.2 °C, and 1.5–3 °C in summer, particularly in lower altitudes, as well as in areas affected by lakes. In alpine regions the increase in annual mean is visible to a lesser extent, due to the compensating influences of melt-water from glaciers. A rapid increase in temperature is noticeable in spring, irrespective of the altitude. The temperature changes have a decisive impact on the development and on the composition of aquatic life.

Adrian Jakob

Im Rahmen des nationalen Temperaturmessnetzes werden seit 1963 die Wassertemperaturen verschiedener Fliessgewässer kontinuierlich erfasst. Dadurch können die Auswirkungen unterschiedlicher natürlicher und anthropogener Einflüsse auf den Jahresverlauf der Wassertemperaturen aufgezeigt werden. Dies erlaubt eine grobe Klassifizierung der Messstationen. Die Auswertungen der Messungen zeigen klare Tendenzen zu erhöhten Wassertemperaturen von bis zu 1,2 °C im Jahresmittel und um 1,5–3 °C im Sommer insbesondere in tieferen Lagen sowie im Einflussbereich von Seen. In alpinen Lagen sind die Temperaturerhöhungen im Jahresmittel aufgrund des kompensierenden Einflusses von Gletscherschmelzwasser weniger ausgeprägt. Unabhängig von der Höhenlage ist bei allen Messstationen ein rascherer Temperaturanstieg im Frühling zu verzeichnen. Die Temperaturänderungen wirken sich wesentlich auf die Entwicklung und Zusammensetzung von aquatischen Lebewesen aus.

1. Einleitung

Die Temperatur ist einer der physikalischen Schlüsselparameter, der die chemischen und biologischen Prozesse in einem Fliessgewässer bestimmt. Deshalb spielt die Wassertemperatur für die Zusammensetzung und Entwicklung aquatischer Lebensgemeinschaften eine wesentliche Rolle.
Die Wassertemperaturen sind einerseits das Resultat von *natürlichen Einflussfaktoren* im Einzugsgebiet wie beispielsweise Morphologie, klimatische Bedingungen und die Grundwasserexfiltration [1]. Andererseits werden die

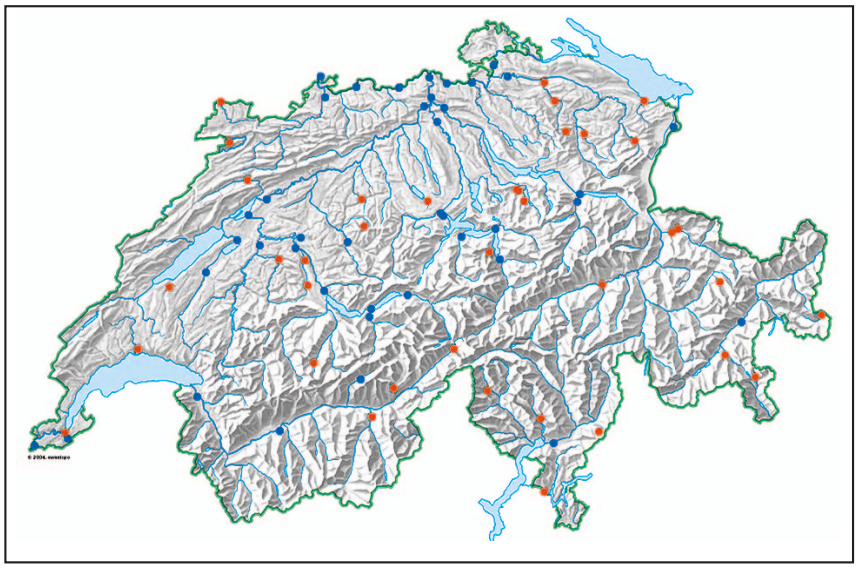

Abb. 1 Überblick über die Lage der Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes (Stand 2008): Blaue Punkte markieren diejenigen Stationen, die vor 2000 in Betrieb genommen wurden, orange Punkte markieren diejenigen Stationen, die nach 2000 in Betrieb genommen wurden.

Temperaturverhältnisse eines Fliessgewässers durch *anthropogene Einflüsse* wie z.B. durch hydroelektrische Speicherkraftwerke oder Kühl- und Abwassereinleitungen verändert [2, 3].

Die *Gewässerschutzverordnung* (GSchV) legt die Anforderungen für die Temperaturverhältnisse in Oberflächengewässern fest. Demnach muss die Wasserqualität so beschaffen sein, dass die Temperaturverhältnisse naturnah sind. Zudem dürfen durch Wasserentnahmen, Wassereinleitungen und bauliche Eingriffe die Temperaturverhältnisse des Gewässers nicht derart verändert werden, dass die für das Gewässer typischen Lebensgemeinschaften nicht mehr gedeihen können. Gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand darf die Temperatur eines Fliessgewässers durch Wärmeeintrag oder -entzug um höchstens 3 °C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1,5 °C verändert werden, wobei die Wassertemperatur grundsätzlich 25 °C nicht übersteigen darf.

Im Rahmen der *nationalen Umweltbeobachtung* betreibt die Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) nebst anderen ein *Messnetz* zur Überwachung der Wassertemperaturen an ausgewählten Fliessgewässern *(Abb. 1)*. Die Messergebnisse werden regelmässig im *Hydrologischen Jahrbuch* der Schweiz [4] publiziert und im Internet dargestellt (*www.bafu.admin.ch/hydrologie*); sie können auch direkt beim BAFU bezogen werden.

Im Folgenden wird das Anfang der 2000er-Jahre erweiterte Temperaturmessnetz des Bundes vorgestellt und unter dem Aspekt der Repräsentativität anhand einer Klassifizierung der Stationen diskutiert. Im Weiteren werden die erhobenen Daten zusammengefasst dargestellt, langfristige Änderungen der Wassertemperaturen werden aufgezeigt und im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die aquatische Fauna diskutiert.

Weitere Publikationen zum Temperaturmessnetz des Bundes finden sich in [5, 6, 7, 8, 9, 10].

2. Einflussfaktoren

Das mittlere Jahrestemperaturregime an einer bestimmten Stelle im Fliessgewässer weist einen sinusähnlichen Verlauf auf, der um einige Wochen verzögert der Kurve der mittleren Lufttemperatur am betreffenden Ort folgt, wobei der Temperaturanstieg meist langsamer als der Temperaturabfall ist. Dieser mehr oder weniger ausgeprägte Jahresgang des Temperaturverlaufes ist in erster Linie das Resultat von klimatischen Faktoren, wie Sonneneinstrahlung, Abstrahlung, Niederschlag, Verdunstung, Kondensation, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Wärmeaustausch mit dem Untergrund und der Luft [1]. Kurzfristige und langfristige Abweichungen sowie Abschwächungen und Verstärkungen von diesem sinusähnlichen Verlauf werden von den folgenden *natürlichen* und *anthropogenen Einflüssen* bewirkt:

Meteorologische Verhältnisse

Eine Schlechtwetterlage bewirkt im Sommer eine Abkühlung, da einerseits die Sonneneinstrahlung und damit die Erwärmung des Wassers reduziert werden und andererseits mit dem Niederschlag kälteres Wasser in das Fliessgewässer gelangt. Im Winter hingegen bewirkt eine Schlechtwetterlage eine Erwärmung des Wassers, da einerseits die Wärmeabstrahlung bzw. die Abkühlung des Wassers vermindert wird und andererseits das Niederschlagswasser bei Regen im Winter meist höhere Temperaturen als das Flusswasser aufweist, weil die Temperaturamplituden im Boden geringer sind. Meteorologische Einflüsse wirken kurzfristig und können grosse jährliche Unterschiede in den Temperaturganglinien bewirken.

Ökomorphologie

Ein grosses Gefälle und eine grosse Bettrauhigkeit bewirken aufgrund der grösseren Reibung eine Temperaturzunahme in einem Fliessgewässer [11]. Vor allem bei alpinen Fliessgewässern im Winter bei niedrigem Abfluss kann dies zu tendenziell höheren Wintertemperaturen führen als aufgrund der klimatischen Bedingungen zu erwarten wären. Die Vegetation entlang eines Fliessgewässers kann durch Beschattung vor allem im Sommer Abweichungen gegenüber unbeschatteten Gewässern um mehrere Grad Celsius bewirken [12].

Grundwassereinfluss

Grundwasserexfiltrationen bewirken eine Glättung der Jahresganglinie des entsprechenden Fliessgewässers. Sie haben geringere Temperaturamplituden zur Folge, als dies bei vergleichbaren Fliessgewässern ohne relevante Grundwasserexfiltration der Fall ist. Dies, weil das Grundwasser über das ganze Jahr hinweg eine relativ konstante Temperatur aufweist, welche in der Regel der Jahresmitteltemperatur der Luft am betreffenden Ort entspricht [13]. Zudem wirkt sich ein starker Grundwassereinfluss dämpfend auf kurzfristige, wetterbedingte Temperaturschwankungen aus, was insbesondere im Winter bei niedrigem Abfluss ersichtlich ist.

Schnee- und Gletscherschmelze

Ein hoher Anteil an Schnee- und Gletscherschmelzwasser am Gesamtabfluss eines Fliessgewässers führt vor allem im Sommer zu tieferen Wassertemperaturen, bewirkt eine Verringerung der Jahrestemperaturamplitude und reduziert die Ausgangstemperatur eines Fliessgewässers [14].

Seen

Seen haben die Funktion eines Wärmespeichers. Sie erwärmen sich im oberflächennahen Bereich im Sommer aufgrund ihrer grossen Oberfläche und dem stehenden Wasser viel stärker als Fliessgewässer. Im Herbst und Winter hingegen kühlen sich Seen aufgrund ihres grösseren Volumens und der hohen Wärmespeicherkapazität viel weniger schnell ab. Seeausflüsse zeigen deshalb im Sommer und im Winter generell höhere Temperaturen als Seezuflüsse. Der Jahresmittelwert der Messstation beim Zufluss kann bis zu 5 °C tiefer sein als jener beim Seeausfluss [15].

Hydroelektrische Speicherkraftwerke

Diese wirken sich unterschiedlich auf das Temperaturregime eines Fliessgewässers aus. Auf Restwasserstrecken bewirkt die hydroelektrische Nutzung infolge des geringeren Abflusses im Winter eine Abnahme und im Sommer eine Zunahme der Wassertemperatur. Auf Gewässerabschnitten, die unterhalb der Wasserrückgabestelle liegen, wird die Wassertemperatur durch das aus dem Stausee turbinierte Wasser im Winter aufgewärmt und im Sommer abgekühlt [2]. In der Rhone beispielsweise wird die Temperatur im Winter durch den Kraftwerkseinfluss um etwa 2 °C erhöht und im Sommer um rund 1 °C reduziert [2].

Kühlwassereinleitungen

Kühlwassereinleitungen aus thermischen Kraftwerken bewirken grundsätzlich eine Erwärmung des Wassers. Im Winter ist sie stärker als im Sommer. Die Temperatur der Aare wird beispielsweise durch die Kühlwassereinleitung des Kraftwerks Mühleberg durchschnittlich um 1,3 °C erhöht, im Winter sogar um bis zu 3,4 °C [2].

Abwassereinleitungen

Abwassereinleitungen bei Regenwetter aus Misch- und Trennsystemen können speziell in kleinen Gewässern zu einem temporären Temperaturanstieg führen, da das Wasser von versiegelten Flächen in den meisten Fällen um einige Grade wärmer ist als das Fliessgewässer [16].

Klimaänderung

Änderungen von klimatischen Faktoren wirken sich direkt auf die Wassertemperaturen aus. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass Änderungen des *Nordatlantischen Oszillation Indexes* (NAO) einen grossen Einfluss sowohl auf die Wassertemperaturen von Seen in ganz Zentraleuropa [17] als auch auf die Temperaturen der Fliessgewässer in der Schweiz haben [18].

3. Ökologische Bedeutung

Die Temperatur beeinflusst die physikalischen und chemischen Prozesse sowie die biologischen und biochemischen Vorgänge im Wasser und wirkt sich somit indirekt und direkt auf die *aquatischen Organismen* aus.

Die Löslichkeit von Gasen nimmt mit steigenden Temperaturen ab. So enthält wärmeres Wasser weniger gelösten Sauerstoff, welcher für aquatisches Leben essentiell ist. Die Stoffwechselvorgänge werden mit steigenden Temperaturen beschleunigt und der Sauerstoffbedarf nimmt zu, was bei gleichzeitig verringertem Sauerstoffangebot für viele Organismen zu Stress führen kann. Die Temperatur bestimmt auch Dauer, Verlauf und Geschwindigkeit des Wachstums. Bei *Fischen* beispielsweise können Temperaturveränderungen zu Verschiebungen der Laichzeiten führen [19]. Bei *Makroinvertebraten* beeinflussen Temperaturveränderungen die Generationsdauer und bewirken damit eine Verschiebung des Zeitpunktes der Emergenz, was den gesamten Lebenszyklus verändern kann [20].

Die Lebensfähigkeit und -aktivität aquatischer Organismen hängt zudem von optimalen Temperaturbereichen und Temperaturextremwerten ab. Die optimalen und letalen Temperaturbereiche sind je nach Organismen unterschiedlich. So können beispielsweise bei Forellen, Felchen oder Äschen ab ca. 18 °C Stresssymptome auftreten und Temperaturen über 25 °C bereits tödlich sein. Karpfen, Barsche und Hechte hingegen ertragen hohe Temperaturen besser [19]. Der Edelkrebs bevorzugt die wärmeren Gewässer mit Temperaturen bis maximal 24 °C im Gegensatz zum Steinkrebs, der eher kühlere Gewässer mit Temperaturen bis maximal 20 °C favorisiert [21]. Bei den Wirbellosen bevorzugen Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven grundsätzlich niedrigere Temperaturen als z.B. Köcherfliegenlarven und Libellenlarven [22].

Stark temperaturabhängig ist auch der Ausbruch von *Krankheiten* bei Fischen wie beispielsweise der *proliferativen Nierenkrankheit* (PKD). Bachforellen können bei Temperaturen unter etwa 15 °C zwar eine pathologische Reaktion des Nierengewebes entwickeln, sterben aber

nicht daran. Ein Ausbruch der Krankheit mit hoher Mortalitätsrate erfolgt hingegen dann, wenn Erreger vorhanden sind und gleichzeitig die Wassertemperaturen während zweier Wochen oder länger einen Tagesmittelwert von 15 °C überschreiten [23].
Viele Organismen haben je nach Lebensstadien unterschiedliche Temperaturpräferenzen. Das Vorkommen mancher Arten ist somit aufgrund der Vorlieben und Toleranzen auf bestimmte Flussabschnitte beschränkt. Die Wassertemperatur legt damit Habitatsgrenzen in unseren Fliessgewässern fest. Langfristige Veränderungen der Wassertemperaturen beeinflussen deshalb das Vorkommen und die Zusammensetzung der aquatischen Organismen in Fliessgewässern und können das Aufkommen von Neozoen und Neophyten fördern.

4. Temperaturmessnetz

4.1 Ziel und Konzept

Das Ziel des nationalen Temperaturmessnetzes besteht darin, Grundlagen für die Erfolgskontrolle der schweizerischen Umweltschutzgesetzgebung zu liefern sowie Ursachen- und Wirkungsanalysen zu ermöglichen [24]. Um dieses Ziel zu erreichen ist es wichtig, dass die Stationen einen gesamtschweizerischen Überblick gewährleisten und die Vielfalt der Schweizer Fliessgewässer repräsentieren.
Damit die im Rahmen des Temperaturmessnetzes untersuchten Fliessgewässer zusammenfassend charakterisiert werden können und das Messnetz im Hinblick auf seine Repräsentativität besser beurteilt werden kann, müssen die einzelnen Messstationen aufgrund ihres Jahres-Temperaturregimes klassifiziert werden.

4.2 Datenerhebung

Das nationale Temperaturmessnetz wurde 1963 in Betrieb genommen und seither laufend erweitert. Es umfasst zurzeit 78 Stationen *(Tab. 1, Abb. 1)*. Die grösste Erweiterung im Messnetz von 40 auf 75 Messstationen erfolgte im Rahmen der Neuformulierung der Zielsetzungen des Temperaturmessnetzes in den Jahren 2000–2002.
Die Temperaturmessungen werden mit Temperatursonden kontinuierlich in 10-Minuten-Intervallen erhoben. Historische Temperaturdaten wurden teilweise mittels täglichen Stichproben erhoben. Die Daten bilden die Grundlage für die Berechnungen von Tages-, Monats-, Jahresmittelwerten und Mittelwerten über beliebige Zeitperioden. Der Beginn der Messperiode mit kontinuierlichen und als Stichproben durchgeführten Temperaturmessungen ist in der *Tabelle 1* ersichtlich. Die

Gewässer	Station	Beginn	Höhe Station (m ü. M.)	Fläche EG (km²)	mittlere Höhe EG (m ü. M.)	Verglet-scherung (%)	Fluss-gebiet
Aare	Bern, Schönau	1970	502.00	2969.00	1610.00	8.00	Aare
Aare	Brienzwiler	1964/69	570.00	554.00	2150.00	21.00	Aare
Aare	Brugg	1963/70	332.00	11750.00	1010.00	2.00	Aare
Aare	Brügg, Aegerten	1963/70	428.00	8317.00	1150.00	2.90	Aare
Aare	Felsenau, KW Klingnau	1960/70	312.00	17779.00			Aare
Aare	Hagneck	1971	437.00	5128.00	1380.00	4.50	Aare
Aare	Ringgenberg, Goldswil	1964/80	564.00	1129.00	1970.00	16.20	Aare
Aare	Thun	1971	548.00	2490.00	1760.00	9.50	Aare
Aare	Untersiggenthal, Stilli	1963/69	326.00	17625.00	1050.00	2.10	Aare
Allaine	Boncourt, Frontière	2002	366.00	215.00	559.00		Rhône
Allenbach	Adelboden	2002	1297.00	28.80	1856.00		Aare
Alp	Einsiedeln	2003	840.00	46.40	1155.00		Limmat
Arve	Genève, Bout du Monde	1969	380.00	1976.00	1370.00	6.10	Rhône
Biber	Biberbrugg	2003	825.00	31.90	1009.00		Limmat
Birs	Münchenstein, Hofmatt	1972	268.00	911.00	740.00		Rhein
Broye	Payerne, Caserne d`aviation	1976	441.00	392.00	710.00		Aare
Canal de la Broye	Sugiez	1999	429.00	697.00	630.00		Aare
Dischmabach	Davos, Kriegsmatte	2004	1668.00	43.30	2372.00	2.10	Rhein
Doubs	Ocourt	2002	417.00	1230.00	950.00		Rhône
Emme	Emmenmatt	1976	638.00	443.00	1070.00		Aare
Engelberger Aa	Buochs, Flugplatz	1983	443.00	227.00	1620.00	4.30	Reuss
Glatt	Rheinsfelden	1976	336.00	416.00	498.00		Rhein
Goldach	Goldach, Bleiche	2004	399.00	49.80	833.00		Rhein
Grossbach	Gross, Säge	2003	940.00	9.06	1276.00		Limmat
Grosstalbach	Isenthal	2004	767.00	43.90	1820.00	9.30	Reuss
Gürbe	Belp, Mülimatt	2007	522.00	117.00	837.00		Aare
Inn	S-chanf	1981	1645.00	615.00	2470.00	15.60	Inn
Kleine Emme	Littau, Reussbühl	1973/78	431.00	477.00	1050.00		Reuss
Landquart	Felsenbach	2003	571.00	616.00	1800.00	1.40	Rhein
Langeten	Huttwil, Häberenbad	2002	597.00	59.90	766.00		Aare
Limmat	Baden, Limmatpromenade	1969/70	351.00	2396.00	1130.00	1.10	Limmat
Linth	Mollis, Linthbrücke	1964/71	436.00	600.00	1730.00	4.40	Limmat
Linth	Weesen, Biäsche	1964/70	419.00	1061.00	1580.00	2.50	Limmat
Lonza	Blatten	1967/86	1520.00	77.80	2630.00	36.50	Rhône
Lütschine	Gsteig	1964/86	585.00	379.00	2050.00	17.40	Aare
Massa	Blatten bei Naters	2003	1446.00	195.00	2945.00	65.90	Rhône
Mentue	Yvonand, La Maugettaz	2002	449.00	105.00	679.00		Aare
Muota	Ingenbohl	1974	438.00	316.00	1360.00	0.08	Reuss
Murg	Frauenfeld	2007	390.00	212.00			Rhein
Murg	Wängi	2002	466.00	78.90	650.00		Rhein

Messgenauigkeit im Temperaturmessnetz des BAFU wird durch regelmässige *Vergleichsmessungen* mit geeichten Thermometern gewährleistet. Die Genauigkeit der Systeme beträgt ±0,15 ºC ±0,02 ºC/ºC.

4.3 Klassifizierung der Messstationen

Die Klassifizierung erfolgte mit Hilfe einer *Clusteranalyse*, welche Ähnlichkeiten zwischen den Stationen in Bezug auf ihr Jahres-Temperaturregime aufzeigte und eine grobe Einteilung in verschiedene Cluster erlaubte. Bei der Bildung der Cluster wurden die Daten aus mehreren Jahren (1999–2007) ausgewertet, um jährliche Schwankungen im Temperaturregime aufgrund von einzelnen Wetterereignissen ausgleichen zu können.

Basierend auf den Ergebnissen der Clusteranalyse wurde die Gruppeneinteilung verfeinert. Gebietsparameter und zusätzliche Kenntnisse über Faktoren im Einzugsgebiet der betrachteten Fliessgewässer, welche das Temperaturregime beeinflussen, wurden für die Differenzierung berücksichtigt.

Die Klassifizierung der Messstationen wird einerseits anhand der mittleren Höhe des Einzugsgebietes – wichtigster Temperatur beeinflussender Gebietsparameter – und andererseits anhand von drei das Temperaturregime beeinflussenden Faktoren – Seeeinfluss, Grundwasserexfiltration und hydrologische Speicherkraftwerke – dargestellt *(Tab. 2)*. Letztere wurden in dieser Arbeit als bedeutendste Einflüsse erachtet. Die Einteilung der Gebietshöhe nach geobotanischen Kriterien in die vier Höhenstufen *alpin, subalpin, montan* und *kollin* ergab die beste Differenzierung, weil hierbei die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse der Süd-, Nord- und Zentralalpen sowie des Juras berücksichtigt werden. Es gilt zu beachten, dass sich die Höhenstufen je nach Region auf unterschiedliche Meereshöhen beziehen *(Tab. 3)* [25]. Der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet wurde in dieser Klassifizierung nicht als Haupteinflussfaktor definiert, da er ebenfalls von der Höhe des Einzugsgebiets abhängig ist.

Die *Erkenntnisse* der Klassifizierung können folgendermassen zusammengefasst werden *(Abb. 2)*:

– Je alpiner die mittlere Einzugsgebietshöhe einer Station, desto niedriger sind sowohl die Winter- als auch die Sommertemperaturen und desto geringer sind die Jahresamplituden des Temperaturregimes. Je höher der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet, desto mehr wird dieser Effekt verstärkt. Typische Temperaturbereiche von naturnahen Fliessgewässern der entsprechenden

Gewässer	Station	Beginn	Höhe Station (m ü. M.)	Fläche EG (km²)	mittlere Höhe EG (m ü. M.)	Vergletscherung (%)	Flussgebiet
Necker	Mogelsberg, Aachsäge	2007	606.00	88.20	959.00	0.00	Rhein
Poschiavino	La Rösa	2004	1860.00	14.10	2283.00	0.35	Adda
Reuss	Luzern, Geissmattbrücke	1973	432.00	2251.00	1500.00	4.20	Reuss
Reuss	Mellingen	1969/70	345.00	3382.00	1240.00	2.80	Reuss
Reuss	Seedorf	1971	438.00	832.00	2010.00	9.50	Reuss
Rhein	(Oberwasser) Laufenburg	1970/71	299.00	34074.00			Rhein
Rhein	(Oberwasser) Rheinau	1971/72	353.00				Rhein
Rhein	Basel, Klingenthalfähre	2003	245.00				Rhein
Rhein	Diepoldsau, Rietbrücke	1963/84	410.00	6119.00	1800.00	1.40	Rhein
Rhein	Rekingen	1969/70	323.00	14718.00	1080.00	0.57	Rhein
Rhein	Rheinfelden, Messstation	1971	262.00	34550.00	1039.00	1.30	Rhein
Rhein	Weil, Palmrainbrücke	1954/77	244.00				Rhein
Rhône	Chancy, Aux Ripes	1971/72	336.00	10299.00	1580.00	8.40	Rhône
Rhône	Genève, Halle d'ile	2003	367.00	7987.00	1670.00	9.40	Rhône
Rhône	Oberwald	2003	1368.00	95.00	2467.00	25.60	Rhône
Rhône	Porte du Scex	1968/71	377.00	5220.00	2130.00	14.30	Rhône
Rhône	Sion	1974	484.00	3349.00	2310.00	18.40	Rhône
Riale di Calneggia	Cavergno, Pontit	2002	890.00	24.00	1996.00	0.00	Ticino
Riale di Pincascia	Lavertezzo	2004	536.00	44.40	1708.00	0.00	Ticino
Riale di Roggoiasca	Roveredo	2003	980.00	8.06	1711.00	0.00	Ticino
Rietholzbach	Mosnang, Rietholz	2002	682.00	3.31	795.00	0.00	Rhein
Rom	Müstair	2003	1236.00	129.70	2187.00	0.12	Etsch
Rosegbach	Pontresina	2004	1766.00	66.50	2716.00	30.10	Inn
Saane	Gümmenen	1981	473.00	1880.00	1131.00	0.20	Aare
Sellenbodenbach	Neuenkirch	2003	515.00	10.50	615.00	0.00	Aare
Sense	Thörishaus, Sensematt	2003	553.00	352.00	1068.00	0.00	Aare
Sitter	Appenzell	2006	769.00	74.20	1252.00	0.00	Rhein
Sperbelgraben	Wasen, Kurzeneialp	2002	911.00	0.54	1063.00	0.00	Aare
Suze	Sonceboz	2004	642.00	150.00	1050.00	0.00	Aare
Taschinasbach	Grüsch, W.F. Lietha	2003	666.00	63.00	1768.00	0.04	Rhein
Thur	Andelfingen	1963/69	356.00	1696.00	770.00	0.00	Rhein
Ticino	Riazzino	1978	200.00	1611.00	1640.00	0.65	Ticino
Tresa	Ponte Tresa, Rocchetta	2003	268.00	615.00	800.00	0.00	Ticino
Venoge	Ecublens, Les Bois	2002	383.00	231.00	700.00	0.00	Rhône
Vispa	Visp	2003	659.00	778.00	2660.00	29.50	Rhône
Vorderrhein	Illanz	2002	693.00	776.00	2020.00	3.80	Rhein
Worble	Ittigen	1989	522.00	60.50	679.00	0.00	Aare

Tab. 1 Messstellen des nationalen Wassertemperaturmessnetzes des BAFU mit den wichtigsten Kenngrössen zu ihrem Einzugsgebiet (Stand 2007). Bei einigen Stationen sind zwei unterschiedliche Jahre für den Beginn der Messperiode angegeben. Dabei bezieht sich das frühere Jahr auf Beginn der Temperaturmessungen mittels Stichproben, das spätere Jahr auf den Messbeginn mit kontinuierlich erhobenen Daten.

Gebietshöhen sind in der *Tabelle 4* dargestellt.

– Gegenüber den unbeeinflussten Stationen in allen Höhenlagen zeigen sich der Seeeinfluss in höheren Sommer- und Wintertemperaturen, der Grundwassereinfluss in einer ausgeglicheneren Temperaturamplitude und der Einfluss von hydroelektrischen Speicherkraftwerken in höheren Wintertemperaturen und niedrigeren Sommertemperaturen *(Abb. 2a, b, c)*.

Fast alle ausgewerteten Stationen des nationalen Temperaturmessnetzes konnten eindeutig anhand ihres Temperaturregimes und anhand der Kenntnisse über die Temperatur beeinflussenden Faktoren in *15 Gruppen* eingeteilt werden *(Tab. 2)*. Bei der Glatt-Rheinsfelden war die Einteilung erschwert, weil kein eindeutiger Haupteinfluss zu erkennen ist, bzw. weil sich zwei Haupteinflüsse (Grundwasserexfiltration und Seeeinfluss) überlagern. Der Grundwassereinfluss wurde aufgrund des Temperaturregimes als bedeutender gewichtet. Bei der Lütschine-Gsteig können die relativ hohen Wintertemperaturen nicht erklärt werden. Diese Station wird jedoch als unbeeinflusst klassifiziert, da keine Kenntnisse von Einflussfaktoren ersichtlich sind.

	Höhenstufen			
Haupteinflüsse	**alpin**	**subalpin**	**montan**	**kollin**
Seeausfluss	Aare, Ringgenberg[4] (+0,5°C) ↑	Aare, Thun (+0,8°C) ↑ Aare, Bern (+0,9°C) ↑ Linth, Weesen (+1,0°C) ↑↑↑	Aare, Brugg (+0,9°C) ↓↑↑↑ Aare, Brügg, Aegerten (+1,0°C) ↓↑↑↑ Aare, Felsenau (+0,9°C) ↓↑↑↑ Aare, Hagneck (+0,9°C) ↑↑ Aare, Untersiggenthal (+0,9°C) Limmat, Baden (+1,0°C) ↓↑↑ Reuss, Luzern (+1,2°C) ↓↑↑↑ Reuss, Mellingen (+0,9°C) ↓↑↑↑ Rhein, Laufenburg (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rekingen (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rheinau (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rheinfelden (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Weil[2] (+1,1°C) ↓↑↑ Rhone, Chancy (+0,8°C) ↑↑↑ *Rhone, Genève*	*Canal de la Broye, Sugiez* *Tresa, Ponte Tresa*
Grundwasser	*Rom, Müstair*	*Grosstalbach, Isental* *R. di Calneggia, Cavergno*	*Suze, Sonceboz*	*Allaine, Boncourt* Birs, Münchenstein (+0,6°C) ↑↑↑ *Doubs, Ocourt* Glatt, Rheinsfelden[1] (+0,6°C) ↓↑↑↑ *Langeten, Huttwil* *Murg, Frauenfeld* *Murg, Wängi* *Rietholzbach, Mosnang* *Venoge, Ecublens* Worble, Ittigen[8] ↑↑
Speicher-kraftwerk	Aare, Brienzwiler (+0,2°C) Rhone, Porte du Scex (+0,4°C) Rhone, Sion (+0,2°C) *Vispa, Visp*	Engelberger Aa, Buochs[6] (+0,2°C) *Landquart, Felsenbach* Linth, Mollis (+0,4°C) Reuss, Seedorf (+0,4°C) Rhein, Diepoldsau (+0,5°C) ↑ *Vorderrhein, Illanz*	Arve, Genève (+0,4°C) Muota, Ingenbohl (+0,1°C) Saane, Gümmenen[5] (+0,7°C) ↑↑ *Sitter, Appenzell* Ticino, Riazzino[3] (+0,8°C) ↑↑	
unbeeinflusst bzw. keine ersichtlichen Haupteinflüsse	*Dischmabach, Davos* Inn, S-chanf[5] (+0,3°C) Lonza, Blatten[7] (–0,2°C) Lütschine, Gsteig[7] (+0,2°C) *Massa, Blatten bei Naters* *Poschiavino, La Rösa* *Rhone, Oberwald* *Rosegbach, Pontresina*	*Allenbach, Adelboden* *R. di Roggoisca, Roveredo* *Taschinasbach, Grüsch*	Alp, Einsiedeln Biber, Biberbrugg Emme, Emmenmatt 1 (+0,7°C) ↑↑ *Grossbach, Gross* *Necker, Mogelsberg* *R. di Pincascia, Lavertezzo* *Sense, Thörishaus* *Sperbelgraben, Wasen*	Broye, Payerne[1] (+1,0°C) ↑↑↑ *Goldach, Goldach* Kleine Emme, Littau[3] (+0,7°C) ↑ ↑ *Mentue, Yvonand* *Sellenbodenbach, Neuenkirch* Thur, Andelfingen (+0,8°C) ↑↑↑

Tab. 2 Klassifizierung der Messstellen des Wassertemperaturmessnetzes unter Berücksichtigung der mittleren Höhe des Einzugsgebietes gegenüber der Haupteinflüsse «See», «Grundwasserexfiltration», «Hydroelektrisches Speicherkraftwerk». Die neuen Stationen, die nach 2000 in Betrieb genommen wurden, sind kursiv gekennzeichnet. In Klammern ist die Differenz der mittleren Jahrestemperaturen der Periode 1988–2007 und 1974–1987 angegeben. Stationen mit weniger langen kontinuierlichen Zeitreihen sind mit Zahlen markiert ([1]: ab 1976; [2]: ab 1977; [3]: ab 1978; [4]: ab 1980; [5]: ab 1981; [6]: ab 1983; [7]: ab 1987; [8]: ab 1989).

