

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

Temperaturveränderungen im Gewässer bei Regenwetter*

Influence des rejets urbains en temps de pluie sur la température des cours d'eau

Une augmentation soudaine des températures en été dans un cours d'eau par des rejets pluviaux en milieu urbain peut être dommageable pour les organismes aquatiques. Est-ce réellement un problème pour notre environnement? Quel est l'ordre de grandeur de cette augmentation de température en début d'événement de pluie? Ces questions seront discutées dans cet article. Une démarche simple pour l'estimation des températures est présentée. Des valeurs limites de températures spécifiques par temps de pluie sont également définies. Plusieurs exemples en Suisse sont illustrés, ceci pour différentes surfaces imperméables.

Influence of Urban Stormwater on the Temperature of Receiving Water

A sudden temperature increase due to urban stormwater discharges in receiving waters can be detrimental for aquatic organisms. Is this a real problem for our environment? How important is the initial temperature increase during a rain event? These questions will be discussed in this article. In addition to the definition of limiting values, a simple approach for runoff temperature estimation is presented. Various examples in Switzerland for different impervious surfaces are illustrated.

* Dieser Artikel ist der siebte einer Serie des EAWAG- und BUWAL-Projektes «STORM».

Luca Rossi



Zu Beginn eines Regenereignisses kann in einem Gewässer durch Kanalisationseinleitungen eine plötzliche Temperaturerhöhung stattfinden, die für viele im Wasser lebenden Organismen schädlich sein könnte. Doch wie gross sind solche Temperaturerhöhungen? Und sind sie wirklich problematisch? Diese Fragen werden im folgenden Artikel diskutiert. Es wird eine einfache Temperaturberechnung vorgestellt und spezifische Regenwettergrenzwerte für Temperaturänderungen definiert. Beides wird anhand von Beispielen aus der Schweiz mit unterschiedlichen Arten von befestigten Oberflächen getestet und bestätigt.

1. Einleitung

Die Temperatur ist einer der wichtigsten Parameter, die die chemischen Gleichgewichte und die Entwicklung der Fauna und Flora in unseren Gewässern beeinflussen. Eine Temperaturerhöhung vermindert die Löslichkeit von Sauerstoff, beschleunigt Lebensvorgänge, wie z. B. die Fotosynthese bei Wasserpflanzen oder die Eientwicklung der Fische, und erhöht die Empfindlichkeit der Organismen gegenüber giftigen Substanzen, Parasiten und Krankheiten [1, 2, 3, 4]. Die Temperatur ist ein wichtiger Parameter für die Schätzung der Ammoniaktoxizität [5, 6], die unter anderem in einem früheren Artikel über das Projekt «STORM» bereits beschrieben wurde [7].

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

Es gibt zahlreiche Gründe für Temperaturschwankungen in Fliessgewässern: klimatische (tägliche und saisonbedingte) [8], das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von Beschattung entlang der Ufer [9], ein morphologisch abwechslungsreicher Zustand des Fliessgewässers [10], Schwall- und Sunkregime nach Stauseen je nach Elektrizitätsnachfrage (plötzliche Stauseeabflüsse kühlen das Gewässer schockartig), die Einleitung von Kühlwasser, die Speisung des Fliessgewässers durch Grundwasser oder die Kanalisationseinleitungen aus einem Siedlungsgebiet bei Regenwetter [5, 11].

Die urbanen Kanalisationseinleitungen können bei Regenwetter zu einem Temperaturproblem für die Vorfluter werden. Durch die fortschreitende Versiegelung des Bodens ($1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ in der Schweiz) mit der Entwicklung der Ballungsräume erreicht der Regenabfluss die Fliessgewässer schneller und kann im Sommer zu einer kurzfristigen Erhöhung der Temperatur zu Beginn des Regenereignisses führen. Tatsächlich misst man auf versiegelten Asphaltoberflächen oder Dächern bei anhaltend schönem Wetter sehr hohe Temperaturen ($> 60 \text{ }^\circ\text{C}$). Ein gleichzeitig geringer Wasserstand im Fliessgewässer verschärft die Möglichkeit eines kurzfristigen Temperaturpeaks. Die Frage nach den Auswirkungen einer solchen Temperaturerhöhung wurde im Kanton Aargau aufgeworfen, wo die Fischer vermuten, dass die Temperatur der Kanalisationseinleitungen bei Regenwetter die Entwicklung verschiedener Fischarten beeinträchtigt. Dieser Frage wird in diesem Artikel nachgegangen. Spezifische Grenzwerte für Regenwetter werden als Kriterien für eine Beurteilung vorgeschlagen und eine einfache Berechnung wird vor-