↓↑ Ab- bzw. Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 15 und 18 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 18 und 21 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 21 und 24 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden > 24 °C seit Beginn der Messperiode

4.4 Repräsentativität

Aufgrund der Klassifizierung der Messstationen kann festgehalten werden, dass durch die Messnetzerweiterung seit 2000 die Repräsentativität deutlich erhöht wurde. Während die historischen Stationen hauptsächlich grosse, anthropogen beeinflusste Fliessgewässer des Mittellandes repräsentierten, werden aktuell auch kleine, nicht anthropogen beeinflusste Fliessgewässer in höheren Lagen erfasst *(Tab. 2)*. Die von einem See beeinflussten Stationen

	Wintertemperatur	Sommertemperatur
alpin	<2 °C	<10 °C
subalpin	<2 °C	10–15 °C
montan	<3 °C	13–20 °C
kollin	0,5–4 °C (sehr variabel)	16–22 °C

Tab. 4 Typische Temperaturbereiche von naturnahen Fliessgewässern ohne ersichtliche Beeinflussung mit Einzugsgebietshöhen der vier Höhenstufen.

	Obergrenze (m ü. M.)				Vegetation	Vegetation Obergrenze
	Nordalpen	Zentralalpen	Südalpen	Jura		
alpin	2400–2500	2700–3000	2400–2500		Zwergsträucher, Rasen	Vegetationsgrenze
subalpin	1800–2100 (2000)	2000–2500 (2300)	1800–2100 (2000)		Nadelwälder	Baumgrenze
montan	1100–1500 (1300)	1000–1800 (1500)	1700 (1700)	1300–1500 (1400)	Buchenwälder und Buchen-Nadelmischwälder/Nadelwälder (nur Zentralalpen)	Buche/Waldföhre (nur Zentralalpen
kollin	600–800 (700)	600–1000 (800)	800–1000 (900)	600–800 (700)	sommergrüne Laubwälder	Eichen

Tab. 3 Einteilung der Höhenstufen nach geobotanischen Kriterien. Es ist zu beachten, dass die Höhenstufen nicht durch eine klare Höhengrenze, sondern durch einen Grenzbereich getrennt sind. In Klammern sind die Höhen angegeben, welche für Einteilung der Temperaturmessstationen angenommen wurden. *(Quelle: [25])*

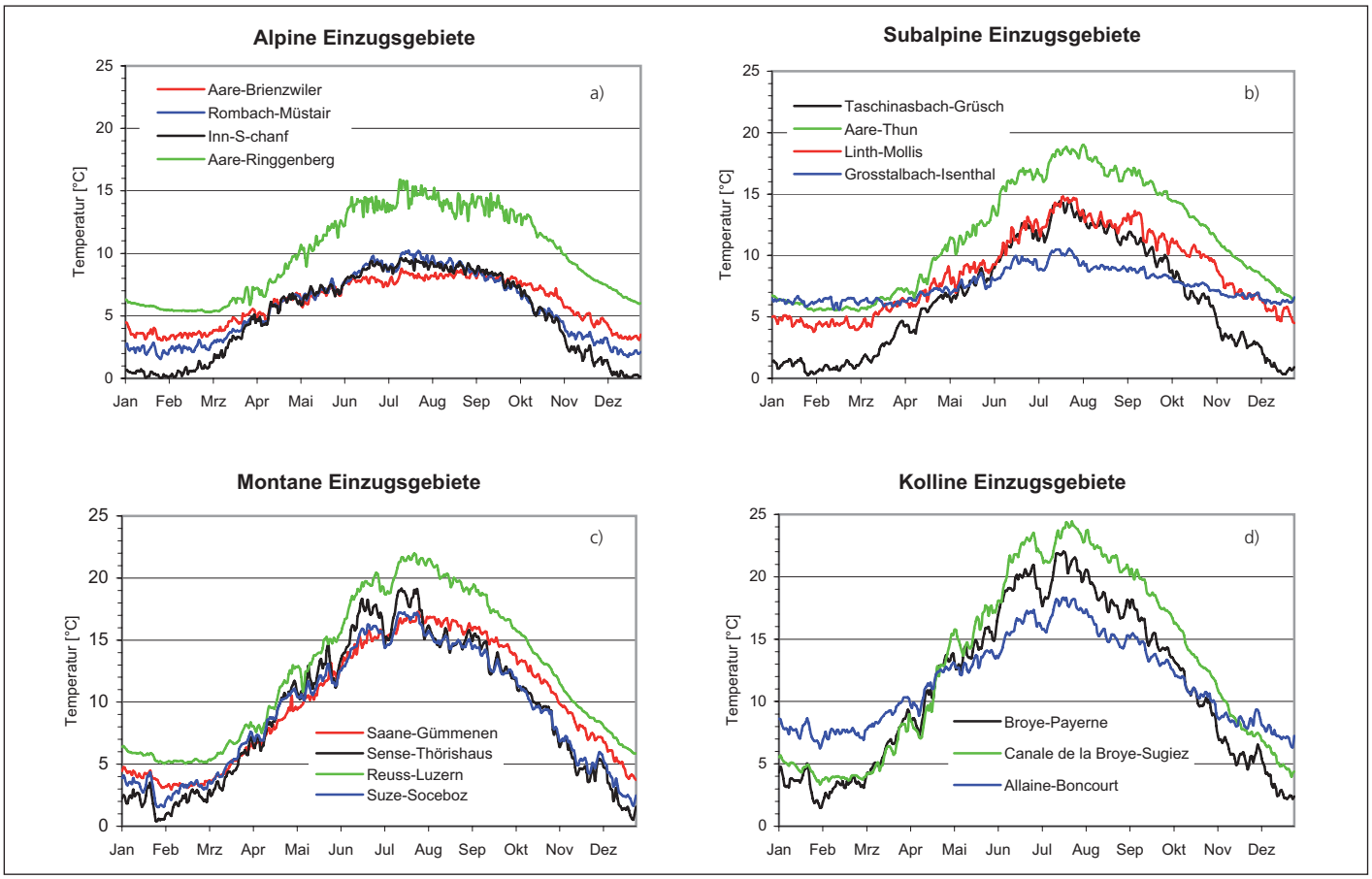

Abb. 2 Jahresganglinien der Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes. Je höher die mittlere Höhe des Einzugsgebietes ist, desto kälter sind die Winter- und Sommertemperaturen und desto kleiner sind die Temperaturamplituden. Ein Seeeinfluss *(grün)* erhöht tendenziell die Sommer- und Wintertemperaturen, ein Grundwassereinfluss *(blau)* hat eine ausgleichende Wirkung auf die Temperaturamplituden und hydroelektrische Speicherkraftwerke *(rot)* erhöhen die Wintertemperaturen und erniedrigen tendenziell die Sommertemperaturen. Die Jahresganglinie von unbeeinflussten Stationen ist *schwarz* dargestellt. Die Werte entsprechen den durchschnittlichen Tagesmittelwerten über die Jahre 2003–2007.

mit montaner Einzugsgebietshöhe sind jedoch immer noch sehr stark im Messnetz vertreten, während Stationen, welche sich in montaner bis alpiner Lage befinden und vom Grundwasser beeinflusst sind, eher schwach vertreten sind. Je nach Ausrichtung der zukünftigen Erhebungen der Wassertemperaturen und je nach Schwerpunktsetzung der Fragestellungen besteht in diesem Bereich noch ein Potenzial, das im Bedarfsfall und mit den entsprechenden Ressourcen noch weiter ausgeschöpft werden kann.

5. Wassertemperaturwandel

5.1 Jahresmitteltemperaturen

Die Zeitreihen der Wassertemperaturen zeigen seit Beginn der Messperiode eine Zunahme der Jahresmittelwerte bei der Mehrheit der Stationen um 0,1–1,2 °C, wobei ein markanter Anstieg zwischen 1987 und 1988 ersichtlich ist *(Abb. 3)* [9, 18]. Dieser Temperatursprung zwischen 1987 und 1988 kann auf eine Änderung des Nordatlantischen Oszillationsindexes zurückgeführt werden und ist also klimatisch bedingt [9, 17]. Aufgrund dieser Tatsache wurden für viele Darstellungen die beiden Perioden 1974–1987 und 1988–2007 einander gegenübergestellt. Bei 28 Stationen wurde eine Analyse der Tagesmittelwerte für die Perioden 1974–1987 und 1988–2007 durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass bei den Stationen Lütschine-Gsteig und Lonza-Blatten die Daten bis 1986 als Stichproben erhoben wurden. Aufgrund des Zeitpunktes der Stichprobenentnahme sind die historischen Daten der Lütschine mit den Tagesmittelwerten der aus den kontinuierlich erhobenen Daten nach 1987 vergleichbar. Hingegen wurden für den Vergleich der Jahresmittelwerte bei der Station Lonza-Blatten die Stichproben bis 1986 mit den Stundenmittelwerten der kontinuierlichen Daten zum Zeitpunkt der Stichprobe verwendet. Bei zehn Stationen fehlen Messungen einzelner Jahre vor 1987 *(Tab. 1 und 2)*. Die Auswirkungen auf die Periodenauswertung sind allerdings marginal.

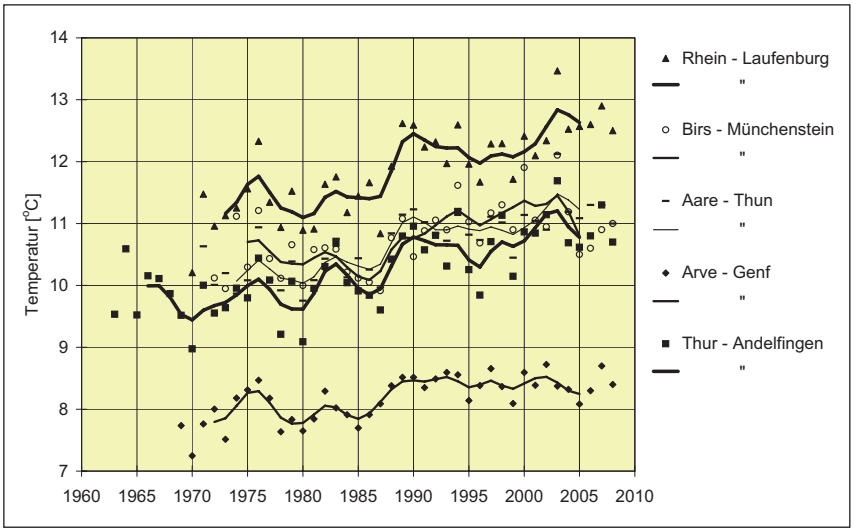

Abb. 3 Entwicklung der mittleren jährlichen Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen. Auffällig ist der Temperatursprung zwischen 1987 und 1988, der bei allen Stationen ersichtlich ist. Der Temperatursprung ist vor allem bei Messstationen wie z. B. Arve-Genf, die im Einflussbereich von Gletschern liegen, weniger deutlich.

Die festgestellten Temperaturveränderungen zwischen den beiden Perioden sind bei allen Stationen mit langjährigen Messreihen in der *Tabelle 2* aufgeführt. Die *Resultate* können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Je höher die mittlere *Höhe* des Einzugsgebietes und je höher der Grad der *Vergletscherung* im Einzugsgebiet ist, desto weniger deutlich ist die Temperaturzunahme bzw. ist sogar eine Temperaturabnahme zu verzeichnen (z. B. Lonza-Blatten).
- Bei den Stationen mit *Seeeinfluss* ist die Temperaturzunahme deutlicher als bei Stationen in vergleichbarer Höhenstufe ohne Seeeinfluss. Die Stationen mit mittlerer Einzugsgebietshöhe der montanen Stufe zeigen mit 0,8–1,2 °C die stärkste Erwärmung. Vergleichbare Daten der kollinen Höhenstufe fehlen jedoch.
- Bei den durch *hydroelektrische Nutzung* beeinflussten Stationen mit subalpiner und montaner Einzugsgebietshöhe variiert die Grössenordnung der Temperaturzunahme stark und liegt im Bereich von 0,1–0,8 °C.
- In der *kollinen Stufe* zeigen die Stationen mit Grundwassereinfluss (Glatt-Rheinsfelden, Birs-Münchenstein) eine weniger ausgeprägte Temperaturzunahme als die unbeeinflussten Stationen.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Seen im Einzugsgebiet eine klimatisch bedingte Temperaturzunahme verstärken. Demgegenüber wirkt sich ein Grundwassereinfluss dämpfend auf eine Temperaturerhöhung aus. Ein hoher Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet kompensiert aufgrund der Gletscherschmelze im Sommer eine klimatisch bedingte Temperaturerhöhung teilweise, weshalb die Temperaturzunahme bei den alpinen Stationen weniger ausgeprägt ist als bei tiefer gelegenen Stationen. Inwiefern die hydroelektrische Nutzung einen dämpfenden Einfluss auf eine mögliche klimatisch bedingte Erwärmung der Fliessgewässer hat, kann aufgrund der fehlenden Datenlage nicht beantwortet werden, da langjährige konsistente Messreihen von unbeeinflussten alpinen Stationen fehlen. Hinweise auf eine mögliche Dämpfung könnten die relativ geringen Temperaturzunahmen (0,1–0,4 °C) bei Stationen, welche durch hydroelektrische Nutzung beeinflusst sind, sich in tieferen Lagen befinden und eine geringe Vergletscherung des Einzugsgebietes aufweisen, sein.

Die Temperaturentwicklung zeigt, dass sich Flora und Fauna der Gewässer langfristig an

wärmere Bedingungen anpassen müssen. Arten, die in Mittel- oder Unterläufen beheimatet sind, werden sich flussaufwärts in Regionen verschieben, die ihnen früher noch zu kühl waren. So hat sich beispielsweise die Forellenregion bereits um 100–200 m [18] in höhere Lagen verschoben. Das Vorkommen der Alpen-Mosaikjungfer – eine in Stillgewässern vorkommende Art – hat sich um 200–500 m in höhere Lagen verschoben [20]. Zudem hat sich die Biodiversität von Pflanzen im Alpenraum oberhalb von 2900 m ü.M. signifikant erhöht [26].

5.2 Saisonale Veränderungen

In der aktuelleren Periode 1988–2005 ist im Vergleich zur Periode 1974–1987 bei praktisch allen Stationen im Frühling ein rascherer Temperaturanstieg zu beobachten als dies in früheren Jahren der Fall war *(Abb. 4)*. Eine Ausnahme bildet die Muota bei Ingenbohl *(Abb. 4d)*, bei welcher sich verschiedene Einflüsse überlagern. Die Muota liegt in einem Karstgebiet und ist zudem aufgrund der hydroelektrischen Nutzung stark durch Schwallbetrieb beeinflusst und weist deshalb extrem hohe Abflussschwankungen im Bereich < 20 % bis 80 % des mittleren normalen Jahresabflusses auf. Bei den alpinen und subalpinen Stationen liegt die Temperaturerhöhung im Frühling im Bereich von ca. 1 °C im März *(Abb. 4a, b)*, bei den montanen und kollinen Stationen bei bis zu 3 °C im Mai *(Abb. 4h)*. Auch lassen sich bei allen nicht alpinen Stationen eine Erhöhung der Sommertemperaturen und eine Verlängerung der sommerlichen Wärmeperiode feststellen. Auch diese Entwicklung entspricht den Beobachtungen der Lufttemperaturen in diesem Zeitraum [27] und ist ebenfalls ein Hinweis darauf, dass diese Temperaturveränderungen klimatisch bedingt sind. Bei den von Seen beeinflussten Stationen sind die Temperaturerhöhungen am grössten, wobei die mittlere Temperaturzunahme im Winter ca. 1 °C und im Sommer ca. 1,5–3 °C beträgt, was auf die hohe Wärmespeicherkapazität von Seen zurückzuführen ist *(Abb. 4f)*. Der Grundwassereinfluss wirkt sich dämpfend auf die sommerliche Temperaturzunahme aus, weil dann die Temperaturdifferenz zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser am grössten ist. Dies ist am Beispiel der Glatt-Rheinsfelden ersichtlich, wo die sommerliche Temperaturerhöhung niedriger ist als diejenige im Frühling *(Abb. 4g)*. Bei den alpinen und durch Gletscher beeinflussten Stationen wie z.B. bei der Lütschine-Gsteig und Rhone-Sion, ist die Temperaturerhöhung im Sommer weniger ausgeprägt oder sogar negativ, weil der Temperaturanstieg im Sommer durch vermehrtes Gletscherschmelzwasser teilweise kompensiert bzw. überkompensiert wird *(Abb. 4a, b)*. Dagegen sind die Herbsttemperaturen im Vergleich zu früheren Jahren bei den alpinen Stationen deutlich höher. Möglicherweise wirken sich bei den alpinen Stationen klimabedingte Temperaturerhöhungen aufgrund der geringen Wasserführung im Herbst am stärksten aus.

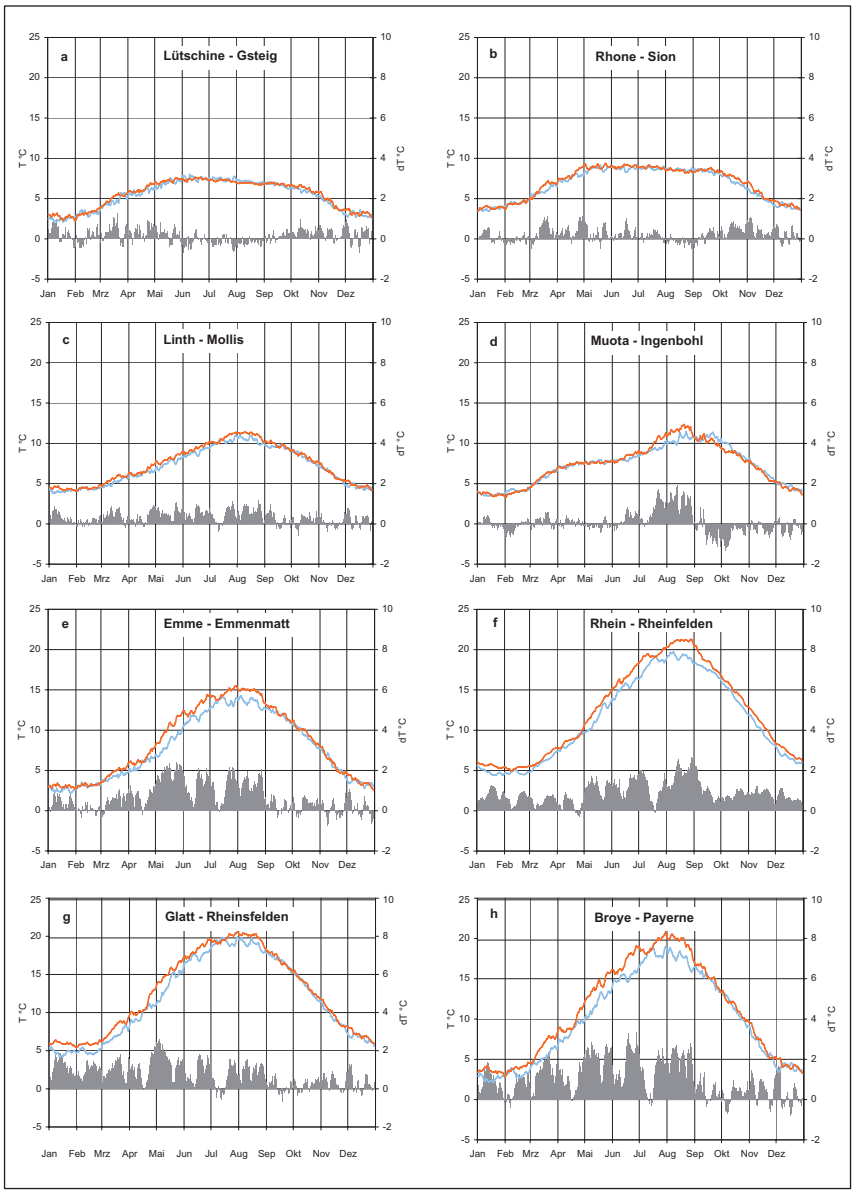

Abb. 4 Saisonaler Verlauf der Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes. Die blaue Linie bezieht sich auf die Messperiode 1974–1987 (Lütschine, Rhone, Linth, Muota, Rhein) bzw. 1976–1987 (Emme, Glatt, Broye), die rote Linie bezieht sich auf die Messperiode 1988–2005. Die schwarz eingezeichneten Säulen zeigen die Temperaturdifferenzen zwischen den mittleren Temperaturen 1988–2005 und 1976–1987 bzw. 1974–1987 und beziehen sich auf die rechte Y-Achse.

Die Erhöhung der Winter- und Frühlingstemperaturen verlängert die Wachstumsphase der Fauna und Flora allgemein. Bei lachsartigen Fischen wirken sich höhere Wintertemperaturen positiv auf die Eientwicklung aus. Durch höhere Sommertemperaturen werden die Karpfenartigen und Barsche auf Kosten der Lachsartigen, deren Stoffwechsel an tiefe Temperaturen angepasst ist, bevorteilt [19]. Bei Libellenlarven beschleunigen höhere Winter- und Frühlingstemperaturen die Emergenz. So konnten beispielsweise in verschiedenen Stillgewässern bei der Hufeisen-Azurjungfer bereits phänologische Veränderungen beobachtet werden [20].

5.3 Stundenwerte über 15 °C

Für insgesamt 38 Stationen konnte die Anzahl Stunden in den verschiedenen Temperaturwertebereichen langfristig berechnet werden, wobei sich bei rund einem Viertel dieser Stationen alle Werte unter 15 °C (Schwellenwert für PKD-Mortalität) befinden. Um die Häufigkeit hoher Wassertemperaturen zu erfassen, wurde die Anzahl Stunden ausgezählt, welche innerhalb von jeweils fünf Jahren eine Wassertemperatur von 15 °C überschritten haben. Als weitere Klassengrenze wurden aufgrund der vorgängig ausgeführten Überlegungen zur ökologischen Bedeutung der Temperatur die Werte 18 °C, 21 °C und 24 °C gewählt. Die Stundenwerte aller Stationen sind im *hydrologischen Atlas der Schweiz* (HADES) auf der Karte in Tafel 7.7 dargestellt [10].

Zwischen 1976 und 2005 lässt sich in allen Höhenlagen der Messstationen eine Zunahme der Stunden mit höheren Temperaturen feststellen (*Tab. 2)* [10]. In den montanen und subalpinen Gewässern ohne Seeeinfluss sowie in den kollinen Gewässern mit Grundwassereinfluss nehmen hauptsächlich die Stunden mit Temperaturen zwischen 15 und 18 °C bzw. 15 und 21 °C zu, was für diese Fliessgewässer bereits als hohe Temperatur bezeichnet werden muss. In den grösseren Gewässern mit Seeeinfluss nimmt die Anzahl Stunden zwischen 15 °C und 18 °C eher ab, während die Anzahl Stunden über 18 °C meist ansteigt. Der Zwischenbereich 15–18 °C wird bei diesen Messstellen im Frühling und Herbst schneller durchlaufen, dagegen verharren die Temperaturen im Sommer länger im hohen Temperaturbereich. Stunden mit Temperaturen über 24 °C werden hauptsächlich in den Flüssen mit montanem Einzugsgebiet unterhalb von Seen festgestellt, was auf die starke Erwärmung des Oberflächenwassers in Seen bei lang anhaltenden warmen Wetterlagen zurückzuführen ist. Auch in unbeeinflussten Fliessgewässern mit kollinem Einzugsgebiet wie z.B. in der Thur-Andelfingen oder Broye-Payerne treten vermehrt Temperaturen über 24 °C auf.

Die Folgen von hohen kurzfristig auftretenden Temperaturen können Fischsterben sein. Ein massives Fischsterben ereignete sich im August 2003 im Rhein: Zwischen Bodensee-Untersee und Eglisau verendeten hitzebedingt ca. 52 000 Äschen [28]. Bei den Wirbellosen leiden vor allem die Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven unter hohen Temperaturen. Für Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven konnten mittlere Letaltemperaturen im Bereich von 20–29 °C beobachtet werden [22]. Andere Wirbellose sind mit Letaltemperaturen im Bereich von 30 °C toleranter gegenüber warmen Wassertemperaturen. Ein weiteres biologisches Phänomen ist das Vorkommen von Süsswasserquallen in Seen, welche im Hitzesommer 2003 im Neuenburgersee aufgrund hoher Temperaturen beobachtet wurden. Quallen können sich nur bilden, wenn die Idealtemperatur von 25–27 °C erreicht wird [28].

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine grobe Klassifizierung der Stationen anhand ihres Temperaturregimes konnte unter Einbezug der Kenntnisse über die klimatischen Bedingungen sowie über natürliche und anthropogene Einflüsse im Einzugsgebiet der jeweiligen Fliessgewässer vorgenommen werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Haupteinflüsse nicht immer einfach und eindeutig identifiziert werden können, weil sie sich zum Teil überlagern und sich unterschiedlich auf das Temperaturregime auswirken.

Aufgrund der Klassifizierung der Messstationen kann festgehalten werden, dass sich seit der Erweiterung des Messnetzes dessen Repräsentativität stark erhöht hat, indem neu auch anthropogen unbeeinflusste und kleinere Einzugsgebiete im Messnetz erfasst werden. Das heutige Messnetz stellt damit eine gute Basis für die Erfassung der Entwicklung der Wassertemperaturen in Schweizer Fliessgewässern dar.

Die Klassifizierung hat gezeigt, dass von den diskutierten Einflüssen sich insbesondere die Grundwasserexfiltration sehr deutlich im Temperaturregime der entsprechenden Messstationen zeigt. Dieser Einfluss wurde in den bisherigen Auswertungen zu wenig berücksichtigt und nicht quantifiziert. Insbesondere bei der Modellierung der Temperaturverhältnisse, bei welcher die enge Beziehung zwischen Luft- und Wassertemperatur berücksichtigt wird, sollte der Grundwassereinfluss ebenfalls einbezogen werden. Dies vor allem im Hinblick auf eine Bewertung der Temperaturverhältnisse, die z.B. in das Modul-Stufen-Konzept des BAFU [29] eingegliedert werden könnte. Eine grosse Herausforderung stellt hierbei die Tatsache, dass sich der Grundwassereinfluss entlang des Flusslaufes ändert und sich somit, je nach Standort der Messstationen, unterschiedlich stark auf das Temperaturregime auswirkt. Interessant in diesem Zusammenhang ist auch die Frage, inwieweit sich im Bereich von Grundwasserexfiltrationen aufgrund deren ausgleichenden Wirkung auf das Temperaturregime bei extremen Wassertemperaturen Rückzugshabitate für Fische und Wirbellose bilden können. Um das Verständnis über den Einfluss des Grundwassers auf das Temperaturregime von Fliessgewässern zu erweitern, wäre es deshalb prüfenswert, noch

mehr Messstationen im Bereich von Grundwasserexfiltrationen zu errichten.

Langfristige Änderungen in den Wassertemperaturen – sowohl in den Jahresmittelwerten als auch im saisonalen Temperaturregime – konnten bei praktisch allen Messstationen festgestellt werden. Dabei sind deutliche Temperaturzunahmen in Fliessgewässern in tieferen Lagen und Temperaturabnahmen in alpinen Fliessgewässern mit einem hohen Anteil an Vergletscherung im Einzugsgebiet ersichtlich. Die Ursachen für diese Temperaturveränderungen können jedoch nicht immer eindeutig eruiert werden, da die langfristigen Messreihen zum grössten Teil bei den anthropogen beeinflussten Fliessgewässern existieren und deshalb klimatisch bedingte, natürliche Einflüsse und anthropogene Einflüsse kombiniert auf das Temperaturregime einwirken.

Die Veränderungen der Wassertemperaturen liegen jedoch in einem Bereich, welcher Anpassungen der Biologie zur Folge hat. Eine solche Anpassung der aquatischen Fauna findet bereits statt, was Beobachtungen in der Phänologie und in der Artenzusammensetzung von aquatischen Organismen bestätigen. Die vorhandenen biologischen Daten können nicht absolut eindeutig den gemessenen Temperaturveränderungen zugeordnet werden, weil oft parallel auch andere anthropogene Einflüsse die Lebensbedingungen der aquatischen Fauna verändern. In diesem Bereich ist deshalb noch ein grosser Forschungsbedarf vorhanden. Das nationale Messnetz bietet hierfür eine gute Grundlage, die es zu nutzen gilt.

Literaturverzeichnis

[1] *Baumgartner, A.; Liebscher, H.J.* (1990): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie, Bd. 1; 673 S.; Gebrüder Borntraeger, Berlin – Stuttgart.

[2] *Meier, W.; Bonjour, C.; Wüest, A.; Reichert, P.* (2003): Modeling the Effect of Water Diversion on the Temperature of Mountain Streams. Journal of Environmental Engineering 755–764.

[3] *Meier, W.; Wüest, A.* (2004): Wie verändert die hydroelektrische Nutzung die Wassertemperatur der Rhone? Wasser Energie Luft, 96, 11/12 305–309.

[4] *BAFU, Bundesamt für Umwelt:* Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz, Bern-Ittigen.

[5] *de Montmollin, F.; Jakob, A.* (1995): Temperaturverhältnisse in Fliessgewässern und Seen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz; Tafel 7.3. Landeshydrologie und -geologie, Bern.

[6] *de Montmollin, F.; Parodi, A.* (1990): Température des cours d'eau suisses, Mitteilung Nr. 12 der Landeshydrologie und -geologie, Bern. 96 S.

[7] *Jakob, A.* (2000): Temperaturentwicklung in den Fliessgewässern. Mitteilung zur Fischerei 66, 29–40, BUWAL.

[8] *Jakob, A.; Liechti, P.; Binderheim, E.* (2002): 30 Jahre NADUF – Eine Zwischenbilanz. gwa, 3/02 203–208.

[9] *Jakob, A.; Liechti, P.; Schädler, B.* (1996): Temperatur in Schweizer Gewässern – Quo vadis? gwa, 4/96 288–294.

[10] *Jakob, A.; Pfammatter, F.; Schädler, M.* (2007): Veränderungen der Temperaturen in Fliessgewässern 1976–2005. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 7.7. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[11] *Moore, J. A.; Miner, J.R.* (1997): Stream Temperatures – Some Basic Considerations, 2–6, Oregon State University.

[12] *Moosmann, L.; Schmid, M.; Wüest, A.* (2005): Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe. Eawag.

[13] *Binder, W.* (1980): Landschaftsökologische Gesichtspunkte bei der Gewässerregulierung und der Gewässerpflege. In: Institut f. Wassergüte und Landschaftswasserbau der TU Wien (Hg.), Landschaftswasserbau, Bd. 1 30–51.

[14] *Ward, J.V.* (2003): The Ecology of Alpine Streams. Eawag news 54.

[15] *Pfammatter, F.* (2004): Untersuchungen zur Wassertemperatur in schweizerischen Fliessgewässern. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

[16] *Krejci, V.; Frutiger, A.; Kreikenbaum, S.; Rossi, L.* (2004): Projekt «STORM: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter» – Gewässerbelastungen durch Abwasser aus Kanalisationen bei Regenwetter. Broschüre Eawag und BUWAL, 36 S.

[17] *Livingstone, D.M.; Dokulil, M.T.* (2001): Eighty years of spatially coheren Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation. Limnology and Oceanography 46 1220–1227.

[18] *Hari, R.E.; Livingstone, D.M.; Siber, R.; Burkhardt-Holm, P.; Güttinger, H.* (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology 12 10–16.

[19] *Küttel, S.; Peter, A.; Wüest, A.* (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fliessgewässer. Rhône Revitalisierung Publikation Nummer 1.

[20] *Oertli, B.; Rosset, V.; Lehmann, A.* (2009): Biodiversity in alpine ponds: an indicator of climate warming? Vortrag im Rahmen der Tagung der SGHL «Schnee, Eis und Wasser im Alpenraum – aktueller denn je!». Link: *http://chy.scnatweb.ch/d/Aktuell/Veranstaltungen/documents/Oertli.pdf.*

[21] *Troschel, J.* (1994): Anforderungen an Krebsgewässer. In: Mitteilungen zur Fischerei 52 47–52, BUWAL.

[22] *Davies, P.; Cook, B.; Rutherford, K.; Walshe, T.* (2004): Managing high in-stream temperatures using riparian vegetation. River and riparian land management technical guideline Number 5.

[23] *Gerster, S.* (2006): PKD – Die Proliferative Nierenkrankheit. Faltblatt, Fischereiberatung (FIBER) Eawag, Kastanienbaum.

[24] *BAFU* (2007): Wassertemperaturmessungen des Bundesamtes für Umwelt, Abteilung Hydrologie (Stand 2007). Interner Konzeptbericht, 14 S.

[25] *Baltisberger, M.* (2009): Systematische Botanik – Einheimische Farn- und Samenpflanzen. 3., korrigierte Auflage, vdf-Hochschulverlag, 328 S.

[26] *Pauli, H.; Gottfried, M.; Reiter, K.; Klettner, C.; Grabherr, G.* (2007): Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. Global Change Biology 13 147–156.

[27] *Rebetez, M.; Reinhard, M.* (2007): Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. Theoretical and Applied Climatology.

[28] *BUWAL, BWG, MeteoSchweiz* (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern-Ittigen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 174 S.

[29] *BUWAL* (1998): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer in der Schweiz. Modul-Stufen-Konzept. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 26 des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft.

Keywords

Wassertemperatur – Entwicklung – Klimawandel – Messnetz

Adressen der Autoren

Adrian Jakob, Dr. phil. nat.
Bundesamt für Umwelt BAFU
CH-3003 Bern
Tel. +41 (0)31 324 76 71
Fax +41 (0)31 324 76 81
adrian.jakob@bafu.admin.ch

Evi Binderheim, Dr. sc. techn.
Sponsolim Umweltconsulting
Dachslenbergstr. 51, CH-8180 Bülach

Miriam Schädler, dipl. natw.
Spitalackerstr. 7, CH-3013 Bern

Fabian Pfammatter, lic. phil. nat.
Raumplanung + Umwelt AG
Büro für nachhaltige Raumentwicklung und Umweltplanung
Sebastiansplatz 1
CH-3900 Brig-Glis

Verdankungen

Die vorliegende Publikation wäre ohne die zuverlässige und sorgfältige langjährige Arbeit im Feld und in der Datenbearbeitung nicht möglich. Die Autoren danken deshalb den zahlreichen beteiligten Mitarbeitenden der Abteilung Hydrologie des Bundesamts für Umwelt sowie den lokalen Betreuern der Stationen.

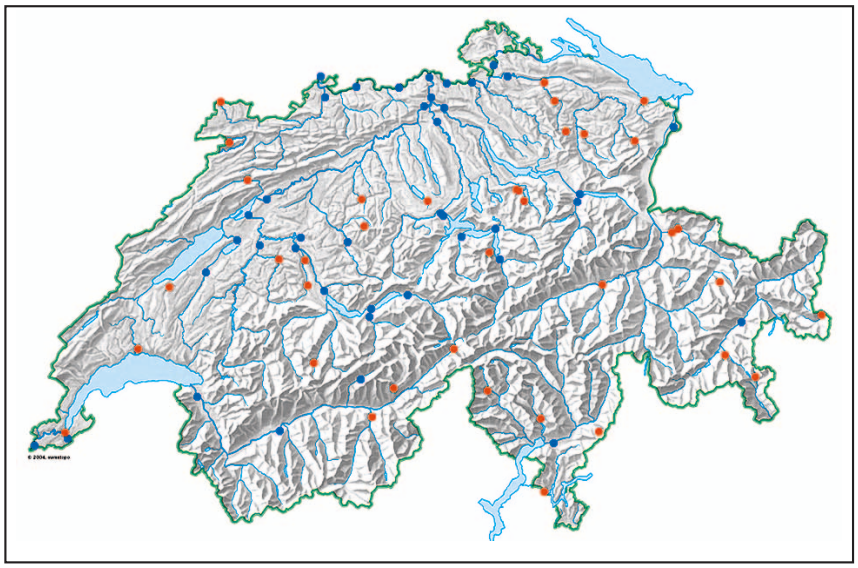

Abb. 1 Überblick über die Lage der Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes (Stand 2008): Blaue Punkte markieren diejenigen Stationen, die vor 2000 in Betrieb genommen wurden, orange Punkte markieren diejenigen Stationen, die nach 2000 in Betrieb genommen wurden.

Temperaturverhältnisse eines Fliessgewässers durch *anthropogene Einflüsse* wie z.B. durch hydroelektrische Speicherkraftwerke oder Kühl- und Abwassereinleitungen verändert [2, 3].

Die *Gewässerschutzverordnung* (GSchV) legt die Anforderungen für die Temperaturverhältnisse in Oberflächengewässern fest. Demnach muss die Wasserqualität so beschaffen sein, dass die Temperaturverhältnisse naturnah sind. Zudem dürfen durch Wasserentnahmen, Wassereinleitungen und bauliche Eingriffe die Temperaturverhältnisse des Gewässers nicht derart verändert werden, dass die für das Gewässer typischen Lebensgemeinschaften nicht mehr gedeihen können. Gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand darf die Temperatur eines Fliessgewässers durch Wärmeeintrag oder -entzug um höchstens 3 °C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1,5 °C verändert werden, wobei die Wassertemperatur grundsätzlich 25 °C nicht übersteigen darf.

Im Rahmen der *nationalen Umweltbeobachtung* betreibt die Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) nebst anderen ein *Messnetz* zur Überwachung der Wassertemperaturen an ausgewählten Fliessgewässern *(Abb. 1)*. Die Messergebnisse werden regelmässig im *Hydrologischen Jahrbuch* der Schweiz [4] publiziert und im Internet dargestellt (*www.bafu.admin.ch/hydrologie*); sie können auch direkt beim BAFU bezogen werden.

Im Folgenden wird das Anfang der 2000er-Jahre erweiterte Temperaturmessnetz des Bundes vorgestellt und unter dem Aspekt der Repräsentativität anhand einer Klassifizierung der Stationen diskutiert. Im Weiteren werden die erhobenen Daten zusammengefasst dargestellt, langfristige Änderungen der Wassertemperaturen werden aufgezeigt und im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die aquatische Fauna diskutiert.

Weitere Publikationen zum Temperaturmessnetz des Bundes finden sich in [5, 6, 7, 8, 9, 10].

2. Einflussfaktoren

Das mittlere Jahrestemperaturregime an einer bestimmten Stelle im Fliessgewässer weist einen sinusähnlichen Verlauf auf, der um einige Wochen verzögert der Kurve der mittleren Lufttemperatur am betreffenden Ort folgt, wobei der Temperaturanstieg meist langsamer als der Temperaturabfall ist. Dieser mehr oder weniger ausgeprägte Jahresgang des Temperaturverlaufes ist in erster Linie das Resultat von klimatischen Faktoren, wie Sonneneinstrahlung, Abstrahlung, Niederschlag, Verdunstung, Kondensation, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Wärmeaustausch mit dem Untergrund und der Luft [1]. Kurzfristige und langfristige Abweichungen sowie Abschwächungen und Verstärkungen von diesem sinusähnlichen Verlauf werden von den folgenden *natürlichen* und *anthropogenen Einflüssen* bewirkt:

Meteorologische Verhältnisse

Eine Schlechtwetterlage bewirkt im Sommer eine Abkühlung, da einerseits die Sonneneinstrahlung und damit die Erwärmung des Wassers reduziert werden und andererseits mit dem Niederschlag kälteres Wasser in das Fliessgewässer gelangt. Im Winter hingegen bewirkt eine Schlechtwetterlage eine Erwärmung des Wassers, da einerseits die Wärmeabstrahlung bzw. die Abkühlung des Wassers vermindert wird und andererseits das Niederschlagswasser bei Regen im Winter meist höhere Temperaturen als das Flusswasser aufweist, weil die Temperaturamplituden im Boden geringer sind. Meteorologische Einflüsse wirken kurzfristig und können grosse jährliche Unterschiede in den Temperaturganglinien bewirken.

Ökomorphologie

Ein grosses Gefälle und eine grosse Bettrauhigkeit bewirken aufgrund der grösseren Reibung eine Temperaturzunahme in einem Fliessgewässer [11]. Vor allem bei alpinen Fliessgewässern im Winter bei niedrigem Abfluss kann dies zu tendenziell höheren Wintertemperaturen führen als aufgrund der klimatischen Bedingungen zu erwarten wären. Die Vegetation entlang eines Fliessgewässers kann durch Beschattung vor allem im Sommer Abweichungen gegenüber unbeschatteten Gewässern um mehrere Grad Celsius bewirken [12].

Grundwassereinfluss

Grundwasserexfiltrationen bewirken eine Glättung der Jahresganglinie des entsprechenden Fliessgewässers. Sie haben geringere Temperaturamplituden zur Folge, als dies bei vergleichbaren Fliessgewässern ohne relevante Grundwasserexfiltration der Fall ist. Dies, weil das Grundwasser über das ganze Jahr hinweg eine relativ konstante Temperatur aufweist, welche in der Regel der Jahresmitteltemperatur der Luft am betreffenden Ort entspricht [13]. Zudem wirkt sich ein starker Grundwassereinfluss dämpfend auf kurzfristige, wetterbedingte Temperaturschwankungen aus, was insbesondere im Winter bei niedrigem Abfluss ersichtlich ist.

Schnee- und Gletscherschmelze

Ein hoher Anteil an Schnee- und Gletscherschmelzwasser am Gesamtabfluss eines Fliessgewässers führt vor allem im Sommer zu tieferen Wassertemperaturen, bewirkt eine Verringerung der Jahrestemperaturamplitude und reduziert die Ausgangstemperatur eines Fliessgewässers [14].

Seen

Seen haben die Funktion eines Wärmespeichers. Sie erwärmen sich im oberflächennahen Bereich im Sommer aufgrund ihrer grossen Oberfläche und dem stehenden Wasser viel stärker als Fliessgewässer. Im Herbst und Winter hingegen kühlen sich Seen aufgrund ihres grösseren Volumens und der hohen Wärmespeicherkapazität viel weniger schnell ab. Seeausflüsse zeigen deshalb im Sommer und im Winter generell höhere Temperaturen als Seezuflüsse. Der Jahresmittelwert der Messstation beim Zufluss kann bis zu 5 °C tiefer sein als jener beim Seeausfluss [15].

Hydroelektrische Speicherkraftwerke

Diese wirken sich unterschiedlich auf das Temperaturregime eines Fliessgewässers aus. Auf Restwasserstrecken bewirkt die hydroelektrische Nutzung infolge des geringeren Abflusses im Winter eine Abnahme und im Sommer eine Zunahme der Wassertemperatur. Auf Gewässerabschnitten, die unterhalb der Wasserrückgabestelle liegen, wird die Wassertemperatur durch das aus dem Stausee turbinierte Wasser im Winter aufgewärmt und im Sommer abgekühlt [2]. In der Rhone beispielsweise wird die Temperatur im Winter durch den Kraftwerkseinfluss um etwa 2 °C erhöht und im Sommer um rund 1 °C reduziert [2].

Kühlwassereinleitungen

Kühlwassereinleitungen aus thermischen Kraftwerken bewirken grundsätzlich eine Erwärmung des Wassers. Im Winter ist sie stärker als im Sommer. Die Temperatur der Aare wird beispielsweise durch die Kühlwassereinleitung des Kraftwerks Mühleberg durchschnittlich um 1,3 °C erhöht, im Winter sogar um bis zu 3,4 °C [2].

Abwassereinleitungen

Abwassereinleitungen bei Regenwetter aus Misch- und Trennsystemen können speziell in kleinen Gewässern zu einem temporären Temperaturanstieg führen, da das Wasser von versiegelten Flächen in den meisten Fällen um einige Grade wärmer ist als das Fliessgewässer [16].

Klimaänderung

Änderungen von klimatischen Faktoren wirken sich direkt auf die Wassertemperaturen aus. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass Änderungen des *Nordatlantischen Oszillation Indexes* (NAO) einen grossen Einfluss sowohl auf die Wassertemperaturen von Seen in ganz Zentraleuropa [17] als auch auf die Temperaturen der Fliessgewässer in der Schweiz haben [18].

3. Ökologische Bedeutung

Die Temperatur beeinflusst die physikalischen und chemischen Prozesse sowie die biologischen und biochemischen Vorgänge im Wasser und wirkt sich somit indirekt und direkt auf die *aquatischen Organismen* aus.

Die Löslichkeit von Gasen nimmt mit steigenden Temperaturen ab. So enthält wärmeres Wasser weniger gelösten Sauerstoff, welcher für aquatisches Leben essentiell ist. Die Stoffwechselvorgänge werden mit steigenden Temperaturen beschleunigt und der Sauerstoffbedarf nimmt zu, was bei gleichzeitig verringertem Sauerstoffangebot für viele Organismen zu Stress führen kann. Die Temperatur bestimmt auch Dauer, Verlauf und Geschwindigkeit des Wachstums. Bei *Fischen* beispielsweise können Temperaturveränderungen zu Verschiebungen der Laichzeiten führen [19]. Bei *Makroinvertebraten* beeinflussen Temperaturveränderungen die Generationsdauer und bewirken damit eine Verschiebung des Zeitpunktes der Emergenz, was den gesamten Lebenszyklus verändern kann [20].

Die Lebensfähigkeit und -aktivität aquatischer Organismen hängt zudem von optimalen Temperaturbereichen und Temperaturextremwerten ab. Die optimalen und letalen Temperaturbereiche sind je nach Organismen unterschiedlich. So können beispielsweise bei Forellen, Felchen oder Äschen ab ca. 18 °C Stresssymptome auftreten und Temperaturen über 25 °C bereits tödlich sein. Karpfen, Barsche und Hechte hingegen ertragen hohe Temperaturen besser [19]. Der Edelkrebs bevorzugt die wärmeren Gewässer mit Temperaturen bis maximal 24 °C im Gegensatz zum Steinkrebs, der eher kühlere Gewässer mit Temperaturen bis maximal 20 °C favorisiert [21]. Bei den Wirbellosen bevorzugen Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven grundsätzlich niedrigere Temperaturen als z.B. Köcherfliegenlarven und Libellenlarven [22].

Stark temperaturabhängig ist auch der Ausbruch von *Krankheiten* bei Fischen wie beispielsweise der *proliferativen Nierenkrankheit* (PKD). Bachforellen können bei Temperaturen unter etwa 15 °C zwar eine pathologische Reaktion des Nierengewebes entwickeln, sterben aber

nicht daran. Ein Ausbruch der Krankheit mit hoher Mortalitätsrate erfolgt hingegen dann, wenn Erreger vorhanden sind und gleichzeitig die Wassertemperaturen während zweier Wochen oder länger einen Tagesmittelwert von 15 °C überschreiten [23].
Viele Organismen haben je nach Lebensstadien unterschiedliche Temperaturpräferenzen. Das Vorkommen mancher Arten ist somit aufgrund der Vorlieben und Toleranzen auf bestimmte Flussabschnitte beschränkt. Die Wassertemperatur legt damit Habitatsgrenzen in unseren Fliessgewässern fest. Langfristige Veränderungen der Wassertemperaturen beeinflussen deshalb das Vorkommen und die Zusammensetzung der aquatischen Organismen in Fliessgewässern und können das Aufkommen von Neozoen und Neophyten fördern.

4. Temperaturmessnetz

4.1 Ziel und Konzept

Das Ziel des nationalen Temperaturmessnetzes besteht darin, Grundlagen für die Erfolgskontrolle der schweizerischen Umweltschutzgesetzgebung zu liefern sowie Ursachen- und Wirkungsanalysen zu ermöglichen [24]. Um dieses Ziel zu erreichen ist es wichtig, dass die Stationen einen gesamtschweizerischen Überblick gewährleisten und die Vielfalt der Schweizer Fliessgewässer repräsentieren.
Damit die im Rahmen des Temperaturmessnetzes untersuchten Fliessgewässer zusammenfassend charakterisiert werden können und das Messnetz im Hinblick auf seine Repräsentativität besser beurteilt werden kann, müssen die einzelnen Messstationen aufgrund ihres Jahres-Temperaturregimes klassifiziert werden.

4.2 Datenerhebung

Das nationale Temperaturmessnetz wurde 1963 in Betrieb genommen und seither laufend erweitert. Es umfasst zurzeit 78 Stationen *(Tab. 1, Abb. 1)*. Die grösste Erweiterung im Messnetz von 40 auf 75 Messstationen erfolgte im Rahmen der Neuformulierung der Zielsetzungen des Temperaturmessnetzes in den Jahren 2000–2002.
Die Temperaturmessungen werden mit Temperatursonden kontinuierlich in 10-Minuten-Intervallen erhoben. Historische Temperaturdaten wurden teilweise mittels täglichen Stichproben erhoben. Die Daten bilden die Grundlage für die Berechnungen von Tages-, Monats-, Jahresmittelwerten und Mittelwerten über beliebige Zeitperioden. Der Beginn der Messperiode mit kontinuierlichen und als Stichproben durchgeführten Temperaturmessungen ist in der *Tabelle 1* ersichtlich. Die

Gewässer	Station	Beginn	Höhe Station (m ü. M.)	Fläche EG (km²)	mittlere Höhe EG (m ü. M.)	Verglet-scherung (%)	Fluss-gebiet
Aare	Bern, Schönau	1970	502.00	2969.00	1610.00	8.00	Aare
Aare	Brienzwiler	1964/69	570.00	554.00	2150.00	21.00	Aare
Aare	Brugg	1963/70	332.00	11750.00	1010.00	2.00	Aare
Aare	Brügg, Aegerten	1963/70	428.00	8317.00	1150.00	2.90	Aare
Aare	Felsenau, KW Klingnau	1960/70	312.00	17779.00			Aare
Aare	Hagneck	1971	437.00	5128.00	1380.00	4.50	Aare
Aare	Ringgenberg, Goldswil	1964/80	564.00	1129.00	1970.00	16.20	Aare
Aare	Thun	1971	548.00	2490.00	1760.00	9.50	Aare
Aare	Untersiggenthal, Stilli	1963/69	326.00	17625.00	1050.00	2.10	Aare
Allaine	Boncourt, Frontière	2002	366.00	215.00	559.00		Rhône
Allenbach	Adelboden	2002	1297.00	28.80	1856.00		Aare
Alp	Einsiedeln	2003	840.00	46.40	1155.00		Limmat
Arve	Genève, Bout du Monde	1969	380.00	1976.00	1370.00	6.10	Rhône
Biber	Biberbrugg	2003	825.00	31.90	1009.00		Limmat
Birs	Münchenstein, Hofmatt	1972	268.00	911.00	740.00		Rhein
Broye	Payerne, Caserne d`aviation	1976	441.00	392.00	710.00		Aare
Canal de la Broye	Sugiez	1999	429.00	697.00	630.00		Aare
Dischmabach	Davos, Kriegsmatte	2004	1668.00	43.30	2372.00	2.10	Rhein
Doubs	Ocourt	2002	417.00	1230.00	950.00		Rhône
Emme	Emmenmatt	1976	638.00	443.00	1070.00		Aare
Engelberger Aa	Buochs, Flugplatz	1983	443.00	227.00	1620.00	4.30	Reuss
Glatt	Rheinsfelden	1976	336.00	416.00	498.00		Rhein
Goldach	Goldach, Bleiche	2004	399.00	49.80	833.00		Rhein
Grossbach	Gross, Säge	2003	940.00	9.06	1276.00		Limmat
Grosstalbach	Isenthal	2004	767.00	43.90	1820.00	9.30	Reuss
Gürbe	Belp, Mülimatt	2007	522.00	117.00	837.00		Aare
Inn	S-chanf	1981	1645.00	615.00	2470.00	15.60	Inn
Kleine Emme	Littau, Reussbühl	1973/78	431.00	477.00	1050.00		Reuss
Landquart	Felsenbach	2003	571.00	616.00	1800.00	1.40	Rhein
Langeten	Huttwil, Häberenbad	2002	597.00	59.90	766.00		Aare
Limmat	Baden, Limmatpromenade	1969/70	351.00	2396.00	1130.00	1.10	Limmat
Linth	Mollis, Linthbrücke	1964/71	436.00	600.00	1730.00	4.40	Limmat
Linth	Weesen, Biäsche	1964/70	419.00	1061.00	1580.00	2.50	Limmat
Lonza	Blatten	1967/86	1520.00	77.80	2630.00	36.50	Rhône
Lütschine	Gsteig	1964/86	585.00	379.00	2050.00	17.40	Aare
Massa	Blatten bei Naters	2003	1446.00	195.00	2945.00	65.90	Rhône
Mentue	Yvonand, La Maugettaz	2002	449.00	105.00	679.00		Aare
Muota	Ingenbohl	1974	438.00	316.00	1360.00	0.08	Reuss
Murg	Frauenfeld	2007	390.00	212.00			Rhein
Murg	Wängi	2002	466.00	78.90	650.00		Rhein

Messgenauigkeit im Temperaturmessnetz des BAFU wird durch regelmässige *Vergleichsmessungen* mit geeichten Thermometern gewährleistet. Die Genauigkeit der Systeme beträgt ±0,15 ºC ±0,02 ºC/ºC.

4.3 Klassifizierung der Messstationen

Die Klassifizierung erfolgte mit Hilfe einer *Clusteranalyse*, welche Ähnlichkeiten zwischen den Stationen in Bezug auf ihr Jahres-Temperaturregime aufzeigte und eine grobe Einteilung in verschiedene Cluster erlaubte. Bei der Bildung der Cluster wurden die Daten aus mehreren Jahren (1999–2007) ausgewertet, um jährliche Schwankungen im Temperaturregime aufgrund von einzelnen Wetterereignissen ausgleichen zu können.

Basierend auf den Ergebnissen der Clusteranalyse wurde die Gruppeneinteilung verfeinert. Gebietsparameter und zusätzliche Kenntnisse über Faktoren im Einzugsgebiet der betrachteten Fliessgewässer, welche das Temperaturregime beeinflussen, wurden für die Differenzierung berücksichtigt.

Die Klassifizierung der Messstationen wird einerseits anhand der mittleren Höhe des Einzugsgebietes – wichtigster Temperatur beeinflussender Gebietsparameter – und andererseits anhand von drei das Temperaturregime beeinflussenden Faktoren – Seeeinfluss, Grundwasserexfiltration und hydrologische Speicherkraftwerke – dargestellt *(Tab. 2)*. Letztere wurden in dieser Arbeit als bedeutendste Einflüsse erachtet. Die Einteilung der Gebietshöhe nach geobotanischen Kriterien in die vier Höhenstufen *alpin, subalpin, montan* und *kollin* ergab die beste Differenzierung, weil hierbei die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse der Süd-, Nord- und Zentralalpen sowie des Juras berücksichtigt werden. Es gilt zu beachten, dass sich die Höhenstufen je nach Region auf unterschiedliche Meereshöhen beziehen *(Tab. 3)* [25]. Der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet wurde in dieser Klassifizierung nicht als Haupteinflussfaktor definiert, da er ebenfalls von der Höhe des Einzugsgebiets abhängig ist.

Die *Erkenntnisse* der Klassifizierung können folgendermassen zusammengefasst werden *(Abb. 2)*:

– Je alpiner die mittlere Einzugsgebietshöhe einer Station, desto niedriger sind sowohl die Winter- als auch die Sommertemperaturen und desto geringer sind die Jahresamplituden des Temperaturregimes. Je höher der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet, desto mehr wird dieser Effekt verstärkt. Typische Temperaturbereiche von naturnahen Fliessgewässern der entsprechenden

Gewässer	Station	Beginn	Höhe Station (m ü. M.)	Fläche EG (km^2)	mittlere Höhe EG (m ü. M.)	Vergletscherung (%)	Flussgebiet
Necker	Mogelsberg, Aachsäge	2007	606.00	88.20	959.00	0.00	Rhein
Poschiavino	La Rösa	2004	1860.00	14.10	2283.00	0.35	Adda
Reuss	Luzern, Geissmattbrücke	1973	432.00	2251.00	1500.00	4.20	Reuss
Reuss	Mellingen	1969/70	345.00	3382.00	1240.00	2.80	Reuss
Reuss	Seedorf	1971	438.00	832.00	2010.00	9.50	Reuss
Rhein	(Oberwasser) Laufenburg	1970/71	299.00	34074.00			Rhein
Rhein	(Oberwasser) Rheinau	1971/72	353.00				Rhein
Rhein	Basel, Klingenthalfähre	2003	245.00				Rhein
Rhein	Diepoldsau, Rietbrücke	1963/84	410.00	6119.00	1800.00	1.40	Rhein
Rhein	Rekingen	1969/70	323.00	14718.00	1080.00	0.57	Rhein
Rhein	Rheinfelden, Messstation	1971	262.00	34550.00	1039.00	1.30	Rhein
Rhein	Weil, Palmrainbrücke	1954/77	244.00				Rhein
Rhône	Chancy, Aux Ripes	1971/72	336.00	10299.00	1580.00	8.40	Rhône
Rhône	Genève, Halle d'ile	2003	367.00	7987.00	1670.00	9.40	Rhône
Rhône	Oberwald	2003	1368.00	95.00	2467.00	25.60	Rhône
Rhône	Porte du Scex	1968/71	377.00	5220.00	2130.00	14.30	Rhône
Rhône	Sion	1974	484.00	3349.00	2310.00	18.40	Rhône
Riale di Calneggia	Cavergno, Pontit	2002	890.00	24.00	1996.00	0.00	Ticino
Riale di Pincascia	Lavertezzo	2004	536.00	44.40	1708.00	0.00	Ticino
Riale di Roggoiasca	Roveredo	2003	980.00	8.06	1711.00	0.00	Ticino
Rietholzbach	Mosnang, Rietholz	2002	682.00	3.31	795.00	0.00	Rhein
Rom	Müstair	2003	1236.00	129.70	2187.00	0.12	Etsch
Rosegbach	Pontresina	2004	1766.00	66.50	2716.00	30.10	Inn
Saane	Gümmenen	1981	473.00	1880.00	1131.00	0.20	Aare
Sellenbodenbach	Neuenkirch	2003	515.00	10.50	615.00	0.00	Aare
Sense	Thörishaus, Sensematt	2003	553.00	352.00	1068.00	0.00	Aare
Sitter	Appenzell	2006	769.00	74.20	1252.00	0.00	Rhein
Sperbelgraben	Wasen, Kurzeneialp	2002	911.00	0.54	1063.00	0.00	Aare
Suze	Sonceboz	2004	642.00	150.00	1050.00	0.00	Aare
Taschinasbach	Grüsch, W.F. Lietha	2003	666.00	63.00	1768.00	0.04	Rhein
Thur	Andelfingen	1963/69	356.00	1696.00	770.00	0.00	Rhein
Ticino	Riazzino	1978	200.00	1611.00	1640.00	0.65	Ticino
Tresa	Ponte Tresa, Rocchetta	2003	268.00	615.00	800.00	0.00	Ticino
Venoge	Ecublens, Les Bois	2002	383.00	231.00	700.00	0.00	Rhône
Vispa	Visp	2003	659.00	778.00	2660.00	29.50	Rhône
Vorderrhein	Illanz	2002	693.00	776.00	2020.00	3.80	Rhein
Worble	Ittigen	1989	522.00	60.50	679.00	0.00	Aare

Tab. 1 Messstellen des nationalen Wassertemperaturmessnetzes des BAFU mit den wichtigsten Kenngrössen zu ihrem Einzugsgebiet (Stand 2007). Bei einigen Stationen sind zwei unterschiedliche Jahre für den Beginn der Messperiode angegeben. Dabei bezieht sich das frühere Jahr auf Beginn der Temperaturmessungen mittels Stichproben, das spätere Jahr auf den Messbeginn mit kontinuierlich erhobenen Daten.

Gebietshöhen sind in der *Tabelle 4* dargestellt.

– Gegenüber den unbeeinflussten Stationen in allen Höhenlagen zeigen sich der Seeeinfluss in höheren Sommer- und Wintertemperaturen, der Grundwassereinfluss in einer ausgeglicheneren Temperaturamplitude und der Einfluss von hydroelektrischen Speicherkraftwerken in höheren Wintertemperaturen und niedrigeren Sommertemperaturen *(Abb. 2a, b, c)*.

Fast alle ausgewerteten Stationen des nationalen Temperaturmessnetzes konnten eindeutig anhand ihres Temperaturregimes und anhand der Kenntnisse über die Temperatur beeinflussenden Faktoren in *15 Gruppen* eingeteilt werden *(Tab. 2)*. Bei der Glatt-Rheinsfelden war die Einteilung erschwert, weil kein eindeutiger Haupteinfluss zu erkennen ist, bzw. weil sich zwei Haupteinflüsse (Grundwasserexfiltration und Seeeinfluss) überlagern. Der Grundwassereinfluss wurde aufgrund des Temperaturregimes als bedeutender gewichtet. Bei der Lütschine-Gsteig können die relativ hohen Wintertemperaturen nicht erklärt werden. Diese Station wird jedoch als unbeeinflusst klassifiziert, da keine Kenntnisse von Einflussfaktoren ersichtlich sind.

	Höhenstufen			
Haupteinflüsse	**alpin**	**subalpin**	**montan**	**kollin**
Seeausfluss	Aare, Ringgenberg[4] (+0,5°C) ↑	Aare, Thun (+0,8°C) ↑ Aare, Bern (+0,9°C) ↑ Linth, Weesen (+1,0°C) ↑↑↑	Aare, Brugg (+0,9°C) ↓↑↑↑ Aare, Brügg, Aegerten (+1,0°C) ↓↑↑↑ Aare, Felsenau (+0,9°C) ↓↑↑↑ Aare, Hagneck (+0,9°C) ↑↑ Aare, Untersiggenthal (+0,9°C) Limmat, Baden (+1,0°C) ↓↑↑ Reuss, Luzern (+1,2°C) ↓↑↑↑ Reuss, Mellingen (+0,9°C) ↓↑↑↑ Rhein, Laufenburg (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rekingen (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rheinau (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rheinfelden (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Weil[2] (+1,1°C) ↓↑↑ Rhone, Chancy (+0,8°C) ↑↑↑ *Rhone, Genève*	*Canal de la Broye, Sugiez* *Tresa, Ponte Tresa*
Grundwasser	*Rom, Müstair*	*Grosstalbach, Isental* *R. di Calneggia, Cavergno*	*Suze, Sonceboz*	*Allaine, Boncourt* Birs, Münchenstein (+0,6°C) ↑↑↑ *Doubs, Ocourt* Glatt, Rheinsfelden[1] (+0,6°C) ↓↑↑↑ *Langeten, Huttwil* *Murg, Frauenfeld* *Murg, Wängi* *Rietholzbach, Mosnang* *Venoge, Ecublens* Worble, Ittigen[8] ↑↑
Speicher-kraftwerk	Aare, Brienzwiler (+0,2°C) Rhone, Porte du Scex (+0,4°C) Rhone, Sion (+0,2°C) *Vispa, Visp*	Engelberger Aa, Buochs[6] (+0,2°C) *Landquart, Felsenbach* Linth, Mollis (+0,4°C) Reuss, Seedorf (+0,4°C) Rhein, Diepoldsau (+0,5°C) ↑ *Vorderrhein, Illanz*	Arve, Genève (+0,4°C) Muota, Ingenbohl (+0,1°C) Saane, Gümmenen[5] (+0,7°C) ↑↑ *Sitter, Appenzell* Ticino, Riazzino[3] (+0,8°C) ↑↑	
unbeeinflusst bzw. keine ersichtlichen Haupteinflüsse	*Dischmabach, Davos* Inn, S-chanf[5] (+0,3°C) Lonza, Blatten[7] (–0,2°C) Lütschine, Gsteig[7] (+0,2°C) *Massa, Blatten bei Naters* *Poschiavino, La Rösa* *Rhone, Oberwald* *Rosegbach, Pontresina*	*Allenbach, Adelboden* *R. di Roggoisca, Roveredo* *Taschinasbach, Grüsch*	Alp, Einsiedeln Biber, Biberbrugg Emme, Emmenmatt 1 (+0,7°C) ↑↑ *Grossbach, Gross* *Necker, Mogelsberg* *R. di Pincascia, Lavertezzo* *Sense, Thörishaus* *Sperbelgraben, Wasen*	Broye, Payerne[1] (+1,0°C) ↑↑↑ *Goldach, Goldach* Kleine Emme, Littau[3] (+0,7°C) ↑ ↑ *Mentue, Yvonand* *Sellenbodenbach, Neuenkirch* Thur, Andelfingen (+0,8°C) ↑↑↑

Tab. 2 Klassifizierung der Messstellen des Wassertemperaturmessnetzes unter Berücksichtigung der mittleren Höhe des Einzugsgebietes gegenüber der Haupteinflüsse «See», «Grundwasserexfiltration», «Hydroelektrisches Speicherkraftwerk». Die neuen Stationen, die nach 2000 in Betrieb genommen wurden, sind kursiv gekennzeichnet. In Klammern ist die Differenz der mittleren Jahrestemperaturen der Periode 1988–2007 und 1974–1987 angegeben. Stationen mit weniger langen kontinuierlichen Zeitreihen sind mit Zahlen markiert ([1]: ab 1976; [2]: ab 1977; [3]: ab 1978; [4]: ab 1980; [5]: ab 1981; [6]: ab 1983; [7]: ab 1987; [8]: ab 1989).

↓↑ Ab- bzw. Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 15 und 18 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 18 und 21 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 21 und 24 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden > 24 °C seit Beginn der Messperiode

4.4 Repräsentativität

Aufgrund der Klassifizierung der Messstationen kann festgehalten werden, dass durch die Messnetzerweiterung seit 2000 die Repräsentativität deutlich erhöht wurde. Während die historischen Stationen hauptsächlich grosse, anthropogen beeinflusste Fliessgewässer des Mittellandes repräsentierten, werden aktuell auch kleine, nicht anthropogen beeinflusste Fliessgewässer in höheren Lagen erfasst *(Tab. 2)*. Die von einem See beeinflussten Stationen

	Wintertemperatur	Sommertemperatur
alpin	<2 °C	<10 °C
subalpin	<2 °C	10–15 °C
montan	<3 °C	13–20 °C
kollin	0,5–4 °C (sehr variabel)	16–22 °C

Tab. 4 Typische Temperaturbereiche von naturnahen Fliessgewässern ohne ersichtliche Beeinflussung mit Einzugsgebietshöhen der vier Höhenstufen.