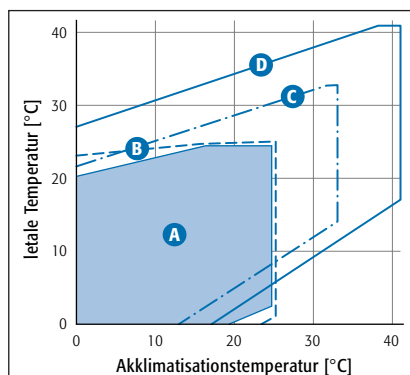


Abb. 1 Tolerierte Temperaturbereiche verschiedener Fischarten (A: Bachforelle, B: Bachsäbbling, C: Plötze, D: Goldfisch) in Abhängigkeit der Akklimatisations-temperatur. Bis zur «letalen Temperatur» können die Fische gerade noch unbefristet leben ohne Beeinträchtigung [16].

demonstriert. Diese stützt sich auf die Ergebnisse dreier Untersuchungen, die in der Schweiz auf unterschiedlich versiegelten Oberflächen durchgeführt wurden.

2. Definition der Temperaturkriterien

Die Eidg. Gewässerschutzverordnung (GSchV vom 28. Oktober 1998) legt eine maximale Temperaturschwankung in einem Fliessgewässer von $3 \text{ }^\circ\text{C}$ fest, bzw. für Forellengewässer von $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Die maximale Wassertemperatur für alle Fliessgewässer wurde auf $25 \text{ }^\circ\text{C}$ festgelegt (GSchV, Anhang 2, Ziffer 12, Absatz 4). Darüber hinaus präzisiert Anhang 3.2, Ziffer 2, dass die Höchsttemperatur des eingeleiteten Kühlwassers in Gewässer nicht mehr als $30 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen darf. Minimale Überschreitungen von kurzer Dauer im Sommer werden von den Behörden gestattet. Diese gesetzlich festgelegten Werte basieren auf Langzeitkriterien in Bezug auf Temperaturänderungen (> 1 Jahr) und können nicht auf Änderungen von kurzer Dauer, wie bei Regenfällen, angewandt werden. Deshalb

werden hier Grenzwerte vorgeschlagen, die sich nur auf Regenwetter beziehen. Sie basieren auf den Temperaturansprüchen von Bachforellen, die zu den empfindlichsten Fischarten gehören.

Im Allgemeinen hängt die von den im Wasser lebenden Organismen tolerierte maximale oder minimale Temperatur von zahlreichen Faktoren ab [12, 13]:

- Die Akklimatisations-temperatur (Temperatur, in der die Fische üblicherweise leben): Normalerweise sind Fische, die in Gewässern mit höheren Temperaturen leben, etwas weniger empfindlich gegenüber Temperaturerhöhungen.
- Die Dauer der Exposition im veränderten Temperaturbereich: Die Dauer einer Temperaturerhöhung ist bei Regenereignissen relativ kurz. Je kürzer die Dauer ist, desto höher darf die maximale Temperatur für Fische sein [13].
- Die minimale oder maximale Temperatur, die ein Fischsterben hervorruft: Diese sind für jede Fischart verschieden [14].
- Die betrachtete Fischart und das Entwicklungsstadium: Die Salmoniden sind im Allgemeinen temperaturempfindlicher als die anderen Arten unserer Gewässer. Darüber hinaus sind Fische im Jugendstadium (Juvenile) eher empfindlicher als erwachsene Fische.
- Die Grösse der Temperaturänderung: Ein grosser Temperaturunterschied vor und nach dem Einleiten des Kanalisationswassers (z. B. $7 \text{ }^\circ\text{C}$) kann problematisch sein, auch wenn die maximale Temperatur nicht erreicht wird.
- Die Schnelligkeit mit der die Temperaturänderung stattfindet: Während eines Regenereignisses erwartet man eine sehr schnelle Änderung der Temperatur von mehreren Grad Celsius pro zehn Minuten, während die täglichen natürlichen Temperaturänderungen von $0,5$ bis $1 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Stunde bei den Fischen keinen Schaden anrichten [15].

Abbildung 1 zeigt den Temperaturbereich, in dem eine Fischart überleben kann, in Abhängigkeit der Akklimatisations-temperatur.

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

Kriterium	Temperaturparameter	Grenzwert
T1	Maximale Temperatur nach der Einleitung aus der Kanalisation (April bis Oktober)	< 25°C oder Abb. 2
T2	Maximal tolerierbare Änderung der Temperatur durch Einleitung aus der Kanalisation	< 7°C
T3	Maximale Temperatur nach der Einleitung aus der Kanalisation (November bis März)	< 12°C

Tab. 1 Temperaturkriterien für Kanalisationseinleitungen bei Regenwetter.