	Obergrenze (m ü. M.)				Vegetation	Vegetation Obergrenze
	Nordalpen	Zentralalpen	Südalpen	Jura		
alpin	2400–2500	2700–3000	2400–2500		Zwergsträucher, Rasen	Vegetationsgrenze
subalpin	1800–2100 (2000)	2000–2500 (2300)	1800–2100 (2000)		Nadelwälder	Baumgrenze
montan	1100–1500 (1300)	1000–1800 (1500)	1700 (1700)	1300–1500 (1400)	Buchenwälder und Buchen-Nadelmischwälder/Nadelwälder (nur Zentralalpen)	Buche/Waldföhre (nur Zentralalpen
kollin	600–800 (700)	600–1000 (800)	800–1000 (900)	600–800 (700)	sommergrüne Laubwälder	Eichen

Tab. 3 Einteilung der Höhenstufen nach geobotanischen Kriterien. Es ist zu beachten, dass die Höhenstufen nicht durch eine klare Höhengrenze, sondern durch einen Grenzbereich getrennt sind. In Klammern sind die Höhen angegeben, welche für Einteilung der Temperaturmessstationen angenommen wurden. *(Quelle: [25])*

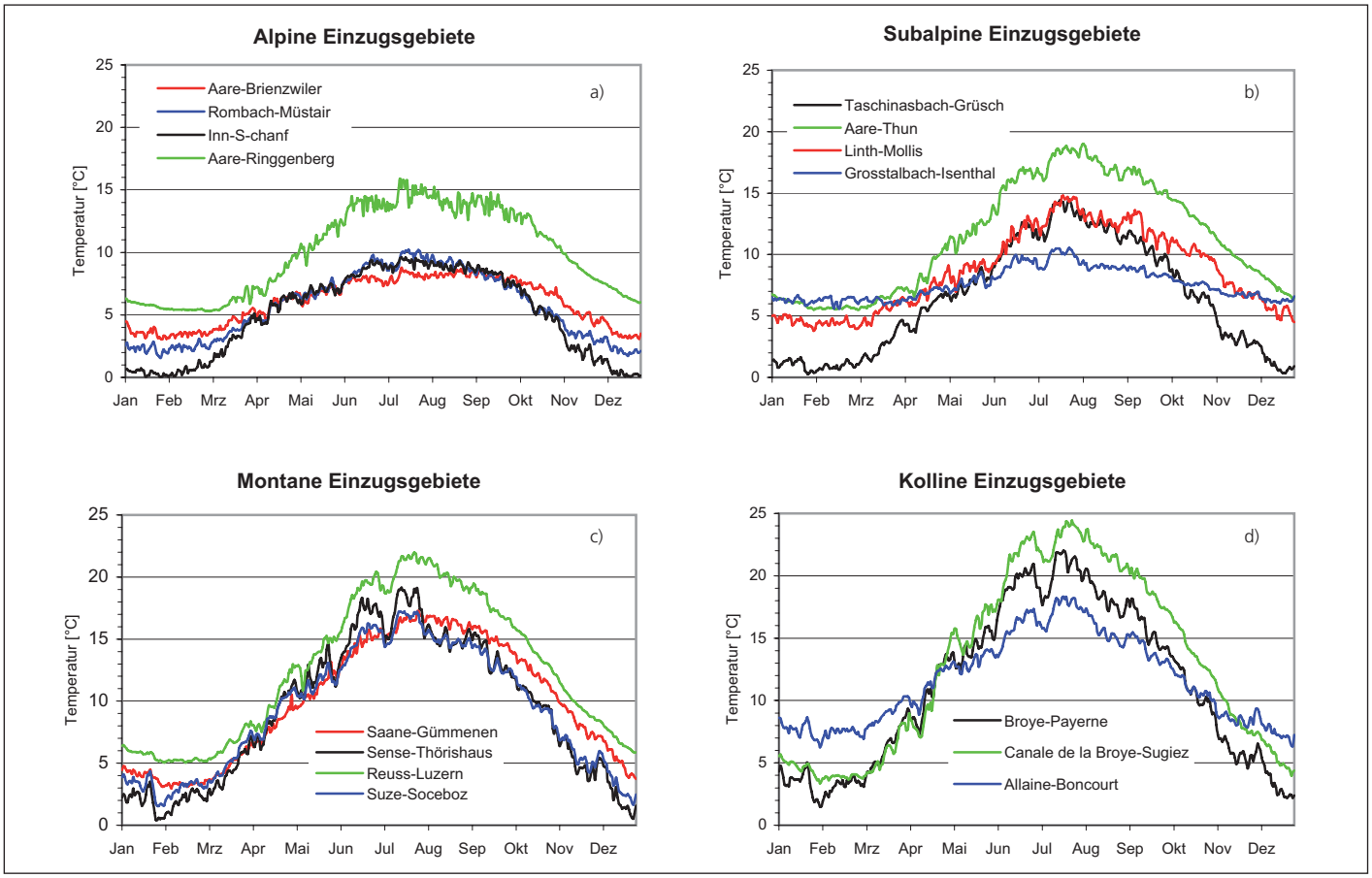

Abb. 2 Jahresganglinien der Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes. Je höher die mittlere Höhe des Einzugsgebietes ist, desto kälter sind die Winter- und Sommertemperaturen und desto kleiner sind die Temperaturamplituden. Ein Seeeinfluss *(grün)* erhöht tendenziell die Sommer- und Wintertemperaturen, ein Grundwassereinfluss *(blau)* hat eine ausgleichende Wirkung auf die Temperaturamplituden und hydroelektrische Speicherkraftwerke *(rot)* erhöhen die Wintertemperaturen und erniedrigen tendenziell die Sommertemperaturen. Die Jahresganglinie von unbeeinflussten Stationen ist *schwarz* dargestellt. Die Werte entsprechen den durchschnittlichen Tagesmittelwerten über die Jahre 2003–2007.

mit montaner Einzugsgebietshöhe sind jedoch immer noch sehr stark im Messnetz vertreten, während Stationen, welche sich in montaner bis alpiner Lage befinden und vom Grundwasser beeinflusst sind, eher schwach vertreten sind. Je nach Ausrichtung der zukünftigen Erhebungen der Wassertemperaturen und je nach Schwerpunktsetzung der Fragestellungen besteht in diesem Bereich noch ein Potenzial, das im Bedarfsfall und mit den entsprechenden Ressourcen noch weiter ausgeschöpft werden kann.

5. Wassertemperaturwandel

5.1 Jahresmitteltemperaturen

Die Zeitreihen der Wassertemperaturen zeigen seit Beginn der Messperiode eine Zunahme der Jahresmittelwerte bei der Mehrheit der Stationen um 0,1–1,2 °C, wobei ein markanter Anstieg zwischen 1987 und 1988 ersichtlich ist *(Abb. 3)* [9, 18]. Dieser Temperatursprung zwischen 1987 und 1988 kann auf eine Änderung des Nordatlantischen Oszillationsindexes zurückgeführt werden und ist also klimatisch bedingt [9, 17]. Aufgrund dieser Tatsache wurden für viele Darstellungen die beiden Perioden 1974–1987 und 1988–2007 einander gegenübergestellt. Bei 28 Stationen wurde eine Analyse der Tagesmittelwerte für die Perioden 1974–1987 und 1988–2007 durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass bei den Stationen Lütschine-Gsteig und Lonza-Blatten die Daten bis 1986 als Stichproben erhoben wurden. Aufgrund des Zeitpunktes der Stichprobenentnahme sind die historischen Daten der Lütschine mit den Tagesmittelwerten der aus den kontinuierlich erhobenen Daten nach 1987 vergleichbar. Hingegen wurden für den Vergleich der Jahresmittelwerte bei der Station Lonza-Blatten die Stichproben bis 1986 mit den Stundenmittelwerten der kontinuierlichen Daten zum Zeitpunkt der Stichprobe verwendet. Bei zehn Stationen fehlen Messungen einzelner Jahre vor 1987 *(Tab. 1 und 2)*. Die Auswirkungen auf die Periodenauswertung sind allerdings marginal.

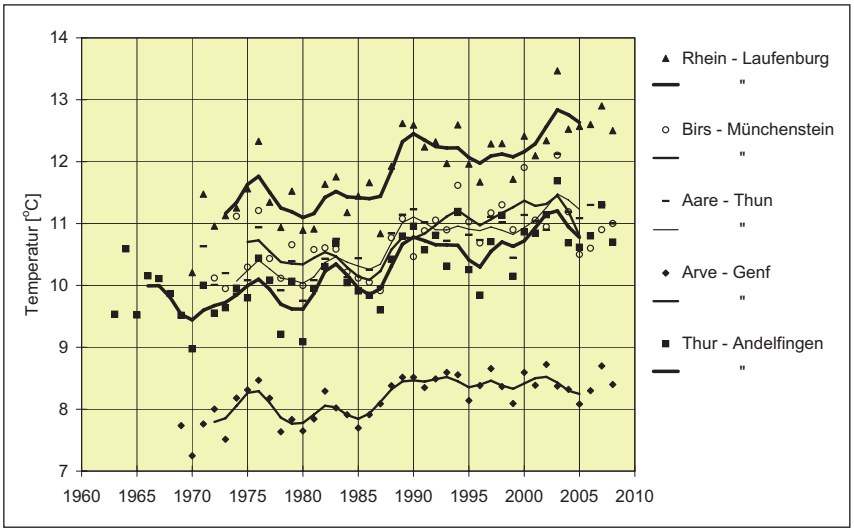

Abb. 3 Entwicklung der mittleren jährlichen Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen. Auffällig ist der Temperatursprung zwischen 1987 und 1988, der bei allen Stationen ersichtlich ist. Der Temperatursprung ist vor allem bei Messstationen wie z. B. Arve-Genf, die im Einflussbereich von Gletschern liegen, weniger deutlich.

Die festgestellten Temperaturveränderungen zwischen den beiden Perioden sind bei allen Stationen mit langjährigen Messreihen in der *Tabelle 2* aufgeführt. Die *Resultate* können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Je höher die mittlere *Höhe* des Einzugsgebietes und je höher der Grad der *Vergletscherung* im Einzugsgebiet ist, desto weniger deutlich ist die Temperaturzunahme bzw. ist sogar eine Temperaturabnahme zu verzeichnen (z. B. Lonza-Blatten).
- Bei den Stationen mit *Seeeinfluss* ist die Temperaturzunahme deutlicher als bei Stationen in vergleichbarer Höhenstufe ohne Seeeinfluss. Die Stationen mit mittlerer Einzugsgebietshöhe der montanen Stufe zeigen mit 0,8–1,2 °C die stärkste Erwärmung. Vergleichbare Daten der kollinen Höhenstufe fehlen jedoch.
- Bei den durch *hydroelektrische Nutzung* beeinflussten Stationen mit subalpiner und montaner Einzugsgebietshöhe variiert die Grössenordnung der Temperaturzunahme stark und liegt im Bereich von 0,1–0,8 °C.
- In der *kollinen Stufe* zeigen die Stationen mit Grundwassereinfluss (Glatt-Rheinsfelden, Birs-Münchenstein) eine weniger ausgeprägte Temperaturzunahme als die unbeeinflussten Stationen.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Seen im Einzugsgebiet eine klimatisch bedingte Temperaturzunahme verstärken. Demgegenüber wirkt sich ein Grundwassereinfluss dämpfend auf eine Temperaturerhöhung aus. Ein hoher Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet kompensiert aufgrund der Gletscherschmelze im Sommer eine klimatisch bedingte Temperaturerhöhung teilweise, weshalb die Temperaturzunahme bei den alpinen Stationen weniger ausgeprägt ist als bei tiefer gelegenen Stationen. Inwiefern die hydroelektrische Nutzung einen dämpfenden Einfluss auf eine mögliche klimatisch bedingte Erwärmung der Fliessgewässer hat, kann aufgrund der fehlenden Datenlage nicht beantwortet werden, da langjährige konsistente Messreihen von unbeeinflussten alpinen Stationen fehlen. Hinweise auf eine mögliche Dämpfung könnten die relativ geringen Temperaturzunahmen (0,1–0,4 °C) bei Stationen, welche durch hydroelektrische Nutzung beeinflusst sind, sich in tieferen Lagen befinden und eine geringe Vergletscherung des Einzugsgebietes aufweisen, sein.

Die Temperaturentwicklung zeigt, dass sich Flora und Fauna der Gewässer langfristig an

wärmere Bedingungen anpassen müssen. Arten, die in Mittel- oder Unterläufen beheimatet sind, werden sich flussaufwärts in Regionen verschieben, die ihnen früher noch zu kühl waren. So hat sich beispielsweise die Forellenregion bereits um 100–200 m [18] in höhere Lagen verschoben. Das Vorkommen der Alpen-Mosaikjungfer – eine in Stillgewässern vorkommende Art – hat sich um 200–500 m in höhere Lagen verschoben [20]. Zudem hat sich die Biodiversität von Pflanzen im Alpenraum oberhalb von 2900 m ü.M. signifikant erhöht [26].

5.2 Saisonale Veränderungen

In der aktuelleren Periode 1988–2005 ist im Vergleich zur Periode 1974–1987 bei praktisch allen Stationen im Frühling ein rascherer Temperaturanstieg zu beobachten als dies in früheren Jahren der Fall war *(Abb. 4)*. Eine Ausnahme bildet die Muota bei Ingenbohl *(Abb. 4d)*, bei welcher sich verschiedene Einflüsse überlagern. Die Muota liegt in einem Karstgebiet und ist zudem aufgrund der hydroelektrischen Nutzung stark durch Schwallbetrieb beeinflusst und weist deshalb extrem hohe Abflussschwankungen im Bereich < 20 % bis 80 % des mittleren normalen Jahresabflusses auf. Bei den alpinen und subalpinen Stationen liegt die Temperaturerhöhung im Frühling im Bereich von ca. 1 °C im März *(Abb. 4a, b)*, bei den montanen und kollinen Stationen bei bis zu 3 °C im Mai *(Abb. 4h)*. Auch lassen sich bei allen nicht alpinen Stationen eine Erhöhung der Sommertemperaturen und eine Verlängerung der sommerlichen Wärmeperiode feststellen. Auch diese Entwicklung entspricht den Beobachtungen der Lufttemperaturen in diesem Zeitraum [27] und ist ebenfalls ein Hinweis darauf, dass diese Temperaturveränderungen klimatisch bedingt sind. Bei den von Seen beeinflussten Stationen sind die Temperaturerhöhungen am grössten, wobei die mittlere Temperaturzunahme im Winter ca. 1 °C und im Sommer ca. 1,5–3 °C beträgt, was auf die hohe Wärmespeicherkapazität von Seen zurückzuführen ist *(Abb. 4f)*. Der Grundwassereinfluss wirkt sich dämpfend auf die sommerliche Temperaturzunahme aus, weil dann die Temperaturdifferenz zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser am grössten ist. Dies ist am Beispiel der Glatt-Rheinsfelden ersichtlich, wo die sommerliche Temperaturerhöhung niedriger ist als diejenige im Frühling *(Abb. 4g)*. Bei den alpinen und durch Gletscher beeinflussten Stationen wie z.B. bei der Lütschine-Gsteig und Rhone-Sion, ist die Temperaturerhöhung im Sommer weniger ausgeprägt oder sogar negativ, weil der Temperaturanstieg im Sommer durch vermehrtes Gletscherschmelzwasser teilweise kompensiert bzw. überkompensiert wird *(Abb. 4a, b)*. Dagegen sind die Herbsttemperaturen im Vergleich zu früheren Jahren bei den alpinen Stationen deutlich höher. Möglicherweise wirken sich bei den alpinen Stationen klimabedingte Temperaturerhöhungen aufgrund der geringen Wasserführung im Herbst am stärksten aus.

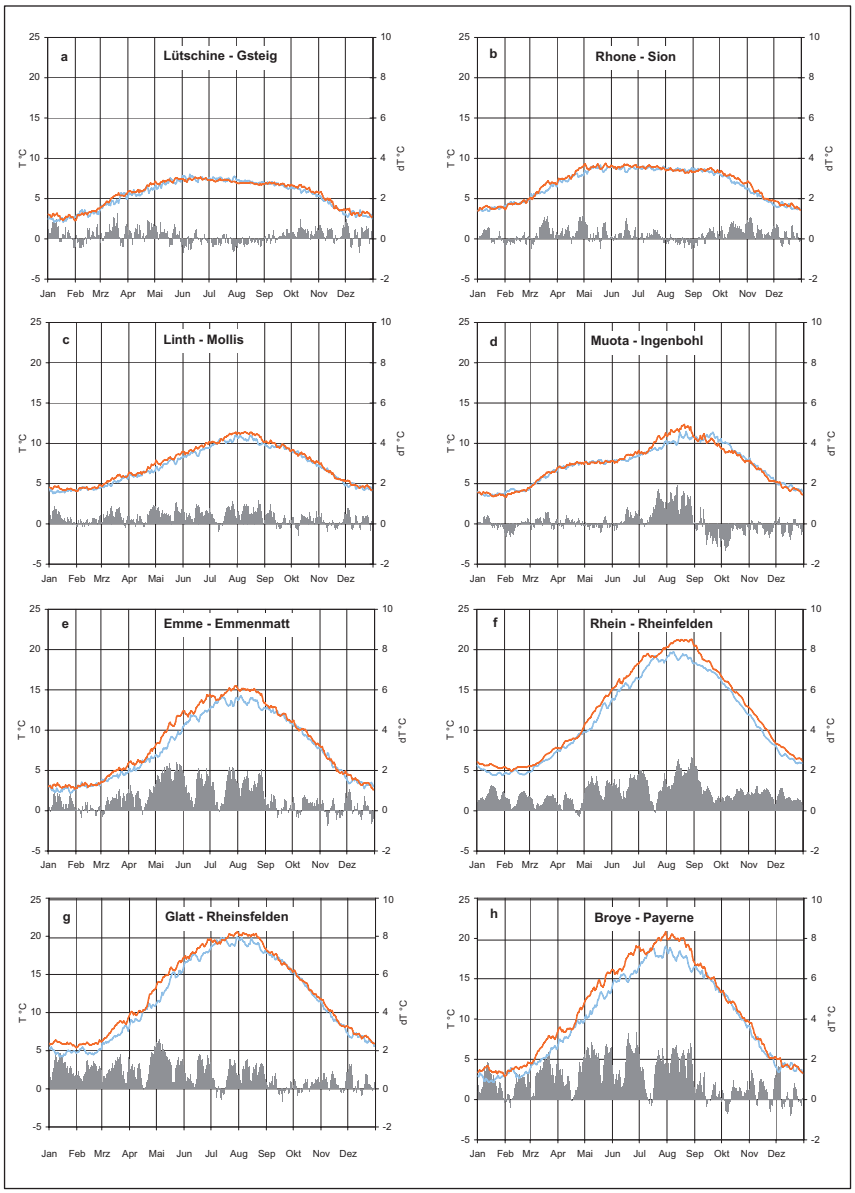

Abb. 4 Saisonaler Verlauf der Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes. Die blaue Linie bezieht sich auf die Messperiode 1974–1987 (Lütschine, Rhone, Linth, Muota, Rhein) bzw. 1976–1987 (Emme, Glatt, Broye), die rote Linie bezieht sich auf die Messperiode 1988–2005. Die schwarz eingezeichneten Säulen zeigen die Temperaturdifferenzen zwischen den mittleren Temperaturen 1988–2005 und 1976–1987 bzw. 1974–1987 und beziehen sich auf die rechte Y-Achse.

Die Erhöhung der Winter- und Frühlingstemperaturen verlängert die Wachstumsphase der Fauna und Flora allgemein. Bei lachsartigen Fischen wirken sich höhere Wintertemperaturen positiv auf die Eientwicklung aus. Durch höhere Sommertemperaturen werden die Karpfenartigen und Barsche auf Kosten der Lachsartigen, deren Stoffwechsel an tiefe Temperaturen angepasst ist, bevorteilt [19]. Bei Libellenlarven beschleunigen höhere Winter- und Frühlingstemperaturen die Emergenz. So konnten beispielsweise in verschiedenen Stillgewässern bei der Hufeisen-Azurjungfer bereits phänologische Veränderungen beobachtet werden [20].

5.3 Stundenwerte über 15 °C

Für insgesamt 38 Stationen konnte die Anzahl Stunden in den verschiedenen Temperaturwertebereichen langfristig berechnet werden, wobei sich bei rund einem Viertel dieser Stationen alle Werte unter 15 °C (Schwellenwert für PKD-Mortalität) befinden. Um die Häufigkeit hoher Wassertemperaturen zu erfassen, wurde die Anzahl Stunden ausgezählt, welche innerhalb von jeweils fünf Jahren eine Wassertemperatur von 15 °C überschritten haben. Als weitere Klassengrenze wurden aufgrund der vorgängig ausgeführten Überlegungen zur ökologischen Bedeutung der Temperatur die Werte 18 °C, 21 °C und 24 °C gewählt. Die Stundenwerte aller Stationen sind im *hydrologischen Atlas der Schweiz* (HADES) auf der Karte in Tafel 7.7 dargestellt [10].

Zwischen 1976 und 2005 lässt sich in allen Höhenlagen der Messstationen eine Zunahme der Stunden mit höheren Temperaturen feststellen (*Tab. 2)* [10]. In den montanen und subalpinen Gewässern ohne Seeeinfluss sowie in den kollinen Gewässern mit Grundwassereinfluss nehmen hauptsächlich die Stunden mit Temperaturen zwischen 15 und 18 °C bzw. 15 und 21 °C zu, was für diese Fliessgewässer bereits als hohe Temperatur bezeichnet werden muss. In den grösseren Gewässern mit Seeeinfluss nimmt die Anzahl Stunden zwischen 15 °C und 18 °C eher ab, während die Anzahl Stunden über 18 °C meist ansteigt. Der Zwischenbereich 15–18 °C wird bei diesen Messstellen im Frühling und Herbst schneller durchlaufen, dagegen verharren die Temperaturen im Sommer länger im hohen Temperaturbereich. Stunden mit Temperaturen über 24 °C werden hauptsächlich in den Flüssen mit montanem Einzugsgebiet unterhalb von Seen festgestellt, was auf die starke Erwärmung des Oberflächenwassers in Seen bei lang anhaltenden warmen Wetterlagen zurückzuführen ist. Auch in unbeeinflussten Fliessgewässern mit kollinem Einzugsgebiet wie z.B. in der Thur-Andelfingen oder Broye-Payerne treten vermehrt Temperaturen über 24 °C auf.

Die Folgen von hohen kurzfristig auftretenden Temperaturen können Fischsterben sein. Ein massives Fischsterben ereignete sich im August 2003 im Rhein: Zwischen Bodensee-Untersee und Eglisau verendeten hitzebedingt ca. 52 000 Äschen [28]. Bei den Wirbellosen leiden vor allem die Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven unter hohen Temperaturen. Für Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven konnten mittlere Letaltemperaturen im Bereich von 20–29 °C beobachtet werden [22]. Andere Wirbellose sind mit Letaltemperaturen im Bereich von 30 °C toleranter gegenüber warmen Wassertemperaturen. Ein weiteres biologisches Phänomen ist das Vorkommen von Süsswasserquallen in Seen, welche im Hitzesommer 2003 im Neuenburgersee aufgrund hoher Temperaturen beobachtet wurden. Quallen können sich nur bilden, wenn die Idealtemperatur von 25–27 °C erreicht wird [28].

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine grobe Klassifizierung der Stationen anhand ihres Temperaturregimes konnte unter Einbezug der Kenntnisse über die klimatischen Bedingungen sowie über natürliche und anthropogene Einflüsse im Einzugsgebiet der jeweiligen Fliessgewässer vorgenommen werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Haupteinflüsse nicht immer einfach und eindeutig identifiziert werden können, weil sie sich zum Teil überlagern und sich unterschiedlich auf das Temperaturregime auswirken.

Aufgrund der Klassifizierung der Messstationen kann festgehalten werden, dass sich seit der Erweiterung des Messnetzes dessen Repräsentativität stark erhöht hat, indem neu auch anthropogen unbeeinflusste und kleinere Einzugsgebiete im Messnetz erfasst werden. Das heutige Messnetz stellt damit eine gute Basis für die Erfassung der Entwicklung der Wassertemperaturen in Schweizer Fliessgewässern dar.

Die Klassifizierung hat gezeigt, dass von den diskutierten Einflüssen sich insbesondere die Grundwasserexfiltration sehr deutlich im Temperaturregime der entsprechenden Messstationen zeigt. Dieser Einfluss wurde in den bisherigen Auswertungen zu wenig berücksichtigt und nicht quantifiziert. Insbesondere bei der Modellierung der Temperaturverhältnisse, bei welcher die enge Beziehung zwischen Luft- und Wassertemperatur berücksichtigt wird, sollte der Grundwassereinfluss ebenfalls einbezogen werden. Dies vor allem im Hinblick auf eine Bewertung der Temperaturverhältnisse, die z.B. in das Modul-Stufen-Konzept des BAFU [29] eingegliedert werden könnte. Eine grosse Herausforderung stellt hierbei die Tatsache, dass sich der Grundwassereinfluss entlang des Flusslaufes ändert und sich somit, je nach Standort der Messstationen, unterschiedlich stark auf das Temperaturregime auswirkt. Interessant in diesem Zusammenhang ist auch die Frage, inwieweit sich im Bereich von Grundwasserexfiltrationen aufgrund deren ausgleichenden Wirkung auf das Temperaturregime bei extremen Wassertemperaturen Rückzugshabitate für Fische und Wirbellose bilden können. Um das Verständnis über den Einfluss des Grundwassers auf das Temperaturregime von Fliessgewässern zu erweitern, wäre es deshalb prüfenswert, noch

mehr Messstationen im Bereich von Grundwasserexfiltrationen zu errichten.

Langfristige Änderungen in den Wassertemperaturen – sowohl in den Jahresmittelwerten als auch im saisonalen Temperaturregime – konnten bei praktisch allen Messstationen festgestellt werden. Dabei sind deutliche Temperaturzunahmen in Fliessgewässern in tieferen Lagen und Temperaturabnahmen in alpinen Fliessgewässern mit einem hohen Anteil an Vergletscherung im Einzugsgebiet ersichtlich. Die Ursachen für diese Temperaturveränderungen können jedoch nicht immer eindeutig eruiert werden, da die langfristigen Messreihen zum grössten Teil bei den anthropogen beeinflussten Fliessgewässern existieren und deshalb klimatisch bedingte, natürliche Einflüsse und anthropogene Einflüsse kombiniert auf das Temperaturregime einwirken.

Die Veränderungen der Wassertemperaturen liegen jedoch in einem Bereich, welcher Anpassungen der Biologie zur Folge hat. Eine solche Anpassung der aquatischen Fauna findet bereits statt, was Beobachtungen in der Phänologie und in der Artenzusammensetzung von aquatischen Organismen bestätigen. Die vorhandenen biologischen Daten können nicht absolut eindeutig den gemessenen Temperaturveränderungen zugeordnet werden, weil oft parallel auch andere anthropogene Einflüsse die Lebensbedingungen der aquatischen Fauna verändern. In diesem Bereich ist deshalb noch ein grosser Forschungsbedarf vorhanden. Das nationale Messnetz bietet hierfür eine gute Grundlage, die es zu nutzen gilt.

Literaturverzeichnis

[1] *Baumgartner, A.; Liebscher, H.J.* (1990): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie, Bd. 1; 673 S.; Gebrüder Borntraeger, Berlin – Stuttgart.

[2] *Meier, W.; Bonjour, C.; Wüest, A.; Reichert, P.* (2003): Modeling the Effect of Water Diversion on the Temperature of Mountain Streams. Journal of Environmental Engineering 755–764.

[3] *Meier, W.; Wüest, A.* (2004): Wie verändert die hydroelektrische Nutzung die Wassertemperatur der Rhone? Wasser Energie Luft, 96, 11/12 305–309.

[4] *BAFU, Bundesamt für Umwelt:* Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz, Bern-Ittigen.

[5] *de Montmollin, F.; Jakob, A.* (1995): Temperaturverhältnisse in Fliessgewässern und Seen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz; Tafel 7.3. Landeshydrologie und -geologie, Bern.

[6] *de Montmollin, F.; Parodi, A.* (1990): Température des cours d'eau suisses, Mitteilung Nr. 12 der Landeshydrologie und -geologie, Bern. 96 S.

[7] *Jakob, A.* (2000): Temperaturentwicklung in den Fliessgewässern. Mitteilung zur Fischerei 66, 29–40, BUWAL.

[8] *Jakob, A.; Liechti, P.; Binderheim, E.* (2002): 30 Jahre NADUF – Eine Zwischenbilanz. gwa, 3/02 203–208.

[9] *Jakob, A.; Liechti, P.; Schädler, B.* (1996): Temperatur in Schweizer Gewässern – Quo vadis? gwa, 4/96 288–294.

[10] *Jakob, A.; Pfammatter, F.; Schädler, M.* (2007): Veränderungen der Temperaturen in Fliessgewässern 1976–2005. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 7.7. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[11] *Moore, J. A.; Miner, J.R.* (1997): Stream Temperatures – Some Basic Considerations, 2–6, Oregon State University.

[12] *Moosmann, L.; Schmid, M.; Wüest, A.* (2005): Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe. Eawag.

[13] *Binder, W.* (1980): Landschaftsökologische Gesichtspunkte bei der Gewässerregulierung und der Gewässerpflege. In: Institut f. Wassergüte und Landschaftswasserbau der TU Wien (Hg.), Landschaftswasserbau, Bd. 1 30–51.

[14] *Ward, J.V.* (2003): The Ecology of Alpine Streams. Eawag news 54.

[15] *Pfammatter, F.* (2004): Untersuchungen zur Wassertemperatur in schweizerischen Fliessgewässern. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

[16] *Krejci, V.; Frutiger, A.; Kreikenbaum, S.; Rossi, L.* (2004): Projekt «STORM: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter» – Gewässerbelastungen durch Abwasser aus Kanalisationen bei Regenwetter. Broschüre Eawag und BUWAL, 36 S.

[17] *Livingstone, D.M.; Dokulil, M.T.* (2001): Eighty years of spatially coheren Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation. Limnology and Oceanography 46 1220–1227.

[18] *Hari, R.E.; Livingstone, D.M.; Siber, R.; Burkhardt-Holm, P.; Güttinger, H.* (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology 12 10–16.

[19] *Küttel, S.; Peter, A.; Wüest, A.* (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fliessgewässer. Rhône Revitalisierung Publikation Nummer 1.

[20] *Oertli, B.; Rosset, V.; Lehmann, A.* (2009): Biodiversity in alpine ponds: an indicator of climate warming? Vortrag im Rahmen der Tagung der SGHL «Schnee, Eis und Wasser im Alpenraum – aktueller denn je!». Link: *http://chy.scnatweb.ch/d/Aktuell/Veranstaltungen/documents/Oertli.pdf.*

[21] *Troschel, J.* (1994): Anforderungen an Krebsgewässer. In: Mitteilungen zur Fischerei 52 47–52, BUWAL.

[22] *Davies, P.; Cook, B.; Rutherford, K.; Walshe, T.* (2004): Managing high in-stream temperatures using riparian vegetation. River and riparian land management technical guideline Number 5.

[23] *Gerster, S.* (2006): PKD – Die Proliferative Nierenkrankheit. Faltblatt, Fischereiberatung (FIBER) Eawag, Kastanienbaum.

[24] *BAFU* (2007): Wassertemperaturmessungen des Bundesamtes für Umwelt, Abteilung Hydrologie (Stand 2007). Interner Konzeptbericht, 14 S.

[25] *Baltisberger, M.* (2009): Systematische Botanik – Einheimische Farn- und Samenpflanzen. 3., korrigierte Auflage, vdf-Hochschulverlag, 328 S.

[26] *Pauli, H.; Gottfried, M.; Reiter, K.; Klettner, C.; Grabherr, G.* (2007): Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. Global Change Biology 13 147–156.

[27] *Rebetez, M.; Reinhard, M.* (2007): Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. Theoretical and Applied Climatology.

[28] *BUWAL, BWG, MeteoSchweiz* (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern-Ittigen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 174 S.

[29] *BUWAL* (1998): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer in der Schweiz. Modul-Stufen-Konzept. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 26 des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft.

Keywords

Wassertemperatur – Entwicklung – Klimawandel – Messnetz

Adressen der Autoren

Adrian Jakob, Dr. phil. nat.
Bundesamt für Umwelt BAFU
CH-3003 Bern
Tel. +41 (0)31 324 76 71
Fax +41 (0)31 324 76 81
adrian.jakob@bafu.admin.ch

Evi Binderheim, Dr. sc. techn.
Sponsolim Umweltconsulting
Dachslenbergstr. 51, CH-8180 Bülach

Miriam Schädler, dipl. natw.
Spitalackerstr. 7, CH-3013 Bern

Fabian Pfammatter, lic. phil. nat.
Raumplanung + Umwelt AG
Büro für nachhaltige Raumentwicklung und Umweltplanung
Sebastiansplatz 1
CH-3900 Brig-Glis

Verdankungen

Die vorliegende Publikation wäre ohne die zuverlässige und sorgfältige langjährige Arbeit im Feld und in der Datenbearbeitung nicht möglich. Die Autoren danken deshalb den zahlreichen beteiligten Mitarbeitenden der Abteilung Hydrologie des Bundesamts für Umwelt sowie den lokalen Betreuern der Stationen.

Temperaturen in Schweizer Fliessgewässern

Langzeitbeobachtung

Températures des cours d'eau suisses
Observation à long terme

Dans le cadre du réseau national des mesures de température, la température de différents cours d'eau est mesurée continuellement depuis 1963. Il est ainsi possible de mettre en évidence les conséquences de diverses influences naturelles et anthropogènes sur l'évolution annuelle de la température de l'eau. Ces mesures permettent d'effectuer une classification approximative des stations de mesure. L'analyse des relevés de température indique une augmentation de la moyenne annuelle pouvant atteindre 1,2° C et 1,5 à 3° C en été, en basse altitude et dans la zone d'influence des lacs. En région alpine, l'augmentation de la moyenne annuelle est moins marquée à cause de l'effet compensateur de l'eau de fonte des glaciers. Quelle que soit l'altitude, toutes les stations de mesure enregistrent une élévation plus rapide de la température au printemps. Les changements de température ont une influence notable sur le développement et la composition des espèces aquatiques.

Temperatures in Swiss Rivers and Streams
Long-term Observation

Water temperatures of various rivers and streams have been continuously recorded since 1963 within the framework of the national temperature measurement network. This has made it possible to highlight the effects of various natural and anthropogenic influences on the annual development of water temperatures. This enables an approximate classification of the measurement stations. The analyses of the measurements show clear tendencies towards increased annual mean temperatures of up to 1.2 °C, and 1.5–3 °C in summer, particularly in lower altitudes, as well as in areas affected by lakes. In alpine regions the increase in annual mean is visible to a lesser extent, due to the compensating influences of melt-water from glaciers. A rapid increase in temperature is noticeable in spring, irrespective of the altitude. The temperature changes have a decisive impact on the development and on the composition of aquatic life.

Adrian Jakob

Im Rahmen des nationalen Temperaturmessnetzes werden seit 1963 die Wassertemperaturen verschiedener Fliessgewässer kontinuierlich erfasst. Dadurch können die Auswirkungen unterschiedlicher natürlicher und anthropogener Einflüsse auf den Jahresverlauf der Wassertemperaturen aufgezeigt werden. Dies erlaubt eine grobe Klassifizierung der Messstationen. Die Auswertungen der Messungen zeigen klare Tendenzen zu erhöhten Wassertemperaturen von bis zu 1,2 °C im Jahresmittel und um 1,5–3 °C im Sommer insbesondere in tieferen Lagen sowie im Einflussbereich von Seen. In alpinen Lagen sind die Temperaturerhöhungen im Jahresmittel aufgrund des kompensierenden Einflusses von Gletscherschmelzwasser weniger ausgeprägt. Unabhängig von der Höhenlage ist bei allen Messstationen ein rascherer Temperaturanstieg im Frühling zu verzeichnen. Die Temperaturänderungen wirken sich wesentlich auf die Entwicklung und Zusammensetzung von aquatischen Lebewesen aus.

1. Einleitung

Die Temperatur ist einer der physikalischen Schlüsselparameter, der die chemischen und biologischen Prozesse in einem Fliessgewässer bestimmt. Deshalb spielt die Wassertemperatur für die Zusammensetzung und Entwicklung aquatischer Lebensgemeinschaften eine wesentliche Rolle.
Die Wassertemperaturen sind einerseits das Resultat von *natürlichen Einflussfaktoren* im Einzugsgebiet wie beispielsweise Morphologie, klimatische Bedingungen und die Grundwasserexfiltration [1]. Andererseits werden die

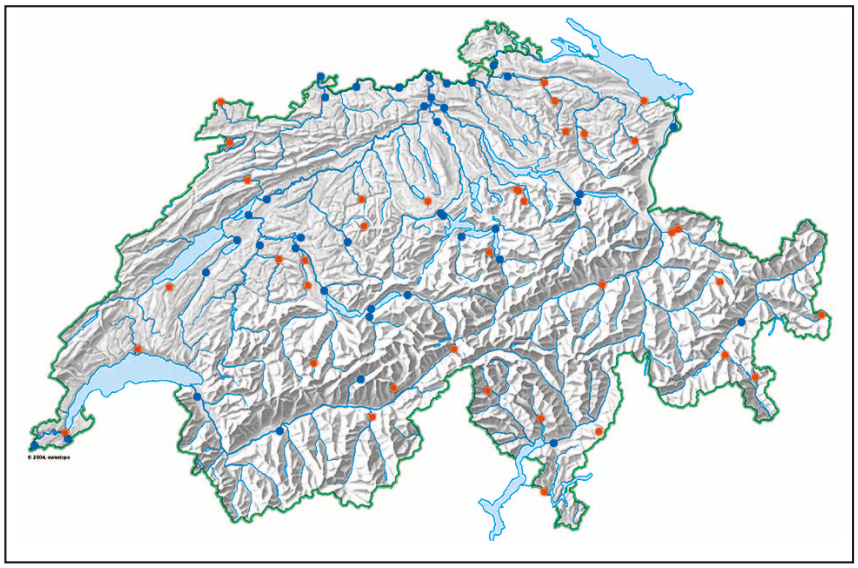

Abb. 1 Überblick über die Lage der Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes (Stand 2008): Blaue Punkte markieren diejenigen Stationen, die vor 2000 in Betrieb genommen wurden, orange Punkte markieren diejenigen Stationen, die nach 2000 in Betrieb genommen wurden.

Temperaturverhältnisse eines Fliessgewässers durch *anthropogene Einflüsse* wie z.B. durch hydroelektrische Speicherkraftwerke oder Kühl- und Abwassereinleitungen verändert [2, 3].

Die *Gewässerschutzverordnung* (GSchV) legt die Anforderungen für die Temperaturverhältnisse in Oberflächengewässern fest. Demnach muss die Wasserqualität so beschaffen sein, dass die Temperaturverhältnisse naturnah sind. Zudem dürfen durch Wasserentnahmen, Wassereinleitungen und bauliche Eingriffe die Temperaturverhältnisse des Gewässers nicht derart verändert werden, dass die für das Gewässer typischen Lebensgemeinschaften nicht mehr gedeihen können. Gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand darf die Temperatur eines Fliessgewässers durch Wärmeeintrag oder -entzug um höchstens 3 °C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1,5 °C verändert werden, wobei die Wassertemperatur grundsätzlich 25 °C nicht übersteigen darf.

Im Rahmen der *nationalen Umweltbeobachtung* betreibt die Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) nebst anderen ein *Messnetz* zur Überwachung der Wassertemperaturen an ausgewählten Fliessgewässern *(Abb. 1)*. Die Messergebnisse werden regelmässig im *Hydrologischen Jahrbuch* der Schweiz [4] publiziert und im Internet dargestellt (*www.bafu.admin.ch/hydrologie*); sie können auch direkt beim BAFU bezogen werden.

Im Folgenden wird das Anfang der 2000er-Jahre erweiterte Temperaturmessnetz des Bundes vorgestellt und unter dem Aspekt der Repräsentativität anhand einer Klassifizierung der Stationen diskutiert. Im Weiteren werden die erhobenen Daten zusammengefasst dargestellt, langfristige Änderungen der Wassertemperaturen werden aufgezeigt und im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die aquatische Fauna diskutiert.

Weitere Publikationen zum Temperaturmessnetz des Bundes finden sich in [5, 6, 7, 8, 9, 10].

2. Einflussfaktoren

Das mittlere Jahrestemperaturregime an einer bestimmten Stelle im Fliessgewässer weist einen sinusähnlichen Verlauf auf, der um einige Wochen verzögert der Kurve der mittleren Lufttemperatur am betreffenden Ort folgt, wobei der Temperaturanstieg meist langsamer als der Temperaturabfall ist. Dieser mehr oder weniger ausgeprägte Jahresgang des Temperaturverlaufes ist in erster Linie das Resultat von klimatischen Faktoren, wie Sonneneinstrahlung, Abstrahlung, Niederschlag, Verdunstung, Kondensation, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Wärmeaustausch mit dem Untergrund und der Luft [1]. Kurzfristige und langfristige Abweichungen sowie Abschwächungen und Verstärkungen von diesem sinusähnlichen Verlauf werden von den folgenden *natürlichen* und *anthropogenen Einflüssen* bewirkt:

Meteorologische Verhältnisse

Eine Schlechtwetterlage bewirkt im Sommer eine Abkühlung, da einerseits die Sonneneinstrahlung und damit die Erwärmung des Wassers reduziert werden und andererseits mit dem Niederschlag kälteres Wasser in das Fliessgewässer gelangt. Im Winter hingegen bewirkt eine Schlechtwetterlage eine Erwärmung des Wassers, da einerseits die Wärmeabstrahlung bzw. die Abkühlung des Wassers vermindert wird und andererseits das Niederschlagswasser bei Regen im Winter meist höhere Temperaturen als das Flusswasser aufweist, weil die Temperaturamplituden im Boden geringer sind. Meteorologische Einflüsse wirken kurzfristig und können grosse jährliche Unterschiede in den Temperaturganglinien bewirken.

Ökomorphologie

Ein grosses Gefälle und eine grosse Bettrauhigkeit bewirken aufgrund der grösseren Reibung eine Temperaturzunahme in einem Fliessgewässer [11]. Vor allem bei alpinen Fliessgewässern im Winter bei niedrigem Abfluss kann dies zu tendenziell höheren Wintertemperaturen führen als aufgrund der klimatischen Bedingungen zu erwarten wären. Die Vegetation entlang eines Fliessgewässers kann durch Beschattung vor allem im Sommer Abweichungen gegenüber unbeschatteten Gewässern um mehrere Grad Celsius bewirken [12].

Grundwassereinfluss

Grundwasserexfiltrationen bewirken eine Glättung der Jahresganglinie des entsprechenden Fliessgewässers. Sie haben geringere Temperaturamplituden zur Folge, als dies bei vergleichbaren Fliessgewässern ohne relevante Grundwasserexfiltration der Fall ist. Dies, weil das Grundwasser über das ganze Jahr hinweg eine relativ konstante Temperatur aufweist, welche in der Regel der Jahresmitteltemperatur der Luft am betreffenden Ort entspricht [13]. Zudem wirkt sich ein starker Grundwassereinfluss dämpfend auf kurzfristige, wetterbedingte Temperaturschwankungen aus, was insbesondere im Winter bei niedrigem Abfluss ersichtlich ist.

Schnee- und Gletscherschmelze

Ein hoher Anteil an Schnee- und Gletscherschmelzwasser am Gesamtabfluss eines Fliessgewässers führt vor allem im Sommer zu tieferen Wassertemperaturen, bewirkt eine Verringerung der Jahrestemperaturamplitude und reduziert die Ausgangstemperatur eines Fliessgewässers [14].

Seen

Seen haben die Funktion eines Wärmespeichers. Sie erwärmen sich im oberflächennahen Bereich im Sommer aufgrund ihrer grossen Oberfläche und dem stehenden Wasser viel stärker als Fliessgewässer. Im Herbst und Winter hingegen kühlen sich Seen aufgrund ihres grösseren Volumens und der hohen Wärmespeicherkapazität viel weniger schnell ab. Seeausflüsse zeigen deshalb im Sommer und im Winter generell höhere Temperaturen als Seezuflüsse. Der Jahresmittelwert der Messstation beim Zufluss kann bis zu 5 °C tiefer sein als jener beim Seeausfluss [15].

Hydroelektrische Speicherkraftwerke

Diese wirken sich unterschiedlich auf das Temperaturregime eines Fliessgewässers aus. Auf Restwasserstrecken bewirkt die hydroelektrische Nutzung infolge des geringeren Abflusses im Winter eine Abnahme und im Sommer eine Zunahme der Wassertemperatur. Auf Gewässerabschnitten, die unterhalb der Wasserrückgabestelle liegen, wird die Wassertemperatur durch das aus dem Stausee turbinierte Wasser im Winter aufgewärmt und im Sommer abgekühlt [2]. In der Rhone beispielsweise wird die Temperatur im Winter durch den Kraftwerkseinfluss um etwa 2 °C erhöht und im Sommer um rund 1 °C reduziert [2].

Kühlwassereinleitungen

Kühlwassereinleitungen aus thermischen Kraftwerken bewirken grundsätzlich eine Erwärmung des Wassers. Im Winter ist sie stärker als im Sommer. Die Temperatur der Aare wird beispielsweise durch die Kühlwassereinleitung des Kraftwerks Mühleberg durchschnittlich um 1,3 °C erhöht, im Winter sogar um bis zu 3,4 °C [2].

Abwassereinleitungen

Abwassereinleitungen bei Regenwetter aus Misch- und Trennsystemen können speziell in kleinen Gewässern zu einem temporären Temperaturanstieg führen, da das Wasser von versiegelten Flächen in den meisten Fällen um einige Grade wärmer ist als das Fliessgewässer [16].

Klimaänderung

Änderungen von klimatischen Faktoren wirken sich direkt auf die Wassertemperaturen aus. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass Änderungen des *Nordatlantischen Oszillation Indexes* (NAO) einen grossen Einfluss sowohl auf die Wassertemperaturen von Seen in ganz Zentraleuropa [17] als auch auf die Temperaturen der Fliessgewässer in der Schweiz haben [18].

3. Ökologische Bedeutung

Die Temperatur beeinflusst die physikalischen und chemischen Prozesse sowie die biologischen und biochemischen Vorgänge im Wasser und wirkt sich somit indirekt und direkt auf die *aquatischen Organismen* aus.

Die Löslichkeit von Gasen nimmt mit steigenden Temperaturen ab. So enthält wärmeres Wasser weniger gelösten Sauerstoff, welcher für aquatisches Leben essentiell ist. Die Stoffwechselvorgänge werden mit steigenden Temperaturen beschleunigt und der Sauerstoffbedarf nimmt zu, was bei gleichzeitig verringertem Sauerstoffangebot für viele Organismen zu Stress führen kann. Die Temperatur bestimmt auch Dauer, Verlauf und Geschwindigkeit des Wachstums. Bei *Fischen* beispielsweise können Temperaturveränderungen zu Verschiebungen der Laichzeiten führen [19]. Bei *Makroinvertebraten* beeinflussen Temperaturveränderungen die Generationsdauer und bewirken damit eine Verschiebung des Zeitpunktes der Emergenz, was den gesamten Lebenszyklus verändern kann [20].

Die Lebensfähigkeit und -aktivität aquatischer Organismen hängt zudem von optimalen Temperaturbereichen und Temperaturextremwerten ab. Die optimalen und letalen Temperaturbereiche sind je nach Organismen unterschiedlich. So können beispielsweise bei Forellen, Felchen oder Äschen ab ca. 18 °C Stresssymptome auftreten und Temperaturen über 25 °C bereits tödlich sein. Karpfen, Barsche und Hechte hingegen ertragen hohe Temperaturen besser [19]. Der Edelkrebs bevorzugt die wärmeren Gewässer mit Temperaturen bis maximal 24 °C im Gegensatz zum Steinkrebs, der eher kühlere Gewässer mit Temperaturen bis maximal 20 °C favorisiert [21]. Bei den Wirbellosen bevorzugen Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven grundsätzlich niedrigere Temperaturen als z.B. Köcherfliegenlarven und Libellenlarven [22].

Stark temperaturabhängig ist auch der Ausbruch von *Krankheiten* bei Fischen wie beispielsweise der *proliferativen Nierenkrankheit* (PKD). Bachforellen können bei Temperaturen unter etwa 15 °C zwar eine pathologische Reaktion des Nierengewebes entwickeln, sterben aber

nicht daran. Ein Ausbruch der Krankheit mit hoher Mortalitätsrate erfolgt hingegen dann, wenn Erreger vorhanden sind und gleichzeitig die Wassertemperaturen während zweier Wochen oder länger einen Tagesmittelwert von 15 °C überschreiten [23].
Viele Organismen haben je nach Lebensstadien unterschiedliche Temperaturpräferenzen. Das Vorkommen mancher Arten ist somit aufgrund der Vorlieben und Toleranzen auf bestimmte Flussabschnitte beschränkt. Die Wassertemperatur legt damit Habitatsgrenzen in unseren Fliessgewässern fest. Langfristige Veränderungen der Wassertemperaturen beeinflussen deshalb das Vorkommen und die Zusammensetzung der aquatischen Organismen in Fliessgewässern und können das Aufkommen von Neozoen und Neophyten fördern.

4. Temperaturmessnetz

4.1 Ziel und Konzept

Das Ziel des nationalen Temperaturmessnetzes besteht darin, Grundlagen für die Erfolgskontrolle der schweizerischen Umweltschutzgesetzgebung zu liefern sowie Ursachen- und Wirkungsanalysen zu ermöglichen [24]. Um dieses Ziel zu erreichen ist es wichtig, dass die Stationen einen gesamtschweizerischen Überblick gewährleisten und die Vielfalt der Schweizer Fliessgewässer repräsentieren.
Damit die im Rahmen des Temperaturmessnetzes untersuchten Fliessgewässer zusammenfassend charakterisiert werden können und das Messnetz im Hinblick auf seine Repräsentativität besser beurteilt werden kann, müssen die einzelnen Messstationen aufgrund ihres Jahres-Temperaturregimes klassifiziert werden.

4.2 Datenerhebung

Das nationale Temperaturmessnetz wurde 1963 in Betrieb genommen und seither laufend erweitert. Es umfasst zurzeit 78 Stationen *(Tab. 1, Abb. 1)*. Die grösste Erweiterung im Messnetz von 40 auf 75 Messstationen erfolgte im Rahmen der Neuformulierung der Zielsetzungen des Temperaturmessnetzes in den Jahren 2000–2002.
Die Temperaturmessungen werden mit Temperatursonden kontinuierlich in 10-Minuten-Intervallen erhoben. Historische Temperaturdaten wurden teilweise mittels täglichen Stichproben erhoben. Die Daten bilden die Grundlage für die Berechnungen von Tages-, Monats-, Jahresmittelwerten und Mittelwerten über beliebige Zeitperioden. Der Beginn der Messperiode mit kontinuierlichen und als Stichproben durchgeführten Temperaturmessungen ist in der *Tabelle 1* ersichtlich. Die

Gewässer	Station	Beginn	Höhe Station (m ü. M.)	Fläche EG (km²)	mittlere Höhe EG (m ü. M.)	Verglet-scherung (%)	Fluss-gebiet
Aare	Bern, Schönau	1970	502.00	2969.00	1610.00	8.00	Aare
Aare	Brienzwiler	1964/69	570.00	554.00	2150.00	21.00	Aare
Aare	Brugg	1963/70	332.00	11750.00	1010.00	2.00	Aare
Aare	Brügg, Aegerten	1963/70	428.00	8317.00	1150.00	2.90	Aare
Aare	Felsenau, KW Klingnau	1960/70	312.00	17779.00			Aare
Aare	Hagneck	1971	437.00	5128.00	1380.00	4.50	Aare
Aare	Ringgenberg, Goldswil	1964/80	564.00	1129.00	1970.00	16.20	Aare
Aare	Thun	1971	548.00	2490.00	1760.00	9.50	Aare
Aare	Untersiggenthal, Stilli	1963/69	326.00	17625.00	1050.00	2.10	Aare
Allaine	Boncourt, Frontière	2002	366.00	215.00	559.00		Rhône
Allenbach	Adelboden	2002	1297.00	28.80	1856.00		Aare
Alp	Einsiedeln	2003	840.00	46.40	1155.00		Limmat
Arve	Genève, Bout du Monde	1969	380.00	1976.00	1370.00	6.10	Rhône
Biber	Biberbrugg	2003	825.00	31.90	1009.00		Limmat
Birs	Münchenstein, Hofmatt	1972	268.00	911.00	740.00		Rhein
Broye	Payerne, Caserne d`aviation	1976	441.00	392.00	710.00		Aare
Canal de la Broye	Sugiez	1999	429.00	697.00	630.00		Aare
Dischmabach	Davos, Kriegsmatte	2004	1668.00	43.30	2372.00	2.10	Rhein
Doubs	Ocourt	2002	417.00	1230.00	950.00		Rhône
Emme	Emmenmatt	1976	638.00	443.00	1070.00		Aare
Engelberger Aa	Buochs, Flugplatz	1983	443.00	227.00	1620.00	4.30	Reuss
Glatt	Rheinsfelden	1976	336.00	416.00	498.00		Rhein
Goldach	Goldach, Bleiche	2004	399.00	49.80	833.00		Rhein
Grossbach	Gross, Säge	2003	940.00	9.06	1276.00		Limmat
Grosstalbach	Isenthal	2004	767.00	43.90	1820.00	9.30	Reuss
Gürbe	Belp, Mülimatt	2007	522.00	117.00	837.00		Aare
Inn	S-chanf	1981	1645.00	615.00	2470.00	15.60	Inn
Kleine Emme	Littau, Reussbühl	1973/78	431.00	477.00	1050.00		Reuss
Landquart	Felsenbach	2003	571.00	616.00	1800.00	1.40	Rhein
Langeten	Huttwil, Häberenbad	2002	597.00	59.90	766.00		Aare
Limmat	Baden, Limmatpromenade	1969/70	351.00	2396.00	1130.00	1.10	Limmat
Linth	Mollis, Linthbrücke	1964/71	436.00	600.00	1730.00	4.40	Limmat
Linth	Weesen, Biäsche	1964/70	419.00	1061.00	1580.00	2.50	Limmat
Lonza	Blatten	1967/86	1520.00	77.80	2630.00	36.50	Rhône
Lütschine	Gsteig	1964/86	585.00	379.00	2050.00	17.40	Aare
Massa	Blatten bei Naters	2003	1446.00	195.00	2945.00	65.90	Rhône
Mentue	Yvonand, La Maugettaz	2002	449.00	105.00	679.00		Aare
Muota	Ingenbohl	1974	438.00	316.00	1360.00	0.08	Reuss
Murg	Frauenfeld	2007	390.00	212.00			Rhein
Murg	Wängi	2002	466.00	78.90	650.00		Rhein

Messgenauigkeit im Temperaturmessnetz des BAFU wird durch regelmässige *Vergleichsmessungen* mit geeichten Thermometern gewährleistet. Die Genauigkeit der Systeme beträgt ±0,15 ºC ±0,02 ºC/ºC.

4.3 Klassifizierung der Messstationen

Die Klassifizierung erfolgte mit Hilfe einer *Clusteranalyse*, welche Ähnlichkeiten zwischen den Stationen in Bezug auf ihr Jahres-Temperaturregime aufzeigte und eine grobe Einteilung in verschiedene Cluster erlaubte. Bei der Bildung der Cluster wurden die Daten aus mehreren Jahren (1999–2007) ausgewertet, um jährliche Schwankungen im Temperaturregime aufgrund von einzelnen Wetterereignissen ausgleichen zu können.

Basierend auf den Ergebnissen der Clusteranalyse wurde die Gruppeneinteilung verfeinert. Gebietsparameter und zusätzliche Kenntnisse über Faktoren im Einzugsgebiet der betrachteten Fliessgewässer, welche das Temperaturregime beeinflussen, wurden für die Differenzierung berücksichtigt.

Die Klassifizierung der Messstationen wird einerseits anhand der mittleren Höhe des Einzugsgebietes – wichtigster Temperatur beeinflussender Gebietsparameter – und andererseits anhand von drei das Temperaturregime beeinflussenden Faktoren – Seeeinfluss, Grundwasserexfiltration und hydrologische Speicherkraftwerke – dargestellt *(Tab. 2)*. Letztere wurden in dieser Arbeit als bedeutendste Einflüsse erachtet. Die Einteilung der Gebietshöhe nach geobotanischen Kriterien in die vier Höhenstufen *alpin, subalpin, montan* und *kollin* ergab die beste Differenzierung, weil hierbei die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse der Süd-, Nord- und Zentralalpen sowie des Juras berücksichtigt werden. Es gilt zu beachten, dass sich die Höhenstufen je nach Region auf unterschiedliche Meereshöhen beziehen *(Tab. 3)* [25]. Der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet wurde in dieser Klassifizierung nicht als Haupteinflussfaktor definiert, da er ebenfalls von der Höhe des Einzugsgebiets abhängig ist.

Die *Erkenntnisse* der Klassifizierung können folgendermassen zusammengefasst werden *(Abb. 2)*:

– Je alpiner die mittlere Einzugsgebietshöhe einer Station, desto niedriger sind sowohl die Winter- als auch die Sommertemperaturen und desto geringer sind die Jahresamplituden des Temperaturregimes. Je höher der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet, desto mehr wird dieser Effekt verstärkt. Typische Temperaturbereiche von naturnahen Fliessgewässern der entsprechenden

Gewässer	Station	Beginn	Höhe Station (m ü. M.)	Fläche EG (km^2)	mittlere Höhe EG (m ü. M.)	Vergletscherung (%)	Flussgebiet
Necker	Mogelsberg, Aachsäge	2007	606.00	88.20	959.00	0.00	Rhein
Poschiavino	La Rösa	2004	1860.00	14.10	2283.00	0.35	Adda
Reuss	Luzern, Geissmattbrücke	1973	432.00	2251.00	1500.00	4.20	Reuss
Reuss	Mellingen	1969/70	345.00	3382.00	1240.00	2.80	Reuss
Reuss	Seedorf	1971	438.00	832.00	2010.00	9.50	Reuss
Rhein	(Oberwasser) Laufenburg	1970/71	299.00	34074.00			Rhein
Rhein	(Oberwasser) Rheinau	1971/72	353.00				Rhein
Rhein	Basel, Klingenthalfähre	2003	245.00				Rhein
Rhein	Diepoldsau, Rietbrücke	1963/84	410.00	6119.00	1800.00	1.40	Rhein
Rhein	Rekingen	1969/70	323.00	14718.00	1080.00	0.57	Rhein
Rhein	Rheinfelden, Messstation	1971	262.00	34550.00	1039.00	1.30	Rhein
Rhein	Weil, Palmrainbrücke	1954/77	244.00				Rhein
Rhône	Chancy, Aux Ripes	1971/72	336.00	10299.00	1580.00	8.40	Rhône
Rhône	Genève, Halle d'ile	2003	367.00	7987.00	1670.00	9.40	Rhône
Rhône	Oberwald	2003	1368.00	95.00	2467.00	25.60	Rhône
Rhône	Porte du Scex	1968/71	377.00	5220.00	2130.00	14.30	Rhône
Rhône	Sion	1974	484.00	3349.00	2310.00	18.40	Rhône
Riale di Calneggia	Cavergno, Pontit	2002	890.00	24.00	1996.00	0.00	Ticino
Riale di Pincascia	Lavertezzo	2004	536.00	44.40	1708.00	0.00	Ticino
Riale di Roggoiasca	Roveredo	2003	980.00	8.06	1711.00	0.00	Ticino
Rietholzbach	Mosnang, Rietholz	2002	682.00	3.31	795.00	0.00	Rhein
Rom	Müstair	2003	1236.00	129.70	2187.00	0.12	Etsch
Rosegbach	Pontresina	2004	1766.00	66.50	2716.00	30.10	Inn
Saane	Gümmenen	1981	473.00	1880.00	1131.00	0.20	Aare
Sellenbodenbach	Neuenkirch	2003	515.00	10.50	615.00	0.00	Aare
Sense	Thörishaus, Sensematt	2003	553.00	352.00	1068.00	0.00	Aare
Sitter	Appenzell	2006	769.00	74.20	1252.00	0.00	Rhein
Sperbelgraben	Wasen, Kurzeneialp	2002	911.00	0.54	1063.00	0.00	Aare
Suze	Sonceboz	2004	642.00	150.00	1050.00	0.00	Aare
Taschinasbach	Grüsch, W.F. Lietha	2003	666.00	63.00	1768.00	0.04	Rhein
Thur	Andelfingen	1963/69	356.00	1696.00	770.00	0.00	Rhein
Ticino	Riazzino	1978	200.00	1611.00	1640.00	0.65	Ticino
Tresa	Ponte Tresa, Rocchetta	2003	268.00	615.00	800.00	0.00	Ticino
Venoge	Ecublens, Les Bois	2002	383.00	231.00	700.00	0.00	Rhône
Vispa	Visp	2003	659.00	778.00	2660.00	29.50	Rhône
Vorderrhein	Illanz	2002	693.00	776.00	2020.00	3.80	Rhein
Worble	Ittigen	1989	522.00	60.50	679.00	0.00	Aare

Tab. 1 Messstellen des nationalen Wassertemperaturmessnetzes des BAFU mit den wichtigsten Kenngrössen zu ihrem Einzugsgebiet (Stand 2007). Bei einigen Stationen sind zwei unterschiedliche Jahre für den Beginn der Messperiode angegeben. Dabei bezieht sich das frühere Jahr auf Beginn der Temperaturmessungen mittels Stichproben, das spätere Jahr auf den Messbeginn mit kontinuierlich erhobenen Daten.

Gebietshöhen sind in der *Tabelle 4* dargestellt.

– Gegenüber den unbeeinflussten Stationen in allen Höhenlagen zeigen sich der Seeeinfluss in höheren Sommer- und Wintertemperaturen, der Grundwassereinfluss in einer ausgeglicheneren Temperaturamplitude und der Einfluss von hydroelektrischen Speicherkraftwerken in höheren Wintertemperaturen und niedrigeren Sommertemperaturen *(Abb. 2a, b, c)*.

Fast alle ausgewerteten Stationen des nationalen Temperaturmessnetzes konnten eindeutig anhand ihres Temperaturregimes und anhand der Kenntnisse über die Temperatur beeinflussenden Faktoren in *15 Gruppen* eingeteilt werden *(Tab. 2)*. Bei der Glatt-Rheinsfelden war die Einteilung erschwert, weil kein eindeutiger Haupteinfluss zu erkennen ist, bzw. weil sich zwei Haupteinflüsse (Grundwasserexfiltration und Seeeinfluss) überlagern. Der Grundwassereinfluss wurde aufgrund des Temperaturregimes als bedeutender gewichtet. Bei der Lütschine-Gsteig können die relativ hohen Wintertemperaturen nicht erklärt werden. Diese Station wird jedoch als unbeeinflusst klassifiziert, da keine Kenntnisse von Einflussfaktoren ersichtlich sind.

	Höhenstufen			
Haupteinflüsse	**alpin**	**subalpin**	**montan**	**kollin**
Seeausfluss	Aare, Ringgenberg[4] (+0,5°C) ↑	Aare, Thun (+0,8°C) ↑ Aare, Bern (+0,9°C) ↑ Linth, Weesen (+1,0°C) ↑↑↑	Aare, Brugg (+0,9°C) ↓↑↑↑ Aare, Brügg, Aegerten (+1,0°C) ↓↑↑↑ Aare, Felsenau (+0,9°C) ↓↑↑↑ Aare, Hagneck (+0,9°C) ↑↑ Aare, Untersiggenthal (+0,9°C) Limmat, Baden (+1,0°C) ↓↑↑ Reuss, Luzern (+1,2°C) ↓↑↑↑ Reuss, Mellingen (+0,9°C) ↓↑↑↑ Rhein, Laufenburg (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rekingen (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rheinau (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rheinfelden (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Weil[2] (+1,1°C) ↓↑↑ Rhone, Chancy (+0,8°C) ↑↑↑ *Rhone, Genève*	*Canal de la Broye, Sugiez* *Tresa, Ponte Tresa*
Grundwasser	*Rom, Müstair*	*Grosstalbach, Isental* *R. di Calneggia, Cavergno*	*Suze, Sonceboz*	*Allaine, Boncourt* Birs, Münchenstein (+0,6°C) ↑↑↑ *Doubs, Ocourt* Glatt, Rheinsfelden[1] (+0,6°C) ↓↑↑↑ *Langeten, Huttwil* *Murg, Frauenfeld* *Murg, Wängi* *Rietholzbach, Mosnang* *Venoge, Ecublens* Worble, Ittigen[8] ↑↑
Speicher-kraftwerk	Aare, Brienzwiler (+0,2°C) Rhone, Porte du Scex (+0,4°C) Rhone, Sion (+0,2°C) *Vispa, Visp*	Engelberger Aa, Buochs[6] (+0,2°C) *Landquart, Felsenbach* Linth, Mollis (+0,4°C) Reuss, Seedorf (+0,4°C) Rhein, Diepoldsau (+0,5°C) ↑ *Vorderrhein, Illanz*	Arve, Genève (+0,4°C) Muota, Ingenbohl (+0,1°C) Saane, Gümmenen[5] (+0,7°C) ↑↑ *Sitter, Appenzell* Ticino, Riazzino[3] (+0,8°C) ↑↑	
unbeeinflusst bzw. keine ersichtlichen Haupteinflüsse	*Dischmabach, Davos* Inn, S-chanf[5] (+0,3°C) Lonza, Blatten[7] (–0,2°C) Lütschine, Gsteig[7] (+0,2°C) *Massa, Blatten bei Naters* *Poschiavino, La Rösa* *Rhone, Oberwald* *Rosegbach, Pontresina*	*Allenbach, Adelboden* *R. di Roggoisca, Roveredo* *Taschinasbach, Grüsch*	Alp, Einsiedeln Biber, Biberbrugg Emme, Emmenmatt 1 (+0,7°C) ↑↑ *Grossbach, Gross* *Necker, Mogelsberg* *R. di Pincascia, Lavertezzo* *Sense, Thörishaus* *Sperbelgraben, Wasen*	Broye, Payerne[1] (+1,0°C) ↑↑↑ *Goldach, Goldach* Kleine Emme, Littau[3] (+0,7°C) ↑ ↑ *Mentue, Yvonand* *Sellenbodenbach, Neuenkirch* Thur, Andelfingen (+0,8°C) ↑↑↑

Tab. 2 Klassifizierung der Messstellen des Wassertemperaturmessnetzes unter Berücksichtigung der mittleren Höhe des Einzugsgebietes gegenüber der Haupteinflüsse «See», «Grundwasserexfiltration», «Hydroelektrisches Speicherkraftwerk». Die neuen Stationen, die nach 2000 in Betrieb genommen wurden, sind kursiv gekennzeichnet. In Klammern ist die Differenz der mittleren Jahrestemperaturen der Periode 1988–2007 und 1974–1987 angegeben. Stationen mit weniger langen kontinuierlichen Zeitreihen sind mit Zahlen markiert ([1]: ab 1976; [2]: ab 1977; [3]: ab 1978; [4]: ab 1980; [5]: ab 1981; [6]: ab 1983; [7]: ab 1987; [8]: ab 1989).