Basierend auf diesen Beobachtungen wurden drei Kriterien für die Beurteilung einzelner Abwassereinleitungen definiert (Tab. 1): die maximale Temperatur im Sommer nach vollständiger Vermischung im Gewässer (T1), die maximale Differenz zwischen der Ausgangs- und Endtemperatur (T2) und schliesslich die maximale Temperatur im Winter (T3). Das letzte Kriterium bezieht sich hauptsächlich auf Mischsysteme.

Wie schon mehrfach im Projekt «STORM» erwähnt, spielen dynamische Aspekte während eines Regenereignisses eine wichtige Rolle. Auf die Temperatur trifft dies ebenfalls zu. So basiert das Kriterium T1 auf einer Kurve vom Typ KDF (Konzentration-Dauer-Frequenz), die die maximal mögliche Temperatur bei einer bestimmten Expositionsdauer zeigt [17]. Solche Kurven wurden für junge Salmoniden vorgestellt [18, 19]. Sie stellen die von der Expositionsdauer abhängige maximale Temperatur dar, bei der alle Fische einer Population überleben können (Abb. 2). Dieser Zusammenhang ist für jede Fischart in jedem Entwicklungsstadium verschieden und muss deshalb einzeln ermittelt werden.

Für die Schweiz wird eine Kurve unabhängig von der Anfangsakklimatisations-temperatur

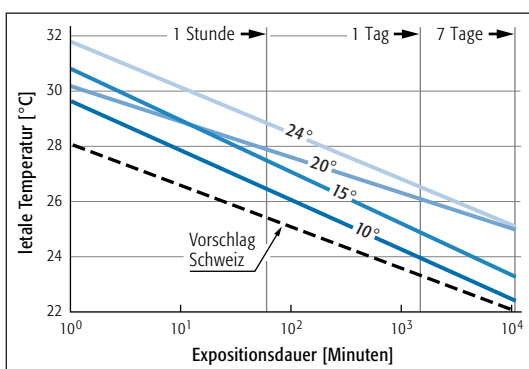


Abb. 2 Überlebenstemperatur in Abhängigkeit der Expositionsdauer für juvenile Salmoniden (im ersten bis dritten Jahr) bei verschiedenen Akklimatisations-temperaturen (10, 15, 20, 24 °C). Die Temperaturdaten stammen aus [19] und sind ergänzt durch den von der EAWAG präsentierten Vorschlag für die Schweiz.

vorgestellt. Die Zeitspanne, in der der Regen die versiegelten Flächen abkühlt und deshalb kein warmes Kanalisationswasser mehr entsteht, wird grosszügig auf höchstens eine Stunde geschätzt. Die maximal tolerierte Wassertemperatur für die Schweiz berücksichtigt eine Sicherheitsspanne von 2 °C in der relevanten Zeitspanne von höchstens einer Stunde (Abb. 2), wie sie auch von verschiedenen anderen Wissenschaftlern vorgeschlagen wurde [19, 20]. So liegt die vorgeschlagene tolerierte Höchstwassertemperatur bei ca. 28 °C für eine Expositionsdauer von einer Minute, bei ca. 27 °C für eine Dauer von zehn Minuten und bei ca. 25 °C für eine Expositionsdauer von einer Stunde.

Das Kriterium T2 basiert auf verschiedenen im Labor durchgeführten Untersuchungen. Die erste Untersuchung bestand darin, einen Temperaturschock für Bachforellen (*Salmo trutta*), die an Rheinwasser von ca. 12 °C gewöhnt waren, zu simulieren. Diese Fische wurden drei Stunden lang einer Temperaturerhöhung von 7 °C ausgesetzt und dann wieder in die Ausgangsbedingungen zurückversetzt [21]. Sichtbare Hautirritationen und Schäden an den Kiemen waren die Folge. Die Untersuchung wurde über einen Zeitraum von 29 Tagen durchgeführt um festzustellen, inwieweit die Fische sich wieder erholen. Nach 29 Tagen, d.h. nach Beendigung der Untersuchung, war die Erholungsrate gering. Offensichtlich war dieser Schock für die Forellen nicht tolerierbar. In der zweiten Untersuchung wurde die gleiche Forellenart über einen Zeitraum von zwei Stunden einem plötzlichen und sehr hohen Temperaturwechsel ausgesetzt (von 8 auf 19 °C) und dann wieder in die Ausgangstemperatur von 8 °C zurückversetzt [22, 23]. Mehrere Analysen wurden sofort, 24 und 48 Stunden nach der