↓↑ Ab- bzw. Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 15 und 18 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 18 und 21 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 21 und 24 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden > 24 °C seit Beginn der Messperiode

4.4 Repräsentativität

Aufgrund der Klassifizierung der Messstationen kann festgehalten werden, dass durch die Messnetzerweiterung seit 2000 die Repräsentativität deutlich erhöht wurde. Während die historischen Stationen hauptsächlich grosse, anthropogen beeinflusste Fliessgewässer des Mittellandes repräsentierten, werden aktuell auch kleine, nicht anthropogen beeinflusste Fliessgewässer in höheren Lagen erfasst *(Tab. 2)*. Die von einem See beeinflussten Stationen

	Wintertemperatur	Sommertemperatur
alpin	<2 °C	<10 °C
subalpin	<2 °C	10–15 °C
montan	<3 °C	13–20 °C
kollin	0,5–4 °C (sehr variabel)	16–22 °C

Tab. 4 Typische Temperaturbereiche von naturnahen Fliessgewässern ohne ersichtliche Beeinflussung mit Einzugsgebietshöhen der vier Höhenstufen.

	Obergrenze (m ü. M.)				Vegetation	Vegetation Obergrenze
	Nordalpen	Zentralalpen	Südalpen	Jura		
alpin	2400–2500	2700–3000	2400–2500		Zwergsträucher, Rasen	Vegetationsgrenze
subalpin	1800–2100 (2000)	2000–2500 (2300)	1800–2100 (2000)		Nadelwälder	Baumgrenze
montan	1100–1500 (1300)	1000–1800 (1500)	1700 (1700)	1300–1500 (1400)	Buchenwälder und Buchen-Nadelmischwälder/Nadelwälder (nur Zentralalpen)	Buche/Waldföhre (nur Zentralalpen
kollin	600–800 (700)	600–1000 (800)	800–1000 (900)	600–800 (700)	sommergrüne Laubwälder	Eichen

Tab. 3 Einteilung der Höhenstufen nach geobotanischen Kriterien. Es ist zu beachten, dass die Höhenstufen nicht durch eine klare Höhengrenze, sondern durch einen Grenzbereich getrennt sind. In Klammern sind die Höhen angegeben, welche für Einteilung der Temperaturmessstationen angenommen wurden. *(Quelle: [25])*

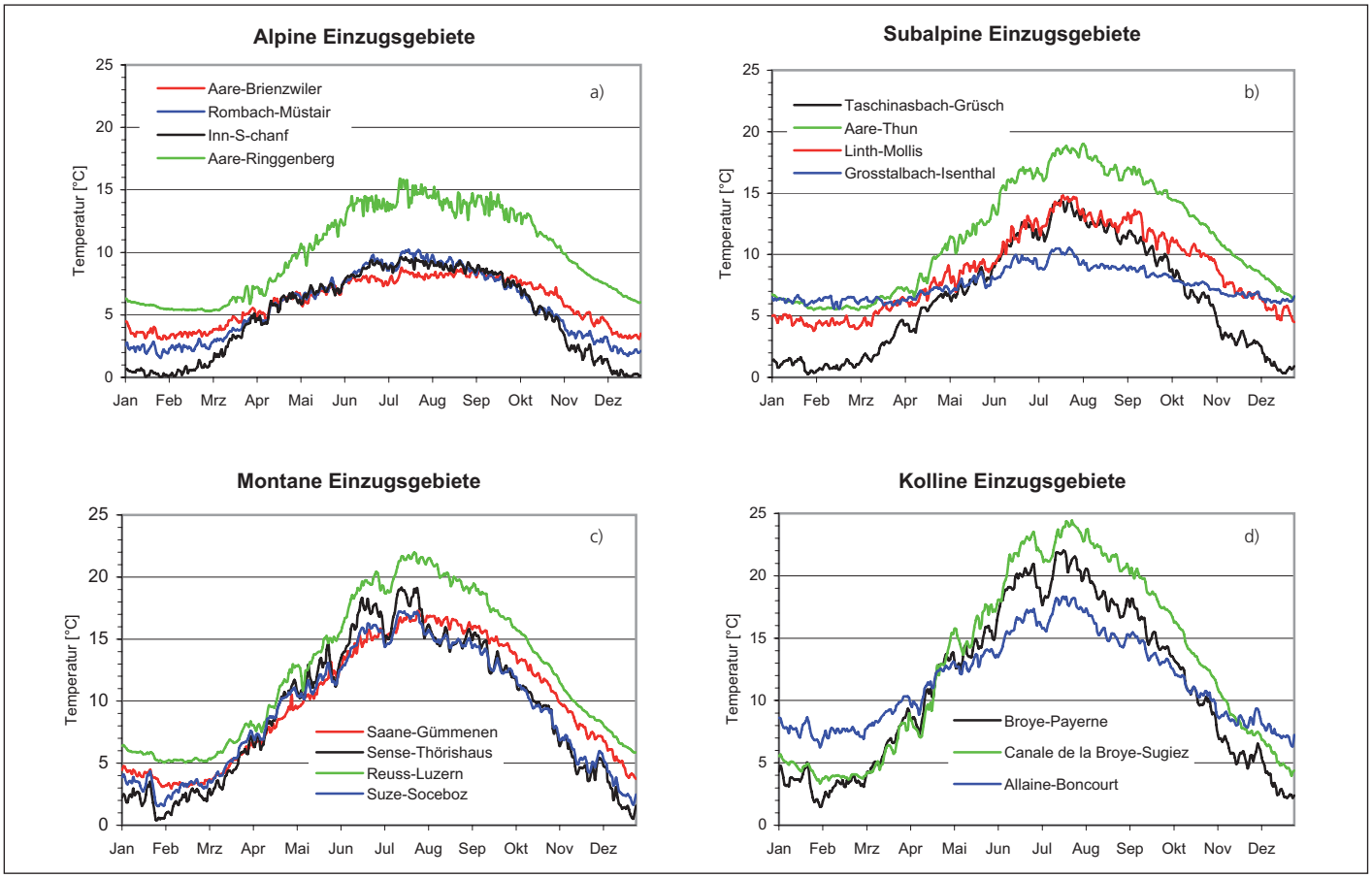

Abb. 2 Jahresganglinien der Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes. Je höher die mittlere Höhe des Einzugsgebietes ist, desto kälter sind die Winter- und Sommertemperaturen und desto kleiner sind die Temperaturamplituden. Ein Seeeinfluss *(grün)* erhöht tendenziell die Sommer- und Wintertemperaturen, ein Grundwassereinfluss *(blau)* hat eine ausgleichende Wirkung auf die Temperaturamplituden und hydroelektrische Speicherkraftwerke *(rot)* erhöhen die Wintertemperaturen und erniedrigen tendenziell die Sommertemperaturen. Die Jahresganglinie von unbeeinflussten Stationen ist *schwarz* dargestellt. Die Werte entsprechen den durchschnittlichen Tagesmittelwerten über die Jahre 2003–2007.

mit montaner Einzugsgebietshöhe sind jedoch immer noch sehr stark im Messnetz vertreten, während Stationen, welche sich in montaner bis alpiner Lage befinden und vom Grundwasser beeinflusst sind, eher schwach vertreten sind. Je nach Ausrichtung der zukünftigen Erhebungen der Wassertemperaturen und je nach Schwerpunktsetzung der Fragestellungen besteht in diesem Bereich noch ein Potenzial, das im Bedarfsfall und mit den entsprechenden Ressourcen noch weiter ausgeschöpft werden kann.

5. Wassertemperaturwandel

5.1 Jahresmitteltemperaturen

Die Zeitreihen der Wassertemperaturen zeigen seit Beginn der Messperiode eine Zunahme der Jahresmittelwerte bei der Mehrheit der Stationen um 0,1–1,2 °C, wobei ein markanter Anstieg zwischen 1987 und 1988 ersichtlich ist *(Abb. 3)* [9, 18]. Dieser Temperatursprung zwischen 1987 und 1988 kann auf eine Änderung des Nordatlantischen Oszillationsindexes zurückgeführt werden und ist also klimatisch bedingt [9, 17]. Aufgrund dieser Tatsache wurden für viele Darstellungen die beiden Perioden 1974–1987 und 1988–2007 einander gegenübergestellt. Bei 28 Stationen wurde eine Analyse der Tagesmittelwerte für die Perioden 1974–1987 und 1988–2007 durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass bei den Stationen Lütschine-Gsteig und Lonza-Blatten die Daten bis 1986 als Stichproben erhoben wurden. Aufgrund des Zeitpunktes der Stichprobenentnahme sind die historischen Daten der Lütschine mit den Tagesmittelwerten der aus den kontinuierlich erhobenen Daten nach 1987 vergleichbar. Hingegen wurden für den Vergleich der Jahresmittelwerte bei der Station Lonza-Blatten die Stichproben bis 1986 mit den Stundenmittelwerten der kontinuierlichen Daten zum Zeitpunkt der Stichprobe verwendet. Bei zehn Stationen fehlen Messungen einzelner Jahre vor 1987 *(Tab. 1 und 2)*. Die Auswirkungen auf die Periodenauswertung sind allerdings marginal.

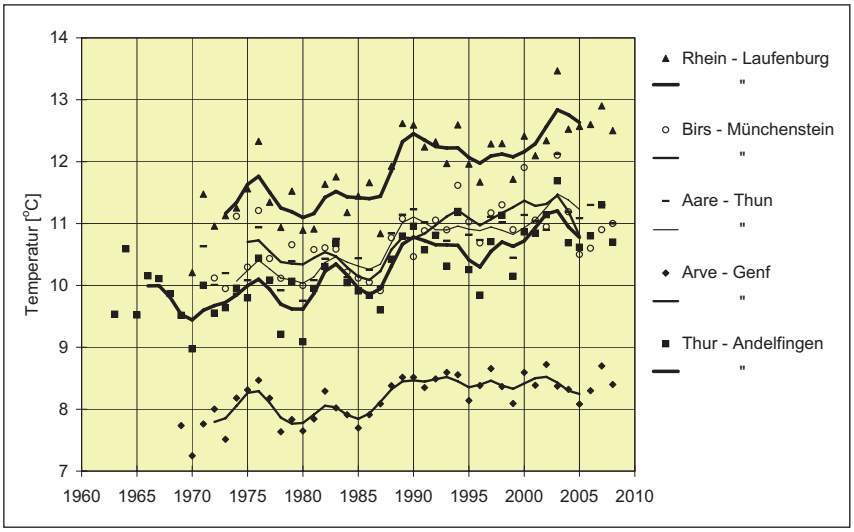

Abb. 3 Entwicklung der mittleren jährlichen Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen. Auffällig ist der Temperatursprung zwischen 1987 und 1988, der bei allen Stationen ersichtlich ist. Der Temperatursprung ist vor allem bei Messstationen wie z. B. Arve-Genf, die im Einflussbereich von Gletschern liegen, weniger deutlich.

Die festgestellten Temperaturveränderungen zwischen den beiden Perioden sind bei allen Stationen mit langjährigen Messreihen in der *Tabelle 2* aufgeführt. Die *Resultate* können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Je höher die mittlere *Höhe* des Einzugsgebietes und je höher der Grad der *Vergletscherung* im Einzugsgebiet ist, desto weniger deutlich ist die Temperaturzunahme bzw. ist sogar eine Temperaturabnahme zu verzeichnen (z. B. Lonza-Blatten).
- Bei den Stationen mit *Seeeinfluss* ist die Temperaturzunahme deutlicher als bei Stationen in vergleichbarer Höhenstufe ohne Seeeinfluss. Die Stationen mit mittlerer Einzugsgebietshöhe der montanen Stufe zeigen mit 0,8–1,2 °C die stärkste Erwärmung. Vergleichbare Daten der kollinen Höhenstufe fehlen jedoch.
- Bei den durch *hydroelektrische Nutzung* beeinflussten Stationen mit subalpiner und montaner Einzugsgebietshöhe variiert die Grössenordnung der Temperaturzunahme stark und liegt im Bereich von 0,1–0,8 °C.
- In der *kollinen Stufe* zeigen die Stationen mit Grundwassereinfluss (Glatt-Rheinsfelden, Birs-Münchenstein) eine weniger ausgeprägte Temperaturzunahme als die unbeeinflussten Stationen.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Seen im Einzugsgebiet eine klimatisch bedingte Temperaturzunahme verstärken. Demgegenüber wirkt sich ein Grundwassereinfluss dämpfend auf eine Temperaturerhöhung aus. Ein hoher Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet kompensiert aufgrund der Gletscherschmelze im Sommer eine klimatisch bedingte Temperaturerhöhung teilweise, weshalb die Temperaturzunahme bei den alpinen Stationen weniger ausgeprägt ist als bei tiefer gelegenen Stationen. Inwiefern die hydroelektrische Nutzung einen dämpfenden Einfluss auf eine mögliche klimatisch bedingte Erwärmung der Fliessgewässer hat, kann aufgrund der fehlenden Datenlage nicht beantwortet werden, da langjährige konsistente Messreihen von unbeeinflussten alpinen Stationen fehlen. Hinweise auf eine mögliche Dämpfung könnten die relativ geringen Temperaturzunahmen (0,1–0,4 °C) bei Stationen, welche durch hydroelektrische Nutzung beeinflusst sind, sich in tieferen Lagen befinden und eine geringe Vergletscherung des Einzugsgebietes aufweisen, sein.

Die Temperaturentwicklung zeigt, dass sich Flora und Fauna der Gewässer langfristig an

wärmere Bedingungen anpassen müssen. Arten, die in Mittel- oder Unterläufen beheimatet sind, werden sich flussaufwärts in Regionen verschieben, die ihnen früher noch zu kühl waren. So hat sich beispielsweise die Forellenregion bereits um 100–200 m [18] in höhere Lagen verschoben. Das Vorkommen der Alpen-Mosaikjungfer – eine in Stillgewässern vorkommende Art – hat sich um 200–500 m in höhere Lagen verschoben [20]. Zudem hat sich die Biodiversität von Pflanzen im Alpenraum oberhalb von 2900 m ü.M. signifikant erhöht [26].

5.2 Saisonale Veränderungen

In der aktuelleren Periode 1988–2005 ist im Vergleich zur Periode 1974–1987 bei praktisch allen Stationen im Frühling ein rascherer Temperaturanstieg zu beobachten als dies in früheren Jahren der Fall war *(Abb. 4)*. Eine Ausnahme bildet die Muota bei Ingenbohl *(Abb. 4d)*, bei welcher sich verschiedene Einflüsse überlagern. Die Muota liegt in einem Karstgebiet und ist zudem aufgrund der hydroelektrischen Nutzung stark durch Schwallbetrieb beeinflusst und weist deshalb extrem hohe Abflussschwankungen im Bereich < 20 % bis 80 % des mittleren normalen Jahresabflusses auf. Bei den alpinen und subalpinen Stationen liegt die Temperaturerhöhung im Frühling im Bereich von ca. 1 °C im März *(Abb. 4a, b)*, bei den montanen und kollinen Stationen bei bis zu 3 °C im Mai *(Abb. 4h)*. Auch lassen sich bei allen nicht alpinen Stationen eine Erhöhung der Sommertemperaturen und eine Verlängerung der sommerlichen Wärmeperiode feststellen. Auch diese Entwicklung entspricht den Beobachtungen der Lufttemperaturen in diesem Zeitraum [27] und ist ebenfalls ein Hinweis darauf, dass diese Temperaturveränderungen klimatisch bedingt sind. Bei den von Seen beeinflussten Stationen sind die Temperaturerhöhungen am grössten, wobei die mittlere Temperaturzunahme im Winter ca. 1 °C und im Sommer ca. 1,5–3 °C beträgt, was auf die hohe Wärmespeicherkapazität von Seen zurückzuführen ist *(Abb. 4f)*. Der Grundwassereinfluss wirkt sich dämpfend auf die sommerliche Temperaturzunahme aus, weil dann die Temperaturdifferenz zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser am grössten ist. Dies ist am Beispiel der Glatt-Rheinsfelden ersichtlich, wo die sommerliche Temperaturerhöhung niedriger ist als diejenige im Frühling *(Abb. 4g)*. Bei den alpinen und durch Gletscher beeinflussten Stationen wie z.B. bei der Lütschine-Gsteig und Rhone-Sion, ist die Temperaturerhöhung im Sommer weniger ausgeprägt oder sogar negativ, weil der Temperaturanstieg im Sommer durch vermehrtes Gletscherschmelzwasser teilweise kompensiert bzw. überkompensiert wird *(Abb. 4a, b)*. Dagegen sind die Herbsttemperaturen im Vergleich zu früheren Jahren bei den alpinen Stationen deutlich höher. Möglicherweise wirken sich bei den alpinen Stationen klimabedingte Temperaturerhöhungen aufgrund der geringen Wasserführung im Herbst am stärksten aus.

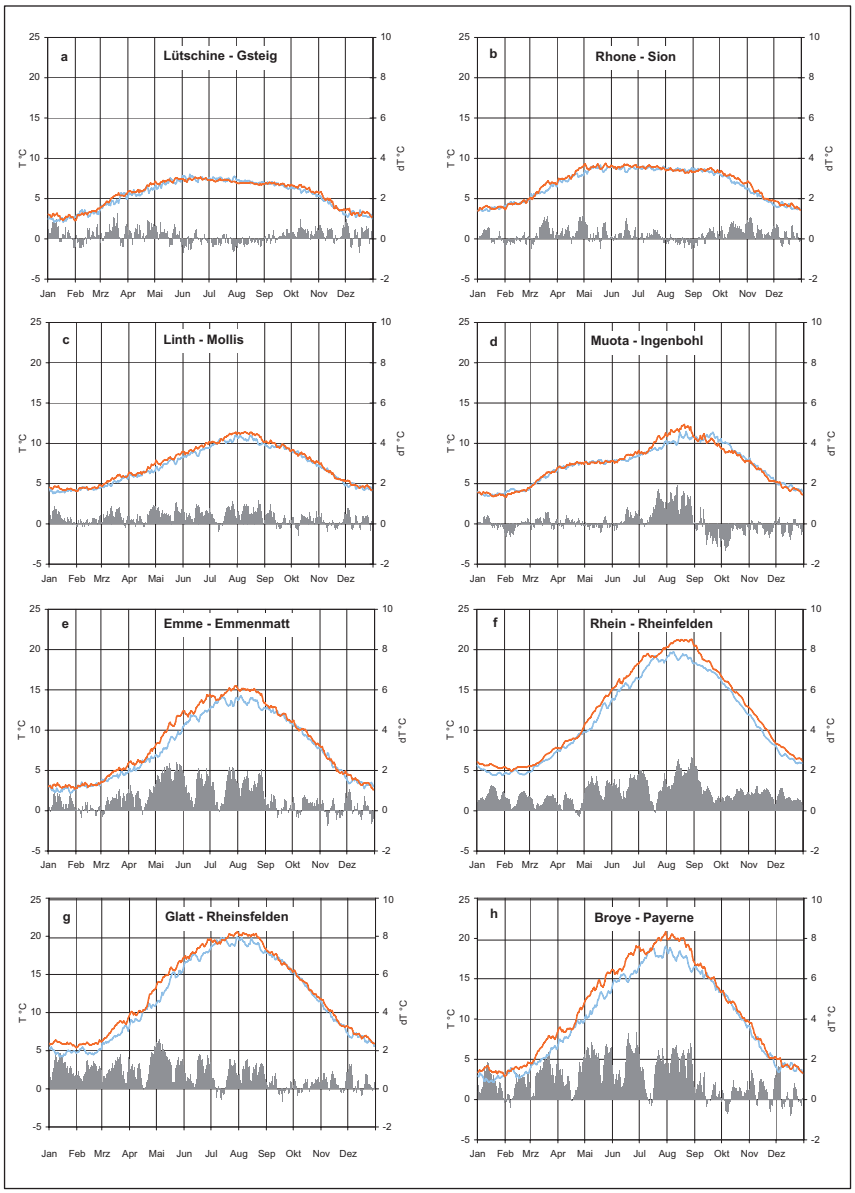

Abb. 4 Saisonaler Verlauf der Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes. Die blaue Linie bezieht sich auf die Messperiode 1974–1987 (Lütschine, Rhone, Linth, Muota, Rhein) bzw. 1976–1987 (Emme, Glatt, Broye), die rote Linie bezieht sich auf die Messperiode 1988–2005. Die schwarz eingezeichneten Säulen zeigen die Temperaturdifferenzen zwischen den mittleren Temperaturen 1988–2005 und 1976–1987 bzw. 1974–1987 und beziehen sich auf die rechte Y-Achse.

Die Erhöhung der Winter- und Frühlingstemperaturen verlängert die Wachstumsphase der Fauna und Flora allgemein. Bei lachsartigen Fischen wirken sich höhere Wintertemperaturen positiv auf die Eientwicklung aus. Durch höhere Sommertemperaturen werden die Karpfenartigen und Barsche auf Kosten der Lachsartigen, deren Stoffwechsel an tiefe Temperaturen angepasst ist, bevorteilt [19]. Bei Libellenlarven beschleunigen höhere Winter- und Frühlingstemperaturen die Emergenz. So konnten beispielsweise in verschiedenen Stillgewässern bei der Hufeisen-Azurjungfer bereits phänologische Veränderungen beobachtet werden [20].

5.3 Stundenwerte über 15 °C

Für insgesamt 38 Stationen konnte die Anzahl Stunden in den verschiedenen Temperaturwertebereichen langfristig berechnet werden, wobei sich bei rund einem Viertel dieser Stationen alle Werte unter 15 °C (Schwellenwert für PKD-Mortalität) befinden. Um die Häufigkeit hoher Wassertemperaturen zu erfassen, wurde die Anzahl Stunden ausgezählt, welche innerhalb von jeweils fünf Jahren eine Wassertemperatur von 15 °C überschritten haben. Als weitere Klassengrenze wurden aufgrund der vorgängig ausgeführten Überlegungen zur ökologischen Bedeutung der Temperatur die Werte 18 °C, 21 °C und 24 °C gewählt. Die Stundenwerte aller Stationen sind im *hydrologischen Atlas der Schweiz* (HADES) auf der Karte in Tafel 7.7 dargestellt [10].

Zwischen 1976 und 2005 lässt sich in allen Höhenlagen der Messstationen eine Zunahme der Stunden mit höheren Temperaturen feststellen (*Tab. 2)* [10]. In den montanen und subalpinen Gewässern ohne Seeeinfluss sowie in den kollinen Gewässern mit Grundwassereinfluss nehmen hauptsächlich die Stunden mit Temperaturen zwischen 15 und 18 °C bzw. 15 und 21 °C zu, was für diese Fliessgewässer bereits als hohe Temperatur bezeichnet werden muss. In den grösseren Gewässern mit Seeeinfluss nimmt die Anzahl Stunden zwischen 15 °C und 18 °C eher ab, während die Anzahl Stunden über 18 °C meist ansteigt. Der Zwischenbereich 15–18 °C wird bei diesen Messstellen im Frühling und Herbst schneller durchlaufen, dagegen verharren die Temperaturen im Sommer länger im hohen Temperaturbereich. Stunden mit Temperaturen über 24 °C werden hauptsächlich in den Flüssen mit montanem Einzugsgebiet unterhalb von Seen festgestellt, was auf die starke Erwärmung des Oberflächenwassers in Seen bei lang anhaltenden warmen Wetterlagen zurückzuführen ist. Auch in unbeeinflussten Fliessgewässern mit kollinem Einzugsgebiet wie z.B. in der Thur-Andelfingen oder Broye-Payerne treten vermehrt Temperaturen über 24 °C auf.

Die Folgen von hohen kurzfristig auftretenden Temperaturen können Fischsterben sein. Ein massives Fischsterben ereignete sich im August 2003 im Rhein: Zwischen Bodensee-Untersee und Eglisau verendeten hitzebedingt ca. 52 000 Äschen [28]. Bei den Wirbellosen leiden vor allem die Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven unter hohen Temperaturen. Für Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven konnten mittlere Letaltemperaturen im Bereich von 20–29 °C beobachtet werden [22]. Andere Wirbellose sind mit Letaltemperaturen im Bereich von 30 °C toleranter gegenüber warmen Wassertemperaturen. Ein weiteres biologisches Phänomen ist das Vorkommen von Süsswasserquallen in Seen, welche im Hitzesommer 2003 im Neuenburgersee aufgrund hoher Temperaturen beobachtet wurden. Quallen können sich nur bilden, wenn die Idealtemperatur von 25–27 °C erreicht wird [28].

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine grobe Klassifizierung der Stationen anhand ihres Temperaturregimes konnte unter Einbezug der Kenntnisse über die klimatischen Bedingungen sowie über natürliche und anthropogene Einflüsse im Einzugsgebiet der jeweiligen Fliessgewässer vorgenommen werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Haupteinflüsse nicht immer einfach und eindeutig identifiziert werden können, weil sie sich zum Teil überlagern und sich unterschiedlich auf das Temperaturregime auswirken.

Aufgrund der Klassifizierung der Messstationen kann festgehalten werden, dass sich seit der Erweiterung des Messnetzes dessen Repräsentativität stark erhöht hat, indem neu auch anthropogen unbeeinflusste und kleinere Einzugsgebiete im Messnetz erfasst werden. Das heutige Messnetz stellt damit eine gute Basis für die Erfassung der Entwicklung der Wassertemperaturen in Schweizer Fliessgewässern dar.

Die Klassifizierung hat gezeigt, dass von den diskutierten Einflüssen sich insbesondere die Grundwasserexfiltration sehr deutlich im Temperaturregime der entsprechenden Messstationen zeigt. Dieser Einfluss wurde in den bisherigen Auswertungen zu wenig berücksichtigt und nicht quantifiziert. Insbesondere bei der Modellierung der Temperaturverhältnisse, bei welcher die enge Beziehung zwischen Luft- und Wassertemperatur berücksichtigt wird, sollte der Grundwassereinfluss ebenfalls einbezogen werden. Dies vor allem im Hinblick auf eine Bewertung der Temperaturverhältnisse, die z.B. in das Modul-Stufen-Konzept des BAFU [29] eingegliedert werden könnte. Eine grosse Herausforderung stellt hierbei die Tatsache, dass sich der Grundwassereinfluss entlang des Flusslaufes ändert und sich somit, je nach Standort der Messstationen, unterschiedlich stark auf das Temperaturregime auswirkt. Interessant in diesem Zusammenhang ist auch die Frage, inwieweit sich im Bereich von Grundwasserexfiltrationen aufgrund deren ausgleichenden Wirkung auf das Temperaturregime bei extremen Wassertemperaturen Rückzugshabitate für Fische und Wirbellose bilden können. Um das Verständnis über den Einfluss des Grundwassers auf das Temperaturregime von Fliessgewässern zu erweitern, wäre es deshalb prüfenswert, noch

mehr Messstationen im Bereich von Grundwasserexfiltrationen zu errichten.

Langfristige Änderungen in den Wassertemperaturen – sowohl in den Jahresmittelwerten als auch im saisonalen Temperaturregime – konnten bei praktisch allen Messstationen festgestellt werden. Dabei sind deutliche Temperaturzunahmen in Fliessgewässern in tieferen Lagen und Temperaturabnahmen in alpinen Fliessgewässern mit einem hohen Anteil an Vergletscherung im Einzugsgebiet ersichtlich. Die Ursachen für diese Temperaturveränderungen können jedoch nicht immer eindeutig eruiert werden, da die langfristigen Messreihen zum grössten Teil bei den anthropogen beeinflussten Fliessgewässern existieren und deshalb klimatisch bedingte, natürliche Einflüsse und anthropogene Einflüsse kombiniert auf das Temperaturregime einwirken.

Die Veränderungen der Wassertemperaturen liegen jedoch in einem Bereich, welcher Anpassungen der Biologie zur Folge hat. Eine solche Anpassung der aquatischen Fauna findet bereits statt, was Beobachtungen in der Phänologie und in der Artenzusammensetzung von aquatischen Organismen bestätigen. Die vorhandenen biologischen Daten können nicht absolut eindeutig den gemessenen Temperaturveränderungen zugeordnet werden, weil oft parallel auch andere anthropogene Einflüsse die Lebensbedingungen der aquatischen Fauna verändern. In diesem Bereich ist deshalb noch ein grosser Forschungsbedarf vorhanden. Das nationale Messnetz bietet hierfür eine gute Grundlage, die es zu nutzen gilt.

Literaturverzeichnis

[1] *Baumgartner, A.; Liebscher, H.J.* (1990): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie, Bd. 1; 673 S.; Gebrüder Borntraeger, Berlin – Stuttgart.

[2] *Meier, W.; Bonjour, C.; Wüest, A.; Reichert, P.* (2003): Modeling the Effect of Water Diversion on the Temperature of Mountain Streams. Journal of Environmental Engineering 755–764.

[3] *Meier, W.; Wüest, A.* (2004): Wie verändert die hydroelektrische Nutzung die Wassertemperatur der Rhone? Wasser Energie Luft, 96, 11/12 305–309.

[4] *BAFU, Bundesamt für Umwelt:* Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz, Bern-Ittigen.

[5] *de Montmollin, F.; Jakob, A.* (1995): Temperaturverhältnisse in Fliessgewässern und Seen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz; Tafel 7.3. Landeshydrologie und -geologie, Bern.

[6] *de Montmollin, F.; Parodi, A.* (1990): Température des cours d'eau suisses, Mitteilung Nr. 12 der Landeshydrologie und -geologie, Bern. 96 S.

[7] *Jakob, A.* (2000): Temperaturentwicklung in den Fliessgewässern. Mitteilung zur Fischerei 66, 29–40, BUWAL.

[8] *Jakob, A.; Liechti, P.; Binderheim, E.* (2002): 30 Jahre NADUF – Eine Zwischenbilanz. gwa, 3/02 203–208.

[9] *Jakob, A.; Liechti, P.; Schädler, B.* (1996): Temperatur in Schweizer Gewässern – Quo vadis? gwa, 4/96 288–294.

[10] *Jakob, A.; Pfammatter, F.; Schädler, M.* (2007): Veränderungen der Temperaturen in Fliessgewässern 1976–2005. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 7.7. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[11] *Moore, J. A.; Miner, J.R.* (1997): Stream Temperatures – Some Basic Considerations, 2–6, Oregon State University.

[12] *Moosmann, L.; Schmid, M.; Wüest, A.* (2005): Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe. Eawag.

[13] *Binder, W.* (1980): Landschaftsökologische Gesichtspunkte bei der Gewässerregulierung und der Gewässerpflege. In: Institut f. Wassergüte und Landschaftswasserbau der TU Wien (Hg.), Landschaftswasserbau, Bd. 1 30–51.

[14] *Ward, J.V.* (2003): The Ecology of Alpine Streams. Eawag news 54.

[15] *Pfammatter, F.* (2004): Untersuchungen zur Wassertemperatur in schweizerischen Fliessgewässern. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

[16] *Krejci, V.; Frutiger, A.; Kreikenbaum, S.; Rossi, L.* (2004): Projekt «STORM: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter» – Gewässerbelastungen durch Abwasser aus Kanalisationen bei Regenwetter. Broschüre Eawag und BUWAL, 36 S.

[17] *Livingstone, D.M.; Dokulil, M.T.* (2001): Eighty years of spatially coheren Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation. Limnology and Oceanography 46 1220–1227.

[18] *Hari, R.E.; Livingstone, D.M.; Siber, R.; Burkhardt-Holm, P.; Güttinger, H.* (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology 12 10–16.

[19] *Küttel, S.; Peter, A.; Wüest, A.* (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fliessgewässer. Rhône Revitalisierung Publikation Nummer 1.

[20] *Oertli, B.; Rosset, V.; Lehmann, A.* (2009): Biodiversity in alpine ponds: an indicator of climate warming? Vortrag im Rahmen der Tagung der SGHL «Schnee, Eis und Wasser im Alpenraum – aktueller denn je!». Link: *http://chy.scnatweb.ch/d/Aktuell/Veranstaltungen/documents/Oertli.pdf.*

[21] *Troschel, J.* (1994): Anforderungen an Krebsgewässer. In: Mitteilungen zur Fischerei 52 47–52, BUWAL.

[22] *Davies, P.; Cook, B.; Rutherford, K.; Walshe, T.* (2004): Managing high in-stream temperatures using riparian vegetation. River and riparian land management technical guideline Number 5.

[23] *Gerster, S.* (2006): PKD – Die Proliferative Nierenkrankheit. Faltblatt, Fischereiberatung (FIBER) Eawag, Kastanienbaum.

[24] *BAFU* (2007): Wassertemperaturmessungen des Bundesamtes für Umwelt, Abteilung Hydrologie (Stand 2007). Interner Konzeptbericht, 14 S.

[25] *Baltisberger, M.* (2009): Systematische Botanik – Einheimische Farn- und Samenpflanzen. 3., korrigierte Auflage, vdf-Hochschulverlag, 328 S.

[26] *Pauli, H.; Gottfried, M.; Reiter, K.; Klettner, C.; Grabherr, G.* (2007): Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. Global Change Biology 13 147–156.

[27] *Rebetez, M.; Reinhard, M.* (2007): Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. Theoretical and Applied Climatology.

[28] *BUWAL, BWG, MeteoSchweiz* (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern-Ittigen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 174 S.

[29] *BUWAL* (1998): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer in der Schweiz. Modul-Stufen-Konzept. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 26 des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft.

Keywords

Wassertemperatur – Entwicklung – Klimawandel – Messnetz

Adressen der Autoren

Adrian Jakob, Dr. phil. nat.
Bundesamt für Umwelt BAFU
CH-3003 Bern
Tel. +41 (0)31 324 76 71
Fax +41 (0)31 324 76 81
adrian.jakob@bafu.admin.ch

Evi Binderheim, Dr. sc. techn.
Sponsolim Umweltconsulting
Dachslenbergstr. 51, CH-8180 Bülach

Miriam Schädler, dipl. natw.
Spitalackerstr. 7, CH-3013 Bern

Fabian Pfammatter, lic. phil. nat.
Raumplanung + Umwelt AG
Büro für nachhaltige Raumentwicklung und Umweltplanung
Sebastiansplatz 1
CH-3900 Brig-Glis

Verdankungen

Die vorliegende Publikation wäre ohne die zuverlässige und sorgfältige langjährige Arbeit im Feld und in der Datenbearbeitung nicht möglich. Die Autoren danken deshalb den zahlreichen beteiligten Mitarbeitenden der Abteilung Hydrologie des Bundesamts für Umwelt sowie den lokalen Betreuern der Stationen.

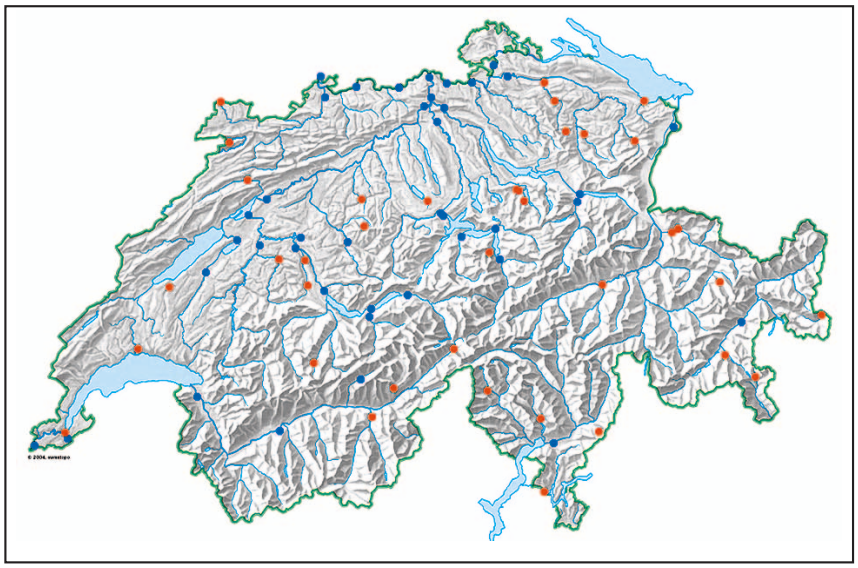

Abb. 1 Überblick über die Lage der Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes (Stand 2008): Blaue Punkte markieren diejenigen Stationen, die vor 2000 in Betrieb genommen wurden, orange Punkte markieren diejenigen Stationen, die nach 2000 in Betrieb genommen wurden.

Temperaturverhältnisse eines Fliessgewässers durch *anthropogene Einflüsse* wie z.B. durch hydroelektrische Speicherkraftwerke oder Kühl- und Abwassereinleitungen verändert [2, 3].

Die *Gewässerschutzverordnung* (GSchV) legt die Anforderungen für die Temperaturverhältnisse in Oberflächengewässern fest. Demnach muss die Wasserqualität so beschaffen sein, dass die Temperaturverhältnisse naturnah sind. Zudem dürfen durch Wasserentnahmen, Wassereinleitungen und bauliche Eingriffe die Temperaturverhältnisse des Gewässers nicht derart verändert werden, dass die für das Gewässer typischen Lebensgemeinschaften nicht mehr gedeihen können. Gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand darf die Temperatur eines Fliessgewässers durch Wärmeeintrag oder -entzug um höchstens 3 °C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1,5 °C verändert werden, wobei die Wassertemperatur grundsätzlich 25 °C nicht übersteigen darf.

Im Rahmen der *nationalen Umweltbeobachtung* betreibt die Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) nebst anderen ein *Messnetz* zur Überwachung der Wassertemperaturen an ausgewählten Fliessgewässern *(Abb. 1)*. Die Messergebnisse werden regelmässig im *Hydrologischen Jahrbuch* der Schweiz [4] publiziert und im Internet dargestellt (*www.bafu.admin.ch/hydrologie*); sie können auch direkt beim BAFU bezogen werden.

Im Folgenden wird das Anfang der 2000er-Jahre erweiterte Temperaturmessnetz des Bundes vorgestellt und unter dem Aspekt der Repräsentativität anhand einer Klassifizierung der Stationen diskutiert. Im Weiteren werden die erhobenen Daten zusammengefasst dargestellt, langfristige Änderungen der Wassertemperaturen werden aufgezeigt und im Hinblick auf mögliche Auswirkungen auf die aquatische Fauna diskutiert.

Weitere Publikationen zum Temperaturmessnetz des Bundes finden sich in [5, 6, 7, 8, 9, 10].

2. Einflussfaktoren

Das mittlere Jahrestemperaturregime an einer bestimmten Stelle im Fliessgewässer weist einen sinusähnlichen Verlauf auf, der um einige Wochen verzögert der Kurve der mittleren Lufttemperatur am betreffenden Ort folgt, wobei der Temperaturanstieg meist langsamer als der Temperaturabfall ist. Dieser mehr oder weniger ausgeprägte Jahresgang des Temperaturverlaufes ist in erster Linie das Resultat von klimatischen Faktoren, wie Sonneneinstrahlung, Abstrahlung, Niederschlag, Verdunstung, Kondensation, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Wärmeaustausch mit dem Untergrund und der Luft [1]. Kurzfristige und langfristige Abweichungen sowie Abschwächungen und Verstärkungen von diesem sinusähnlichen Verlauf werden von den folgenden *natürlichen* und *anthropogenen Einflüssen* bewirkt:

Meteorologische Verhältnisse

Eine Schlechtwetterlage bewirkt im Sommer eine Abkühlung, da einerseits die Sonneneinstrahlung und damit die Erwärmung des Wassers reduziert werden und andererseits mit dem Niederschlag kälteres Wasser in das Fliessgewässer gelangt. Im Winter hingegen bewirkt eine Schlechtwetterlage eine Erwärmung des Wassers, da einerseits die Wärmeabstrahlung bzw. die Abkühlung des Wassers vermindert wird und andererseits das Niederschlagswasser bei Regen im Winter meist höhere Temperaturen als das Flusswasser aufweist, weil die Temperaturamplituden im Boden geringer sind. Meteorologische Einflüsse wirken kurzfristig und können grosse jährliche Unterschiede in den Temperaturganglinien bewirken.

Ökomorphologie

Ein grosses Gefälle und eine grosse Bettrauhigkeit bewirken aufgrund der grösseren Reibung eine Temperaturzunahme in einem Fliessgewässer [11]. Vor allem bei alpinen Fliessgewässern im Winter bei niedrigem Abfluss kann dies zu tendenziell höheren Wintertemperaturen führen als aufgrund der klimatischen Bedingungen zu erwarten wären. Die Vegetation entlang eines Fliessgewässers kann durch Beschattung vor allem im Sommer Abweichungen gegenüber unbeschatteten Gewässern um mehrere Grad Celsius bewirken [12].

Grundwassereinfluss

Grundwasserexfiltrationen bewirken eine Glättung der Jahresganglinie des entsprechenden Fliessgewässers. Sie haben geringere Temperaturamplituden zur Folge, als dies bei vergleichbaren Fliessgewässern ohne relevante Grundwasserexfiltration der Fall ist. Dies, weil das Grundwasser über das ganze Jahr hinweg eine relativ konstante Temperatur aufweist, welche in der Regel der Jahresmitteltemperatur der Luft am betreffenden Ort entspricht [13]. Zudem wirkt sich ein starker Grundwassereinfluss dämpfend auf kurzfristige, wetterbedingte Temperaturschwankungen aus, was insbesondere im Winter bei niedrigem Abfluss ersichtlich ist.

Schnee- und Gletscherschmelze

Ein hoher Anteil an Schnee- und Gletscherschmelzwasser am Gesamtabfluss eines Fliessgewässers führt vor allem im Sommer zu tieferen Wassertemperaturen, bewirkt eine Verringerung der Jahrestemperaturamplitude und reduziert die Ausgangstemperatur eines Fliessgewässers [14].

Seen

Seen haben die Funktion eines Wärmespeichers. Sie erwärmen sich im oberflächennahen Bereich im Sommer aufgrund ihrer grossen Oberfläche und dem stehenden Wasser viel stärker als Fliessgewässer. Im Herbst und Winter hingegen kühlen sich Seen aufgrund ihres grösseren Volumens und der hohen Wärmespeicherkapazität viel weniger schnell ab. Seeausflüsse zeigen deshalb im Sommer und im Winter generell höhere Temperaturen als Seezuflüsse. Der Jahresmittelwert der Messstation beim Zufluss kann bis zu 5 °C tiefer sein als jener beim Seeausfluss [15].

Hydroelektrische Speicherkraftwerke

Diese wirken sich unterschiedlich auf das Temperaturregime eines Fliessgewässers aus. Auf Restwasserstrecken bewirkt die hydroelektrische Nutzung infolge des geringeren Abflusses im Winter eine Abnahme und im Sommer eine Zunahme der Wassertemperatur. Auf Gewässerabschnitten, die unterhalb der Wasserrückgabestelle liegen, wird die Wassertemperatur durch das aus dem Stausee turbinierte Wasser im Winter aufgewärmt und im Sommer abgekühlt [2]. In der Rhone beispielsweise wird die Temperatur im Winter durch den Kraftwerkseinfluss um etwa 2 °C erhöht und im Sommer um rund 1 °C reduziert [2].

Kühlwassereinleitungen

Kühlwassereinleitungen aus thermischen Kraftwerken bewirken grundsätzlich eine Erwärmung des Wassers. Im Winter ist sie stärker als im Sommer. Die Temperatur der Aare wird beispielsweise durch die Kühlwassereinleitung des Kraftwerks Mühleberg durchschnittlich um 1,3 °C erhöht, im Winter sogar um bis zu 3,4 °C [2].

Abwassereinleitungen

Abwassereinleitungen bei Regenwetter aus Misch- und Trennsystemen können speziell in kleinen Gewässern zu einem temporären Temperaturanstieg führen, da das Wasser von versiegelten Flächen in den meisten Fällen um einige Grade wärmer ist als das Fliessgewässer [16].

Klimaänderung

Änderungen von klimatischen Faktoren wirken sich direkt auf die Wassertemperaturen aus. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass Änderungen des *Nordatlantischen Oszillation Indexes* (NAO) einen grossen Einfluss sowohl auf die Wassertemperaturen von Seen in ganz Zentraleuropa [17] als auch auf die Temperaturen der Fliessgewässer in der Schweiz haben [18].

3. Ökologische Bedeutung

Die Temperatur beeinflusst die physikalischen und chemischen Prozesse sowie die biologischen und biochemischen Vorgänge im Wasser und wirkt sich somit indirekt und direkt auf die *aquatischen Organismen* aus.

Die Löslichkeit von Gasen nimmt mit steigenden Temperaturen ab. So enthält wärmeres Wasser weniger gelösten Sauerstoff, welcher für aquatisches Leben essentiell ist. Die Stoffwechselvorgänge werden mit steigenden Temperaturen beschleunigt und der Sauerstoffbedarf nimmt zu, was bei gleichzeitig verringertem Sauerstoffangebot für viele Organismen zu Stress führen kann. Die Temperatur bestimmt auch Dauer, Verlauf und Geschwindigkeit des Wachstums. Bei *Fischen* beispielsweise können Temperaturveränderungen zu Verschiebungen der Laichzeiten führen [19]. Bei *Makroinvertebraten* beeinflussen Temperaturveränderungen die Generationsdauer und bewirken damit eine Verschiebung des Zeitpunktes der Emergenz, was den gesamten Lebenszyklus verändern kann [20].

Die Lebensfähigkeit und -aktivität aquatischer Organismen hängt zudem von optimalen Temperaturbereichen und Temperaturextremwerten ab. Die optimalen und letalen Temperaturbereiche sind je nach Organismen unterschiedlich. So können beispielsweise bei Forellen, Felchen oder Äschen ab ca. 18 °C Stresssymptome auftreten und Temperaturen über 25 °C bereits tödlich sein. Karpfen, Barsche und Hechte hingegen ertragen hohe Temperaturen besser [19]. Der Edelkrebs bevorzugt die wärmeren Gewässer mit Temperaturen bis maximal 24 °C im Gegensatz zum Steinkrebs, der eher kühlere Gewässer mit Temperaturen bis maximal 20 °C favorisiert [21]. Bei den Wirbellosen bevorzugen Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven grundsätzlich niedrigere Temperaturen als z.B. Köcherfliegenlarven und Libellenlarven [22].

Stark temperaturabhängig ist auch der Ausbruch von *Krankheiten* bei Fischen wie beispielsweise der *proliferativen Nierenkrankheit* (PKD). Bachforellen können bei Temperaturen unter etwa 15 °C zwar eine pathologische Reaktion des Nierengewebes entwickeln, sterben aber

nicht daran. Ein Ausbruch der Krankheit mit hoher Mortalitätsrate erfolgt hingegen dann, wenn Erreger vorhanden sind und gleichzeitig die Wassertemperaturen während zweier Wochen oder länger einen Tagesmittelwert von 15 °C überschreiten [23].
Viele Organismen haben je nach Lebensstadien unterschiedliche Temperaturpräferenzen. Das Vorkommen mancher Arten ist somit aufgrund der Vorlieben und Toleranzen auf bestimmte Flussabschnitte beschränkt. Die Wassertemperatur legt damit Habitatsgrenzen in unseren Fliessgewässern fest. Langfristige Veränderungen der Wassertemperaturen beeinflussen deshalb das Vorkommen und die Zusammensetzung der aquatischen Organismen in Fliessgewässern und können das Aufkommen von Neozoen und Neophyten fördern.

4. Temperaturmessnetz

4.1 Ziel und Konzept

Das Ziel des nationalen Temperaturmessnetzes besteht darin, Grundlagen für die Erfolgskontrolle der schweizerischen Umweltschutzgesetzgebung zu liefern sowie Ursachen- und Wirkungsanalysen zu ermöglichen [24]. Um dieses Ziel zu erreichen ist es wichtig, dass die Stationen einen gesamtschweizerischen Überblick gewährleisten und die Vielfalt der Schweizer Fliessgewässer repräsentieren.
Damit die im Rahmen des Temperaturmessnetzes untersuchten Fliessgewässer zusammenfassend charakterisiert werden können und das Messnetz im Hinblick auf seine Repräsentativität besser beurteilt werden kann, müssen die einzelnen Messstationen aufgrund ihres Jahres-Temperaturregimes klassifiziert werden.

4.2 Datenerhebung

Das nationale Temperaturmessnetz wurde 1963 in Betrieb genommen und seither laufend erweitert. Es umfasst zurzeit 78 Stationen *(Tab. 1, Abb. 1)*. Die grösste Erweiterung im Messnetz von 40 auf 75 Messstationen erfolgte im Rahmen der Neuformulierung der Zielsetzungen des Temperaturmessnetzes in den Jahren 2000–2002.
Die Temperaturmessungen werden mit Temperatursonden kontinuierlich in 10-Minuten-Intervallen erhoben. Historische Temperaturdaten wurden teilweise mittels täglichen Stichproben erhoben. Die Daten bilden die Grundlage für die Berechnungen von Tages-, Monats-, Jahresmittelwerten und Mittelwerten über beliebige Zeitperioden. Der Beginn der Messperiode mit kontinuierlichen und als Stichproben durchgeführten Temperaturmessungen ist in der *Tabelle 1* ersichtlich. Die

Gewässer	Station	Beginn	Höhe Station (m ü. M.)	Fläche EG (km²)	mittlere Höhe EG (m ü. M.)	Verglet-scherung (%)	Fluss-gebiet
Aare	Bern, Schönau	1970	502.00	2969.00	1610.00	8.00	Aare
Aare	Brienzwiler	1964/69	570.00	554.00	2150.00	21.00	Aare
Aare	Brugg	1963/70	332.00	11750.00	1010.00	2.00	Aare
Aare	Brügg, Aegerten	1963/70	428.00	8317.00	1150.00	2.90	Aare
Aare	Felsenau, KW Klingnau	1960/70	312.00	17779.00			Aare
Aare	Hagneck	1971	437.00	5128.00	1380.00	4.50	Aare
Aare	Ringgenberg, Goldswil	1964/80	564.00	1129.00	1970.00	16.20	Aare
Aare	Thun	1971	548.00	2490.00	1760.00	9.50	Aare
Aare	Untersiggenthal, Stilli	1963/69	326.00	17625.00	1050.00	2.10	Aare
Allaine	Boncourt, Frontière	2002	366.00	215.00	559.00		Rhône
Allenbach	Adelboden	2002	1297.00	28.80	1856.00		Aare
Alp	Einsiedeln	2003	840.00	46.40	1155.00		Limmat
Arve	Genève, Bout du Monde	1969	380.00	1976.00	1370.00	6.10	Rhône
Biber	Biberbrugg	2003	825.00	31.90	1009.00		Limmat
Birs	Münchenstein, Hofmatt	1972	268.00	911.00	740.00		Rhein
Broye	Payerne, Caserne d`aviation	1976	441.00	392.00	710.00		Aare
Canal de la Broye	Sugiez	1999	429.00	697.00	630.00		Aare
Dischmabach	Davos, Kriegsmatte	2004	1668.00	43.30	2372.00	2.10	Rhein
Doubs	Ocourt	2002	417.00	1230.00	950.00		Rhône
Emme	Emmenmatt	1976	638.00	443.00	1070.00		Aare
Engelberger Aa	Buochs, Flugplatz	1983	443.00	227.00	1620.00	4.30	Reuss
Glatt	Rheinsfelden	1976	336.00	416.00	498.00		Rhein
Goldach	Goldach, Bleiche	2004	399.00	49.80	833.00		Rhein
Grossbach	Gross, Säge	2003	940.00	9.06	1276.00		Limmat
Grosstalbach	Isenthal	2004	767.00	43.90	1820.00	9.30	Reuss
Gürbe	Belp, Mülimatt	2007	522.00	117.00	837.00		Aare
Inn	S-chanf	1981	1645.00	615.00	2470.00	15.60	Inn
Kleine Emme	Littau, Reussbühl	1973/78	431.00	477.00	1050.00		Reuss
Landquart	Felsenbach	2003	571.00	616.00	1800.00	1.40	Rhein
Langeten	Huttwil, Häberenbad	2002	597.00	59.90	766.00		Aare
Limmat	Baden, Limmatpromenade	1969/70	351.00	2396.00	1130.00	1.10	Limmat
Linth	Mollis, Linthbrücke	1964/71	436.00	600.00	1730.00	4.40	Limmat
Linth	Weesen, Biäsche	1964/70	419.00	1061.00	1580.00	2.50	Limmat
Lonza	Blatten	1967/86	1520.00	77.80	2630.00	36.50	Rhône
Lütschine	Gsteig	1964/86	585.00	379.00	2050.00	17.40	Aare
Massa	Blatten bei Naters	2003	1446.00	195.00	2945.00	65.90	Rhône
Mentue	Yvonand, La Maugettaz	2002	449.00	105.00	679.00		Aare
Muota	Ingenbohl	1974	438.00	316.00	1360.00	0.08	Reuss
Murg	Frauenfeld	2007	390.00	212.00			Rhein
Murg	Wängi	2002	466.00	78.90	650.00		Rhein

Messgenauigkeit im Temperaturmessnetz des BAFU wird durch regelmässige *Vergleichsmessungen* mit geeichten Thermometern gewährleistet. Die Genauigkeit der Systeme beträgt ±0,15 ºC ±0,02 ºC/ºC.

4.3 Klassifizierung der Messstationen

Die Klassifizierung erfolgte mit Hilfe einer *Clusteranalyse*, welche Ähnlichkeiten zwischen den Stationen in Bezug auf ihr Jahres-Temperaturregime aufzeigte und eine grobe Einteilung in verschiedene Cluster erlaubte. Bei der Bildung der Cluster wurden die Daten aus mehreren Jahren (1999–2007) ausgewertet, um jährliche Schwankungen im Temperaturregime aufgrund von einzelnen Wetterereignissen ausgleichen zu können.

Basierend auf den Ergebnissen der Clusteranalyse wurde die Gruppeneinteilung verfeinert. Gebietsparameter und zusätzliche Kenntnisse über Faktoren im Einzugsgebiet der betrachteten Fliessgewässer, welche das Temperaturregime beeinflussen, wurden für die Differenzierung berücksichtigt.

Die Klassifizierung der Messstationen wird einerseits anhand der mittleren Höhe des Einzugsgebietes – wichtigster Temperatur beeinflussender Gebietsparameter – und andererseits anhand von drei das Temperaturregime beeinflussenden Faktoren – Seeeinfluss, Grundwasserexfiltration und hydrologische Speicherkraftwerke – dargestellt *(Tab. 2)*. Letztere wurden in dieser Arbeit als bedeutendste Einflüsse erachtet. Die Einteilung der Gebietshöhe nach geobotanischen Kriterien in die vier Höhenstufen *alpin, subalpin, montan* und *kollin* ergab die beste Differenzierung, weil hierbei die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse der Süd-, Nord- und Zentralalpen sowie des Juras berücksichtigt werden. Es gilt zu beachten, dass sich die Höhenstufen je nach Region auf unterschiedliche Meereshöhen beziehen *(Tab. 3)* [25]. Der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet wurde in dieser Klassifizierung nicht als Haupteinflussfaktor definiert, da er ebenfalls von der Höhe des Einzugsgebiets abhängig ist.

Die *Erkenntnisse* der Klassifizierung können folgendermassen zusammengefasst werden *(Abb. 2)*:

– Je alpiner die mittlere Einzugsgebietshöhe einer Station, desto niedriger sind sowohl die Winter- als auch die Sommertemperaturen und desto geringer sind die Jahresamplituden des Temperaturregimes. Je höher der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet, desto mehr wird dieser Effekt verstärkt. Typische Temperaturbereiche von naturnahen Fliessgewässern der entsprechenden

Gewässer	Station	Beginn	Höhe Station (m ü. M.)	Fläche EG (km^2)	mittlere Höhe EG (m ü. M.)	Vergletscherung (%)	Flussgebiet
Necker	Mogelsberg, Aachsäge	2007	606.00	88.20	959.00	0.00	Rhein
Poschiavino	La Rösa	2004	1860.00	14.10	2283.00	0.35	Adda
Reuss	Luzern, Geissmattbrücke	1973	432.00	2251.00	1500.00	4.20	Reuss
Reuss	Mellingen	1969/70	345.00	3382.00	1240.00	2.80	Reuss
Reuss	Seedorf	1971	438.00	832.00	2010.00	9.50	Reuss
Rhein	(Oberwasser) Laufenburg	1970/71	299.00	34074.00			Rhein
Rhein	(Oberwasser) Rheinau	1971/72	353.00				Rhein
Rhein	Basel, Klingenthalfähre	2003	245.00				Rhein
Rhein	Diepoldsau, Rietbrücke	1963/84	410.00	6119.00	1800.00	1.40	Rhein
Rhein	Rekingen	1969/70	323.00	14718.00	1080.00	0.57	Rhein
Rhein	Rheinfelden, Messstation	1971	262.00	34550.00	1039.00	1.30	Rhein
Rhein	Weil, Palmrainbrücke	1954/77	244.00				Rhein
Rhône	Chancy, Aux Ripes	1971/72	336.00	10299.00	1580.00	8.40	Rhône
Rhône	Genève, Halle d'ile	2003	367.00	7987.00	1670.00	9.40	Rhône
Rhône	Oberwald	2003	1368.00	95.00	2467.00	25.60	Rhône
Rhône	Porte du Scex	1968/71	377.00	5220.00	2130.00	14.30	Rhône
Rhône	Sion	1974	484.00	3349.00	2310.00	18.40	Rhône
Riale di Calneggia	Cavergno, Pontit	2002	890.00	24.00	1996.00	0.00	Ticino
Riale di Pincascia	Lavertezzo	2004	536.00	44.40	1708.00	0.00	Ticino
Riale di Roggoiasca	Roveredo	2003	980.00	8.06	1711.00	0.00	Ticino
Rietholzbach	Mosnang, Rietholz	2002	682.00	3.31	795.00	0.00	Rhein
Rom	Müstair	2003	1236.00	129.70	2187.00	0.12	Etsch
Rosegbach	Pontresina	2004	1766.00	66.50	2716.00	30.10	Inn
Saane	Gümmenen	1981	473.00	1880.00	1131.00	0.20	Aare
Sellenbodenbach	Neuenkirch	2003	515.00	10.50	615.00	0.00	Aare
Sense	Thörishaus, Sensematt	2003	553.00	352.00	1068.00	0.00	Aare
Sitter	Appenzell	2006	769.00	74.20	1252.00	0.00	Rhein
Sperbelgraben	Wasen, Kurzeneialp	2002	911.00	0.54	1063.00	0.00	Aare
Suze	Sonceboz	2004	642.00	150.00	1050.00	0.00	Aare
Taschinasbach	Grüsch, W.F. Lietha	2003	666.00	63.00	1768.00	0.04	Rhein
Thur	Andelfingen	1963/69	356.00	1696.00	770.00	0.00	Rhein
Ticino	Riazzino	1978	200.00	1611.00	1640.00	0.65	Ticino
Tresa	Ponte Tresa, Rocchetta	2003	268.00	615.00	800.00	0.00	Ticino
Venoge	Ecublens, Les Bois	2002	383.00	231.00	700.00	0.00	Rhône
Vispa	Visp	2003	659.00	778.00	2660.00	29.50	Rhône
Vorderrhein	Illanz	2002	693.00	776.00	2020.00	3.80	Rhein
Worble	Ittigen	1989	522.00	60.50	679.00	0.00	Aare

Tab. 1 Messstellen des nationalen Wassertemperaturmessnetzes des BAFU mit den wichtigsten Kenngrössen zu ihrem Einzugsgebiet (Stand 2007). Bei einigen Stationen sind zwei unterschiedliche Jahre für den Beginn der Messperiode angegeben. Dabei bezieht sich das frühere Jahr auf Beginn der Temperaturmessungen mittels Stichproben, das spätere Jahr auf den Messbeginn mit kontinuierlich erhobenen Daten.

Gebietshöhen sind in der *Tabelle 4* dargestellt.

– Gegenüber den unbeeinflussten Stationen in allen Höhenlagen zeigen sich der Seeeinfluss in höheren Sommer- und Wintertemperaturen, der Grundwassereinfluss in einer ausgeglicheneren Temperaturamplitude und der Einfluss von hydroelektrischen Speicherkraftwerken in höheren Wintertemperaturen und niedrigeren Sommertemperaturen *(Abb. 2a, b, c)*.

Fast alle ausgewerteten Stationen des nationalen Temperaturmessnetzes konnten eindeutig anhand ihres Temperaturregimes und anhand der Kenntnisse über die Temperatur beeinflussenden Faktoren in *15 Gruppen* eingeteilt werden *(Tab. 2)*. Bei der Glatt-Rheinsfelden war die Einteilung erschwert, weil kein eindeutiger Haupteinfluss zu erkennen ist, bzw. weil sich zwei Haupteinflüsse (Grundwasserexfiltration und Seeeinfluss) überlagern. Der Grundwassereinfluss wurde aufgrund des Temperaturregimes als bedeutender gewichtet. Bei der Lütschine-Gsteig können die relativ hohen Wintertemperaturen nicht erklärt werden. Diese Station wird jedoch als unbeeinflusst klassifiziert, da keine Kenntnisse von Einflussfaktoren ersichtlich sind.

	Höhenstufen			
Haupteinflüsse	**alpin**	**subalpin**	**montan**	**kollin**
Seeausfluss	Aare, Ringgenberg[4] (+0,5°C) ↑	Aare, Thun (+0,8°C) ↑ Aare, Bern (+0,9°C) ↑ Linth, Weesen (+1,0°C) ↑↑↑	Aare, Brugg (+0,9°C) ↓↑↑↑ Aare, Brügg, Aegerten (+1,0°C) ↓↑↑↑ Aare, Felsenau (+0,9°C) ↓↑↑↑ Aare, Hagneck (+0,9°C) ↑↑ Aare, Untersiggenthal (+0,9°C) Limmat, Baden (+1,0°C) ↓↑↑ Reuss, Luzern (+1,2°C) ↓↑↑↑ Reuss, Mellingen (+0,9°C) ↓↑↑↑ Rhein, Laufenburg (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rekingen (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rheinau (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Rheinfelden (+1,0°C) ↓↑↑↑ Rhein, Weil[2] (+1,1°C) ↓↑↑ Rhone, Chancy (+0,8°C) ↑↑↑ *Rhone, Genève*	*Canal de la Broye, Sugiez* *Tresa, Ponte Tresa*
Grundwasser	*Rom, Müstair*	*Grosstalbach, Isental* *R. di Calneggia, Cavergno*	*Suze, Sonceboz*	*Allaine, Boncourt* Birs, Münchenstein (+0,6°C) ↑↑↑ *Doubs, Ocourt* Glatt, Rheinsfelden[1] (+0,6°C) ↓↑↑↑ *Langeten, Huttwil* *Murg, Frauenfeld* *Murg, Wängi* *Rietholzbach, Mosnang* *Venoge, Ecublens* Worble, Ittigen[8] ↑↑
Speicher-kraftwerk	Aare, Brienzwiler (+0,2°C) Rhone, Porte du Scex (+0,4°C) Rhone, Sion (+0,2°C) *Vispa, Visp*	Engelberger Aa, Buochs[6] (+0,2°C) *Landquart, Felsenbach* Linth, Mollis (+0,4°C) Reuss, Seedorf (+0,4°C) Rhein, Diepoldsau (+0,5°C) ↑ *Vorderrhein, Illanz*	Arve, Genève (+0,4°C) Muota, Ingenbohl (+0,1°C) Saane, Gümmenen[5] (+0,7°C) ↑↑ *Sitter, Appenzell* Ticino, Riazzino[3] (+0,8°C) ↑↑	
unbeeinflusst bzw. keine ersichtlichen Haupteinflüsse	*Dischmabach, Davos* Inn, S-chanf[5] (+0,3°C) Lonza, Blatten[7] (–0,2°C) Lütschine, Gsteig[7] (+0,2°C) *Massa, Blatten bei Naters* *Poschiavino, La Rösa* *Rhone, Oberwald* *Rosegbach, Pontresina*	*Allenbach, Adelboden* *R. di Roggoisca, Roveredo* *Taschinasbach, Grüsch*	Alp, Einsiedeln Biber, Biberbrugg Emme, Emmenmatt 1 (+0,7°C) ↑↑ *Grossbach, Gross* *Necker, Mogelsberg* *R. di Pincascia, Lavertezzo* *Sense, Thörishaus* *Sperbelgraben, Wasen*	Broye, Payerne[1] (+1,0°C) ↑↑↑ *Goldach, Goldach* Kleine Emme, Littau[3] (+0,7°C) ↑ ↑ *Mentue, Yvonand* *Sellenbodenbach, Neuenkirch* Thur, Andelfingen (+0,8°C) ↑↑↑

Tab. 2 Klassifizierung der Messstellen des Wassertemperaturmessnetzes unter Berücksichtigung der mittleren Höhe des Einzugsgebietes gegenüber der Haupteinflüsse «See», «Grundwasserexfiltration», «Hydroelektrisches Speicherkraftwerk». Die neuen Stationen, die nach 2000 in Betrieb genommen wurden, sind kursiv gekennzeichnet. In Klammern ist die Differenz der mittleren Jahrestemperaturen der Periode 1988–2007 und 1974–1987 angegeben. Stationen mit weniger langen kontinuierlichen Zeitreihen sind mit Zahlen markiert ([1]: ab 1976; [2]: ab 1977; [3]: ab 1978; [4]: ab 1980; [5]: ab 1981; [6]: ab 1983; [7]: ab 1987; [8]: ab 1989).

↓↑ Ab- bzw. Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 15 und 18 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 18 und 21 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden zwischen 21 und 24 °C seit Beginn der Messperiode

↑ Zunahme der Anzahl Stunden > 24 °C seit Beginn der Messperiode

4.4 Repräsentativität

Aufgrund der Klassifizierung der Messstationen kann festgehalten werden, dass durch die Messnetzerweiterung seit 2000 die Repräsentativität deutlich erhöht wurde. Während die historischen Stationen hauptsächlich grosse, anthropogen beeinflusste Fliessgewässer des Mittellandes repräsentierten, werden aktuell auch kleine, nicht anthropogen beeinflusste Fliessgewässer in höheren Lagen erfasst *(Tab. 2)*. Die von einem See beeinflussten Stationen

	Wintertemperatur	Sommertemperatur
alpin	<2 °C	<10 °C
subalpin	<2 °C	10–15 °C
montan	<3 °C	13–20 °C
kollin	0,5–4 °C (sehr variabel)	16–22 °C

Tab. 4 Typische Temperaturbereiche von naturnahen Fliessgewässern ohne ersichtliche Beeinflussung mit Einzugsgebietshöhen der vier Höhenstufen.