Exposition durchgeführt. Besonders Stresshormone (*Heat Shock Protein: HSP*) konnten festgestellt werden [24]. Nach 48 Stunden war die Konzentration der Stressproteine wieder gleich wie bei den nicht exponierten Fischen, was zeigt, dass sich die exponierten Fische gut erholt hatten. In diesem zweiten Experiment konnten die Fische eine 11 °C betragende Temperaturänderung, die zwei Stunden anhielt, also gut ausbalancieren. Auf Grund dieser zwei Untersuchungen wird vorgeschlagen, eine maximale Expositionsdauer von einer Stunde mit einer maximalen Temperaturerhöhung von 7 °C als Grenzwert einzusetzen. Hierbei wurde eine Sicherheitsmarge berücksichtigt. Darüber hinaus wird die vorgeschlagene Erhöhung (7 °C während einer Stunde) durchschnittlich nur ein Mal alle zwei Jahre toleriert (siehe Berechnung).

Das Kriterium T3 basiert auf einer kritischen Temperatur für die Entwicklung der Fischeier und Larven. Fischeier sind gegenüber schädlichen Umwelteinflüssen und Temperaturschwankungen besonders empfindlich [25]. Die Eier werden im November in den Flussbetten abgelaicht und die Larven schlüpfen im Februar oder März. Das Schlüpfen erfolgt nach einer bestimmten Anzahl von Tagen, abhängig von der Wassertemperatur. Je wärmer das Wasser, desto schneller entwickeln sich die Eier. In der Schweiz erfolgt das Schlüpfen von Bachforellen (*Salmo trutta faro*) nach ca. 420 Gradtagen (d.h. ungefähr 80–90 Tage zwischen 4 und 5 °C) [8]. Um Mortalität oder vorzeitiges Aufbrechen der Eier zu vermeiden, darf die maximale Temperatur von November bis März 12 °C nicht übersteigen [26]. Aber bereits Temperaturen unter 1 °C oder über 9 °C können zu einer höheren Mortali-

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

tätsrate führen [27]. Im Winter kann die maximale Temperatur während Einleitungen bei Regenwetter überschritten werden und zwar in Einzugsgebieten mit Installationen, die eine grosse Wärmemenge speichern. Man spricht hierbei von «Abwärme» im Vergleich zu Abwasser. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu erwähnen, dass das Gesetz erlaubt, bis zu maximal 60 °C warmes Industrierwasser in die Kanalisation einzuleiten und dass nach vollständiger Vermischung die Temperatur in der Kanalisation immer noch 40 °C betragen darf (GSchV, Anhang 3.2, Ziffer 2). Die obere Grenze einzuhalten ist also nur zum kleinen Teil das Problem des urbanen Regenabflusses. Im Winter sind auch zu niedrige Temperaturen zu vermeiden, wie sie zum Beispiel im Zusammenhang mit der Schneeentsorgung in einem Fliessgewässer auftreten können. Die Überlebenswahrscheinlichkeit bei einer Temperatur von 1 °C im Winter ist weitaus geringer als eine Überschreitung der maximalen Temperatur im Sommer [28]. Zusätzlich enthält der auf den Strassen oder in den Einzugsgebieten eingesamelte Schnee zahlreiche, potenziell gefährliche Substanzen, die die Fauna und Flora belasten können.

3. Einfache Berechnung der Temperatur

Verschiedene thermodynamische Modelle zur Schätzung der Temperatur von Regenabfluss während eines Regenereignisses sind bereits vorgeschlagen worden [29, 30, 31, 32, 33, 34]. Bevor man sich auf solche Modellierungen konzentriert, kann man auf einfachere Weise das Risiko berechnen, das mit der Erhöhung der Temperatur in einem Fliessgewässer zu Beginn eines Regenereignisses verbunden