	Obergrenze (m ü. M.)				Vegetation	Vegetation Obergrenze
	Nordalpen	Zentralalpen	Südalpen	Jura		
alpin	2400–2500	2700–3000	2400–2500		Zwergsträucher, Rasen	Vegetationsgrenze
subalpin	1800–2100 (2000)	2000–2500 (2300)	1800–2100 (2000)		Nadelwälder	Baumgrenze
montan	1100–1500 (1300)	1000–1800 (1500)	1700 (1700)	1300–1500 (1400)	Buchenwälder und Buchen-Nadelmischwälder/Nadelwälder (nur Zentralalpen)	Buche/Waldföhre (nur Zentralalpen
kollin	600–800 (700)	600–1000 (800)	800–1000 (900)	600–800 (700)	sommergrüne Laubwälder	Eichen

Tab. 3 Einteilung der Höhenstufen nach geobotanischen Kriterien. Es ist zu beachten, dass die Höhenstufen nicht durch eine klare Höhengrenze, sondern durch einen Grenzbereich getrennt sind. In Klammern sind die Höhen angegeben, welche für Einteilung der Temperaturmessstationen angenommen wurden. *(Quelle: [25])*

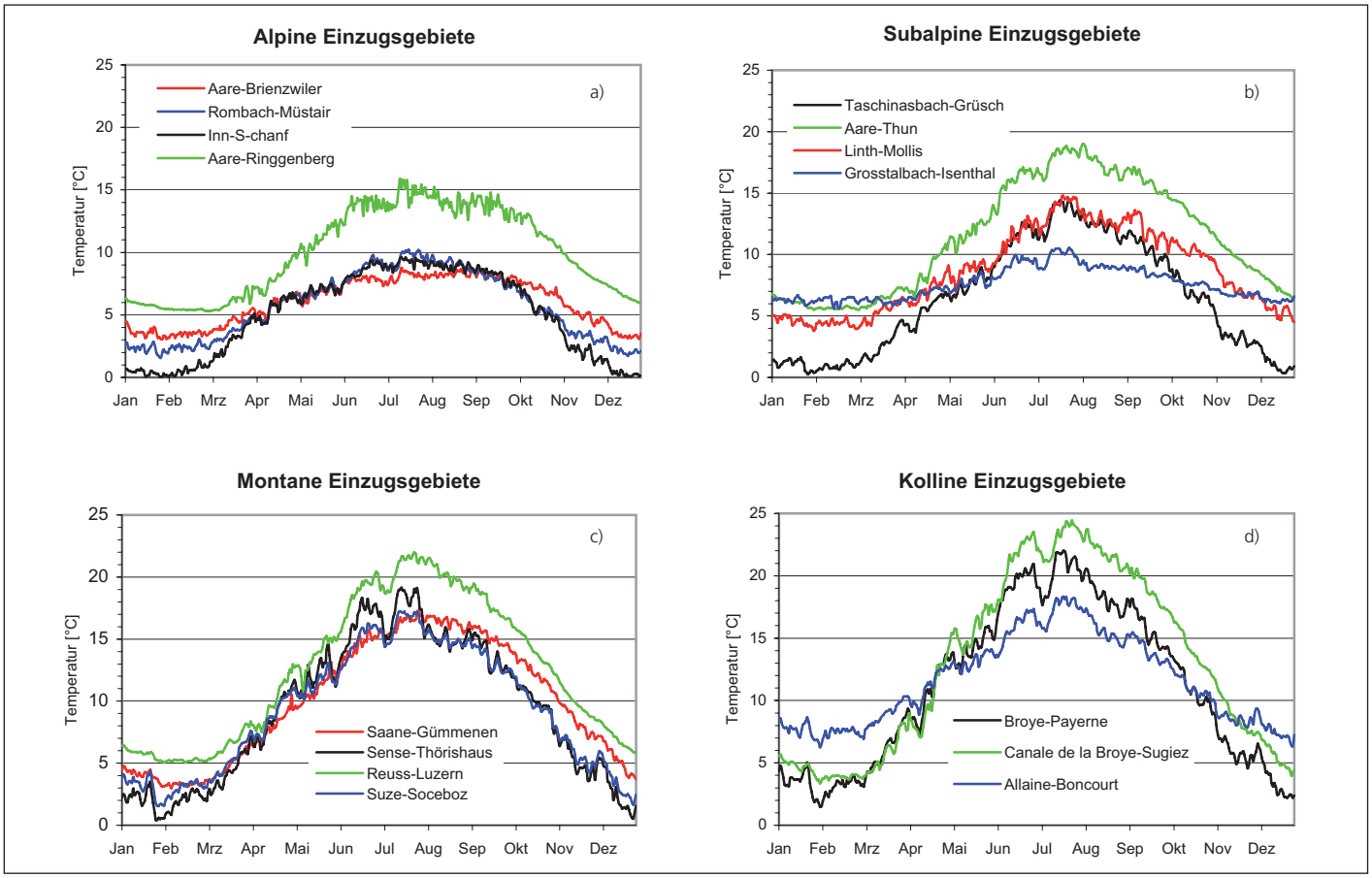

Abb. 2 Jahresganglinien der Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes. Je höher die mittlere Höhe des Einzugsgebietes ist, desto kälter sind die Winter- und Sommertemperaturen und desto kleiner sind die Temperaturamplituden. Ein Seeeinfluss *(grün)* erhöht tendenziell die Sommer- und Wintertemperaturen, ein Grundwassereinfluss *(blau)* hat eine ausgleichende Wirkung auf die Temperaturamplituden und hydroelektrische Speicherkraftwerke *(rot)* erhöhen die Wintertemperaturen und erniedrigen tendenziell die Sommertemperaturen. Die Jahresganglinie von unbeeinflussten Stationen ist *schwarz* dargestellt. Die Werte entsprechen den durchschnittlichen Tagesmittelwerten über die Jahre 2003–2007.

mit montaner Einzugsgebietshöhe sind jedoch immer noch sehr stark im Messnetz vertreten, während Stationen, welche sich in montaner bis alpiner Lage befinden und vom Grundwasser beeinflusst sind, eher schwach vertreten sind. Je nach Ausrichtung der zukünftigen Erhebungen der Wassertemperaturen und je nach Schwerpunktsetzung der Fragestellungen besteht in diesem Bereich noch ein Potenzial, das im Bedarfsfall und mit den entsprechenden Ressourcen noch weiter ausgeschöpft werden kann.

5. Wassertemperaturwandel

5.1 Jahresmitteltemperaturen

Die Zeitreihen der Wassertemperaturen zeigen seit Beginn der Messperiode eine Zunahme der Jahresmittelwerte bei der Mehrheit der Stationen um 0,1–1,2 °C, wobei ein markanter Anstieg zwischen 1987 und 1988 ersichtlich ist *(Abb. 3)* [9, 18]. Dieser Temperatursprung zwischen 1987 und 1988 kann auf eine Änderung des Nordatlantischen Oszillationsindexes zurückgeführt werden und ist also klimatisch bedingt [9, 17]. Aufgrund dieser Tatsache wurden für viele Darstellungen die beiden Perioden 1974–1987 und 1988–2007 einander gegenübergestellt. Bei 28 Stationen wurde eine Analyse der Tagesmittelwerte für die Perioden 1974–1987 und 1988–2007 durchgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass bei den Stationen Lütschine-Gsteig und Lonza-Blatten die Daten bis 1986 als Stichproben erhoben wurden. Aufgrund des Zeitpunktes der Stichprobenentnahme sind die historischen Daten der Lütschine mit den Tagesmittelwerten der aus den kontinuierlich erhobenen Daten nach 1987 vergleichbar. Hingegen wurden für den Vergleich der Jahresmittelwerte bei der Station Lonza-Blatten die Stichproben bis 1986 mit den Stundenmittelwerten der kontinuierlichen Daten zum Zeitpunkt der Stichprobe verwendet. Bei zehn Stationen fehlen Messungen einzelner Jahre vor 1987 *(Tab. 1 und 2)*. Die Auswirkungen auf die Periodenauswertung sind allerdings marginal.

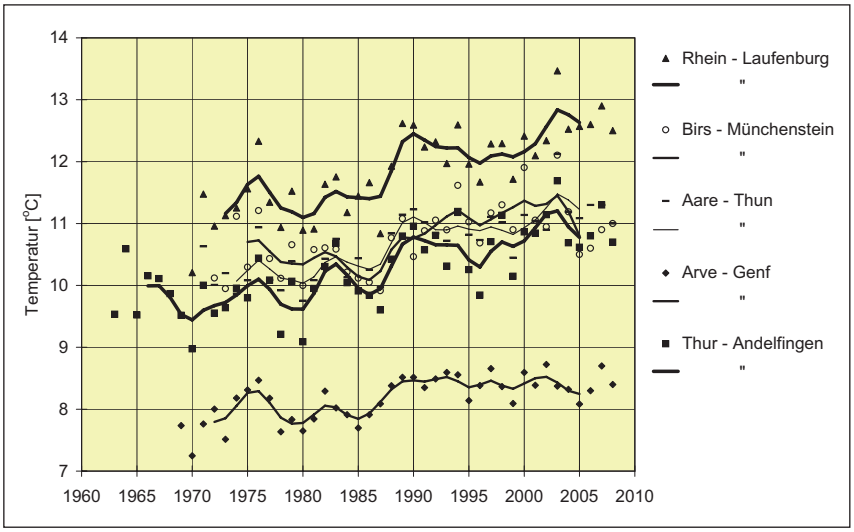

Abb. 3 Entwicklung der mittleren jährlichen Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen. Auffällig ist der Temperatursprung zwischen 1987 und 1988, der bei allen Stationen ersichtlich ist. Der Temperatursprung ist vor allem bei Messstationen wie z. B. Arve-Genf, die im Einflussbereich von Gletschern liegen, weniger deutlich.

Die festgestellten Temperaturveränderungen zwischen den beiden Perioden sind bei allen Stationen mit langjährigen Messreihen in der *Tabelle 2* aufgeführt. Die *Resultate* können folgendermassen zusammengefasst werden:

- Je höher die mittlere *Höhe* des Einzugsgebietes und je höher der Grad der *Vergletscherung* im Einzugsgebiet ist, desto weniger deutlich ist die Temperaturzunahme bzw. ist sogar eine Temperaturabnahme zu verzeichnen (z. B. Lonza-Blatten).
- Bei den Stationen mit *Seeeinfluss* ist die Temperaturzunahme deutlicher als bei Stationen in vergleichbarer Höhenstufe ohne Seeeinfluss. Die Stationen mit mittlerer Einzugsgebietshöhe der montanen Stufe zeigen mit 0,8–1,2 °C die stärkste Erwärmung. Vergleichbare Daten der kollinen Höhenstufe fehlen jedoch.
- Bei den durch *hydroelektrische Nutzung* beeinflussten Stationen mit subalpiner und montaner Einzugsgebietshöhe variiert die Grössenordnung der Temperaturzunahme stark und liegt im Bereich von 0,1–0,8 °C.
- In der *kollinen Stufe* zeigen die Stationen mit Grundwassereinfluss (Glatt-Rheinsfelden, Birs-Münchenstein) eine weniger ausgeprägte Temperaturzunahme als die unbeeinflussten Stationen.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Seen im Einzugsgebiet eine klimatisch bedingte Temperaturzunahme verstärken. Demgegenüber wirkt sich ein Grundwassereinfluss dämpfend auf eine Temperaturerhöhung aus. Ein hoher Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet kompensiert aufgrund der Gletscherschmelze im Sommer eine klimatisch bedingte Temperaturerhöhung teilweise, weshalb die Temperaturzunahme bei den alpinen Stationen weniger ausgeprägt ist als bei tiefer gelegenen Stationen. Inwiefern die hydroelektrische Nutzung einen dämpfenden Einfluss auf eine mögliche klimatisch bedingte Erwärmung der Fliessgewässer hat, kann aufgrund der fehlenden Datenlage nicht beantwortet werden, da langjährige konsistente Messreihen von unbeeinflussten alpinen Stationen fehlen. Hinweise auf eine mögliche Dämpfung könnten die relativ geringen Temperaturzunahmen (0,1–0,4 °C) bei Stationen, welche durch hydroelektrische Nutzung beeinflusst sind, sich in tieferen Lagen befinden und eine geringe Vergletscherung des Einzugsgebietes aufweisen, sein.

Die Temperaturentwicklung zeigt, dass sich Flora und Fauna der Gewässer langfristig an

wärmere Bedingungen anpassen müssen. Arten, die in Mittel- oder Unterläufen beheimatet sind, werden sich flussaufwärts in Regionen verschieben, die ihnen früher noch zu kühl waren. So hat sich beispielsweise die Forellenregion bereits um 100–200 m [18] in höhere Lagen verschoben. Das Vorkommen der Alpen-Mosaikjungfer – eine in Stillgewässern vorkommende Art – hat sich um 200–500 m in höhere Lagen verschoben [20]. Zudem hat sich die Biodiversität von Pflanzen im Alpenraum oberhalb von 2900 m ü.M. signifikant erhöht [26].

5.2 Saisonale Veränderungen

In der aktuelleren Periode 1988–2005 ist im Vergleich zur Periode 1974–1987 bei praktisch allen Stationen im Frühling ein rascherer Temperaturanstieg zu beobachten als dies in früheren Jahren der Fall war *(Abb. 4)*. Eine Ausnahme bildet die Muota bei Ingenbohl *(Abb. 4d)*, bei welcher sich verschiedene Einflüsse überlagern. Die Muota liegt in einem Karstgebiet und ist zudem aufgrund der hydroelektrischen Nutzung stark durch Schwallbetrieb beeinflusst und weist deshalb extrem hohe Abflussschwankungen im Bereich < 20 % bis 80 % des mittleren normalen Jahresabflusses auf. Bei den alpinen und subalpinen Stationen liegt die Temperaturerhöhung im Frühling im Bereich von ca. 1 °C im März *(Abb. 4a, b)*, bei den montanen und kollinen Stationen bei bis zu 3 °C im Mai *(Abb. 4h)*. Auch lassen sich bei allen nicht alpinen Stationen eine Erhöhung der Sommertemperaturen und eine Verlängerung der sommerlichen Wärmeperiode feststellen. Auch diese Entwicklung entspricht den Beobachtungen der Lufttemperaturen in diesem Zeitraum [27] und ist ebenfalls ein Hinweis darauf, dass diese Temperaturveränderungen klimatisch bedingt sind. Bei den von Seen beeinflussten Stationen sind die Temperaturerhöhungen am grössten, wobei die mittlere Temperaturzunahme im Winter ca. 1 °C und im Sommer ca. 1,5–3 °C beträgt, was auf die hohe Wärmespeicherkapazität von Seen zurückzuführen ist *(Abb. 4f)*. Der Grundwassereinfluss wirkt sich dämpfend auf die sommerliche Temperaturzunahme aus, weil dann die Temperaturdifferenz zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser am grössten ist. Dies ist am Beispiel der Glatt-Rheinsfelden ersichtlich, wo die sommerliche Temperaturerhöhung niedriger ist als diejenige im Frühling *(Abb. 4g)*. Bei den alpinen und durch Gletscher beeinflussten Stationen wie z.B. bei der Lütschine-Gsteig und Rhone-Sion, ist die Temperaturerhöhung im Sommer weniger ausgeprägt oder sogar negativ, weil der Temperaturanstieg im Sommer durch vermehrtes Gletscherschmelzwasser teilweise kompensiert bzw. überkompensiert wird *(Abb. 4a, b)*. Dagegen sind die Herbsttemperaturen im Vergleich zu früheren Jahren bei den alpinen Stationen deutlich höher. Möglicherweise wirken sich bei den alpinen Stationen klimabedingte Temperaturerhöhungen aufgrund der geringen Wasserführung im Herbst am stärksten aus.

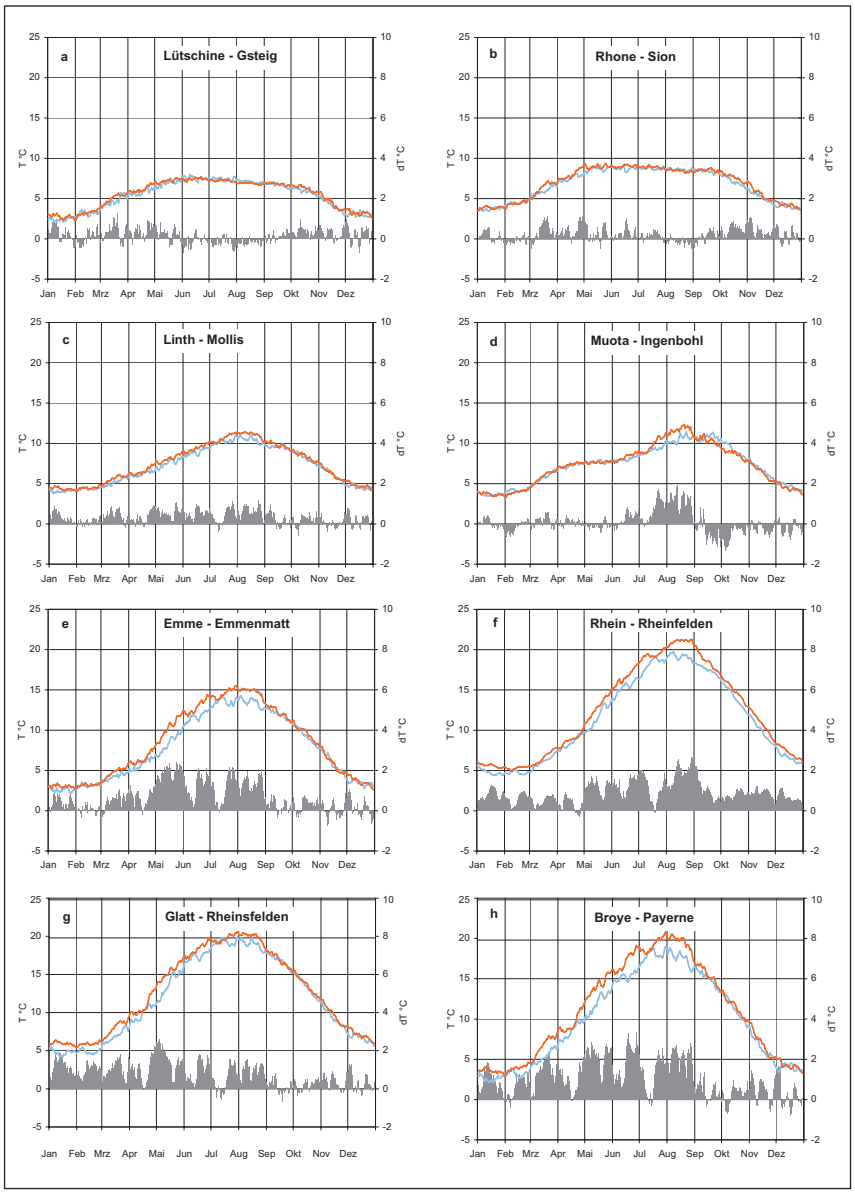

Abb. 4 Saisonaler Verlauf der Wassertemperaturen an beispielhaften Messstationen des nationalen Temperaturmessnetzes. Die blaue Linie bezieht sich auf die Messperiode 1974–1987 (Lütschine, Rhone, Linth, Muota, Rhein) bzw. 1976–1987 (Emme, Glatt, Broye), die rote Linie bezieht sich auf die Messperiode 1988–2005. Die schwarz eingezeichneten Säulen zeigen die Temperaturdifferenzen zwischen den mittleren Temperaturen 1988–2005 und 1976–1987 bzw. 1974–1987 und beziehen sich auf die rechte Y-Achse.

Die Erhöhung der Winter- und Frühlingstemperaturen verlängert die Wachstumsphase der Fauna und Flora allgemein. Bei lachsartigen Fischen wirken sich höhere Wintertemperaturen positiv auf die Eientwicklung aus. Durch höhere Sommertemperaturen werden die Karpfenartigen und Barsche auf Kosten der Lachsartigen, deren Stoffwechsel an tiefe Temperaturen angepasst ist, bevorteilt [19]. Bei Libellenlarven beschleunigen höhere Winter- und Frühlingstemperaturen die Emergenz. So konnten beispielsweise in verschiedenen Stillgewässern bei der Hufeisen-Azurjungfer bereits phänologische Veränderungen beobachtet werden [20].

5.3 Stundenwerte über 15 °C

Für insgesamt 38 Stationen konnte die Anzahl Stunden in den verschiedenen Temperaturwertebereichen langfristig berechnet werden, wobei sich bei rund einem Viertel dieser Stationen alle Werte unter 15 °C (Schwellenwert für PKD-Mortalität) befinden. Um die Häufigkeit hoher Wassertemperaturen zu erfassen, wurde die Anzahl Stunden ausgezählt, welche innerhalb von jeweils fünf Jahren eine Wassertemperatur von 15 °C überschritten haben. Als weitere Klassengrenze wurden aufgrund der vorgängig ausgeführten Überlegungen zur ökologischen Bedeutung der Temperatur die Werte 18 °C, 21 °C und 24 °C gewählt. Die Stundenwerte aller Stationen sind im *hydrologischen Atlas der Schweiz* (HADES) auf der Karte in Tafel 7.7 dargestellt [10].

Zwischen 1976 und 2005 lässt sich in allen Höhenlagen der Messstationen eine Zunahme der Stunden mit höheren Temperaturen feststellen (*Tab. 2)* [10]. In den montanen und subalpinen Gewässern ohne Seeeinfluss sowie in den kollinen Gewässern mit Grundwassereinfluss nehmen hauptsächlich die Stunden mit Temperaturen zwischen 15 und 18 °C bzw. 15 und 21 °C zu, was für diese Fliessgewässer bereits als hohe Temperatur bezeichnet werden muss. In den grösseren Gewässern mit Seeeinfluss nimmt die Anzahl Stunden zwischen 15 °C und 18 °C eher ab, während die Anzahl Stunden über 18 °C meist ansteigt. Der Zwischenbereich 15–18 °C wird bei diesen Messstellen im Frühling und Herbst schneller durchlaufen, dagegen verharren die Temperaturen im Sommer länger im hohen Temperaturbereich. Stunden mit Temperaturen über 24 °C werden hauptsächlich in den Flüssen mit montanem Einzugsgebiet unterhalb von Seen festgestellt, was auf die starke Erwärmung des Oberflächenwassers in Seen bei lang anhaltenden warmen Wetterlagen zurückzuführen ist. Auch in unbeeinflussten Fliessgewässern mit kollinem Einzugsgebiet wie z.B. in der Thur-Andelfingen oder Broye-Payerne treten vermehrt Temperaturen über 24 °C auf.

Die Folgen von hohen kurzfristig auftretenden Temperaturen können Fischsterben sein. Ein massives Fischsterben ereignete sich im August 2003 im Rhein: Zwischen Bodensee-Untersee und Eglisau verendeten hitzebedingt ca. 52 000 Äschen [28]. Bei den Wirbellosen leiden vor allem die Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven unter hohen Temperaturen. Für Eintagsfliegenlarven und Steinfliegenlarven konnten mittlere Letaltemperaturen im Bereich von 20–29 °C beobachtet werden [22]. Andere Wirbellose sind mit Letaltemperaturen im Bereich von 30 °C toleranter gegenüber warmen Wassertemperaturen. Ein weiteres biologisches Phänomen ist das Vorkommen von Süsswasserquallen in Seen, welche im Hitzesommer 2003 im Neuenburgersee aufgrund hoher Temperaturen beobachtet wurden. Quallen können sich nur bilden, wenn die Idealtemperatur von 25–27 °C erreicht wird [28].

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Eine grobe Klassifizierung der Stationen anhand ihres Temperaturregimes konnte unter Einbezug der Kenntnisse über die klimatischen Bedingungen sowie über natürliche und anthropogene Einflüsse im Einzugsgebiet der jeweiligen Fliessgewässer vorgenommen werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Haupteinflüsse nicht immer einfach und eindeutig identifiziert werden können, weil sie sich zum Teil überlagern und sich unterschiedlich auf das Temperaturregime auswirken.

Aufgrund der Klassifizierung der Messstationen kann festgehalten werden, dass sich seit der Erweiterung des Messnetzes dessen Repräsentativität stark erhöht hat, indem neu auch anthropogen unbeeinflusste und kleinere Einzugsgebiete im Messnetz erfasst werden. Das heutige Messnetz stellt damit eine gute Basis für die Erfassung der Entwicklung der Wassertemperaturen in Schweizer Fliessgewässern dar.

Die Klassifizierung hat gezeigt, dass von den diskutierten Einflüssen sich insbesondere die Grundwasserexfiltration sehr deutlich im Temperaturregime der entsprechenden Messstationen zeigt. Dieser Einfluss wurde in den bisherigen Auswertungen zu wenig berücksichtigt und nicht quantifiziert. Insbesondere bei der Modellierung der Temperaturverhältnisse, bei welcher die enge Beziehung zwischen Luft- und Wassertemperatur berücksichtigt wird, sollte der Grundwassereinfluss ebenfalls einbezogen werden. Dies vor allem im Hinblick auf eine Bewertung der Temperaturverhältnisse, die z.B. in das Modul-Stufen-Konzept des BAFU [29] eingegliedert werden könnte. Eine grosse Herausforderung stellt hierbei die Tatsache, dass sich der Grundwassereinfluss entlang des Flusslaufes ändert und sich somit, je nach Standort der Messstationen, unterschiedlich stark auf das Temperaturregime auswirkt. Interessant in diesem Zusammenhang ist auch die Frage, inwieweit sich im Bereich von Grundwasserexfiltrationen aufgrund deren ausgleichenden Wirkung auf das Temperaturregime bei extremen Wassertemperaturen Rückzugshabitate für Fische und Wirbellose bilden können. Um das Verständnis über den Einfluss des Grundwassers auf das Temperaturregime von Fliessgewässern zu erweitern, wäre es deshalb prüfenswert, noch

mehr Messstationen im Bereich von Grundwasserexfiltrationen zu errichten.

Langfristige Änderungen in den Wassertemperaturen – sowohl in den Jahresmittelwerten als auch im saisonalen Temperaturregime – konnten bei praktisch allen Messstationen festgestellt werden. Dabei sind deutliche Temperaturzunahmen in Fliessgewässern in tieferen Lagen und Temperaturabnahmen in alpinen Fliessgewässern mit einem hohen Anteil an Vergletscherung im Einzugsgebiet ersichtlich. Die Ursachen für diese Temperaturveränderungen können jedoch nicht immer eindeutig eruiert werden, da die langfristigen Messreihen zum grössten Teil bei den anthropogen beeinflussten Fliessgewässern existieren und deshalb klimatisch bedingte, natürliche Einflüsse und anthropogene Einflüsse kombiniert auf das Temperaturregime einwirken.

Die Veränderungen der Wassertemperaturen liegen jedoch in einem Bereich, welcher Anpassungen der Biologie zur Folge hat. Eine solche Anpassung der aquatischen Fauna findet bereits statt, was Beobachtungen in der Phänologie und in der Artenzusammensetzung von aquatischen Organismen bestätigen. Die vorhandenen biologischen Daten können nicht absolut eindeutig den gemessenen Temperaturveränderungen zugeordnet werden, weil oft parallel auch andere anthropogene Einflüsse die Lebensbedingungen der aquatischen Fauna verändern. In diesem Bereich ist deshalb noch ein grosser Forschungsbedarf vorhanden. Das nationale Messnetz bietet hierfür eine gute Grundlage, die es zu nutzen gilt.

Literaturverzeichnis

[1] *Baumgartner, A.; Liebscher, H.J.* (1990): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie, Bd. 1; 673 S.; Gebrüder Borntraeger, Berlin – Stuttgart.

[2] *Meier, W.; Bonjour, C.; Wüest, A.; Reichert, P.* (2003): Modeling the Effect of Water Diversion on the Temperature of Mountain Streams. Journal of Environmental Engineering 755–764.

[3] *Meier, W.; Wüest, A.* (2004): Wie verändert die hydroelektrische Nutzung die Wassertemperatur der Rhone? Wasser Energie Luft, 96, 11/12 305–309.

[4] *BAFU, Bundesamt für Umwelt:* Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz, Bern-Ittigen.

[5] *de Montmollin, F.; Jakob, A.* (1995): Temperaturverhältnisse in Fliessgewässern und Seen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz; Tafel 7.3. Landeshydrologie und -geologie, Bern.

[6] *de Montmollin, F.; Parodi, A.* (1990): Température des cours d'eau suisses, Mitteilung Nr. 12 der Landeshydrologie und -geologie, Bern. 96 S.

[7] *Jakob, A.* (2000): Temperaturentwicklung in den Fliessgewässern. Mitteilung zur Fischerei 66, 29–40, BUWAL.

[8] *Jakob, A.; Liechti, P.; Binderheim, E.* (2002): 30 Jahre NADUF – Eine Zwischenbilanz. gwa, 3/02 203–208.

[9] *Jakob, A.; Liechti, P.; Schädler, B.* (1996): Temperatur in Schweizer Gewässern – Quo vadis? gwa, 4/96 288–294.

[10] *Jakob, A.; Pfammatter, F.; Schädler, M.* (2007): Veränderungen der Temperaturen in Fliessgewässern 1976–2005. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 7.7. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[11] *Moore, J. A.; Miner, J.R.* (1997): Stream Temperatures – Some Basic Considerations, 2–6, Oregon State University.

[12] *Moosmann, L.; Schmid, M.; Wüest, A.* (2005): Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe. Eawag.

[13] *Binder, W.* (1980): Landschaftsökologische Gesichtspunkte bei der Gewässerregulierung und der Gewässerpflege. In: Institut f. Wassergüte und Landschaftswasserbau der TU Wien (Hg.), Landschaftswasserbau, Bd. 1 30–51.

[14] *Ward, J.V.* (2003): The Ecology of Alpine Streams. Eawag news 54.

[15] *Pfammatter, F.* (2004): Untersuchungen zur Wassertemperatur in schweizerischen Fliessgewässern. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

[16] *Krejci, V.; Frutiger, A.; Kreikenbaum, S.; Rossi, L.* (2004): Projekt «STORM: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter» – Gewässerbelastungen durch Abwasser aus Kanalisationen bei Regenwetter. Broschüre Eawag und BUWAL, 36 S.

[17] *Livingstone, D.M.; Dokulil, M.T.* (2001): Eighty years of spatially coheren Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation. Limnology and Oceanography 46 1220–1227.

[18] *Hari, R.E.; Livingstone, D.M.; Siber, R.; Burkhardt-Holm, P.; Güttinger, H.* (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. Global Change Biology 12 10–16.

[19] *Küttel, S.; Peter, A.; Wüest, A.* (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fliessgewässer. Rhône Revitalisierung Publikation Nummer 1.

[20] *Oertli, B.; Rosset, V.; Lehmann, A.* (2009): Biodiversity in alpine ponds: an indicator of climate warming? Vortrag im Rahmen der Tagung der SGHL «Schnee, Eis und Wasser im Alpenraum – aktueller denn je!». Link: *http://chy.scnatweb.ch/d/Aktuell/Veranstaltungen/documents/Oertli.pdf.*

[21] *Troschel, J.* (1994): Anforderungen an Krebsgewässer. In: Mitteilungen zur Fischerei 52 47–52, BUWAL.

[22] *Davies, P.; Cook, B.; Rutherford, K.; Walshe, T.* (2004): Managing high in-stream temperatures using riparian vegetation. River and riparian land management technical guideline Number 5.

[23] *Gerster, S.* (2006): PKD – Die Proliferative Nierenkrankheit. Faltblatt, Fischereiberatung (FIBER) Eawag, Kastanienbaum.

[24] *BAFU* (2007): Wassertemperaturmessungen des Bundesamtes für Umwelt, Abteilung Hydrologie (Stand 2007). Interner Konzeptbericht, 14 S.

[25] *Baltisberger, M.* (2009): Systematische Botanik – Einheimische Farn- und Samenpflanzen. 3., korrigierte Auflage, vdf-Hochschulverlag, 328 S.

[26] *Pauli, H.; Gottfried, M.; Reiter, K.; Klettner, C.; Grabherr, G.* (2007): Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. Global Change Biology 13 147–156.

[27] *Rebetez, M.; Reinhard, M.* (2007): Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. Theoretical and Applied Climatology.

[28] *BUWAL, BWG, MeteoSchweiz* (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern-Ittigen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 174 S.

[29] *BUWAL* (1998): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer in der Schweiz. Modul-Stufen-Konzept. Mitteilungen zum Gewässerschutz Nr. 26 des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft.

Keywords

Wassertemperatur – Entwicklung – Klimawandel – Messnetz

Adressen der Autoren

Adrian Jakob, Dr. phil. nat.
Bundesamt für Umwelt BAFU
CH-3003 Bern
Tel. +41 (0)31 324 76 71
Fax +41 (0)31 324 76 81
adrian.jakob@bafu.admin.ch

Evi Binderheim, Dr. sc. techn.
Sponsolim Umweltconsulting
Dachslenbergstr. 51, CH-8180 Bülach

Miriam Schädler, dipl. natw.
Spitalackerstr. 7, CH-3013 Bern

Fabian Pfammatter, lic. phil. nat.
Raumplanung + Umwelt AG
Büro für nachhaltige Raumentwicklung und Umweltplanung
Sebastiansplatz 1
CH-3900 Brig-Glis

Verdankungen

Die vorliegende Publikation wäre ohne die zuverlässige und sorgfältige langjährige Arbeit im Feld und in der Datenbearbeitung nicht möglich. Die Autoren danken deshalb den zahlreichen beteiligten Mitarbeitenden der Abteilung Hydrologie des Bundesamts für Umwelt sowie den lokalen Betreuern der Stationen.