ist. Diese Vorgehensweise läuft in mehreren Schritten ab (Abb. 3). Der *erste Schritt* berücksichtigt die Temperatur des Fliessgewässers bei in der Schweiz normalem sommerlichem Trockenwetter, noch unabhängig von Regenwassereinleitungen. Er schliesst Gewässer aus, die ohnehin zu warm sind für Forellen. Auch hier wird eine Sicherheitsmarge berücksichtigt. Es wird vorgeschlagen, Flüsse mit einer Tagesmitteltemperatur von bis zu 22 °C noch zu den Gewässern mit Forellenbestand zu zählen. Temperaturen von 22 °C und mehr liegen zwar schon ausserhalb des für die Schweiz ermittelten Idealtemperaturbereichs für die Entwicklung von erwachsenen Forellen (Abb. 4) [8] und enthalten deshalb auch wieder eine Sicherheitsspanne. Diese Idealkurve wurde für die Schweiz empirisch ermittelt. Eine Überschreitung bewirkt bereits temperaturbedingten Stress, unabhängig von Regenwassereinleitungen. Das Problem der Temperatur ist in diesem Fall verbunden mit der morphologischen Beschaffenheit des Fliessgewässers (sind kühlere Nischen vorhanden durch ein abwechslungsreiches Flussbett?) und des Ufers (spenden Bäume und Sträucher in der Uferzone Schatten oder eben nicht?) [9, 35]. Aussergewöhnliche klimatische Bedingungen, wie die des Sommers 2003 in Europa, können auch unabhängig von Regenwassereinleitungen zu sehr hohen Temperaturen führen und die Forellen schwächen. Wenn die erste Bedingung erfüllt ist (höchste Tagesmitteltemperatur ≤ 22 °C, optimale Temperaturen gemäss Abbildung 4), erfordert der *zweite Schritt* eine Berechnung der Temperatur des Regenabflusses. Zwischen der Lufttemperatur und der Regenabflusstemperatur auf asphaltierten Oberflächen existiert

eine lineare Korrelation, die für verschiedene klimatische Bedingungen mit Hilfe eines thermodynamischen Modells aufgestellt wurde. Berücksichtigt sind Regenereignisse, die nur alle zwei Jahre einmal vorkommen (zweijährliche Periodizität) und eine Stunde dauern [32].

$$T_{\text{Regenwasser}} = (0.8 T_{\text{Luft}} + 5.2) (1 - c) \quad (\text{Gl. 1})$$

$T_{\text{Regenwasser}}$: mittlere Regenabflusstemperatur (°C)
 T_{Luft} : mittlere Lufttemperatur (°C)
 c : Abkühlungskoeffizient (-)

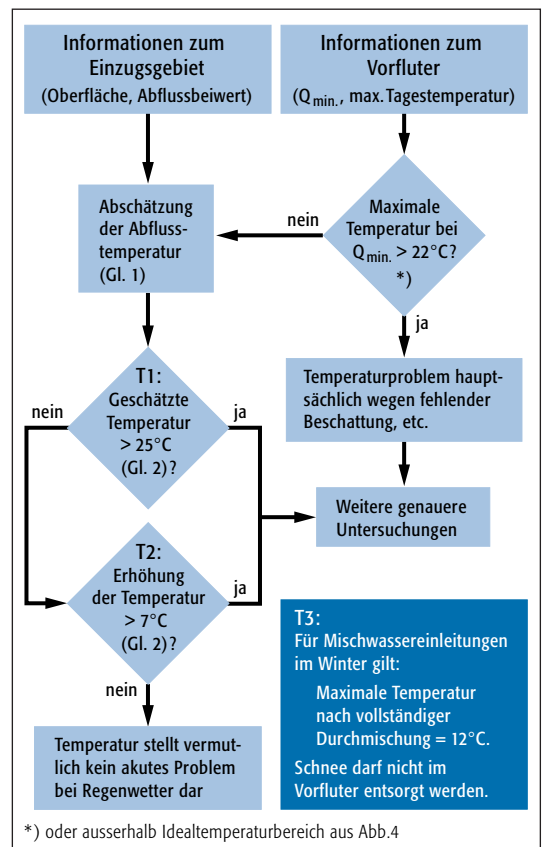


Abb. 3 Vorgehensweise zur Abschätzung der potentiellen Gefährdung von Fischen durch kurzfristige Temperaturänderungen.

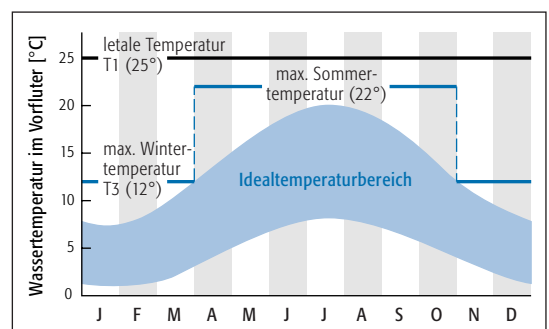


Abb. 4 Idealtemperaturbereich für Bachforellen sowie der Grenzwert für die maximale Temperatur im Sommer (T1: 25 °C), die tolerierte Tagesmitteltemperatur (22 °C) und die maximale Temperatur im Winter (T3: 12 °C).

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

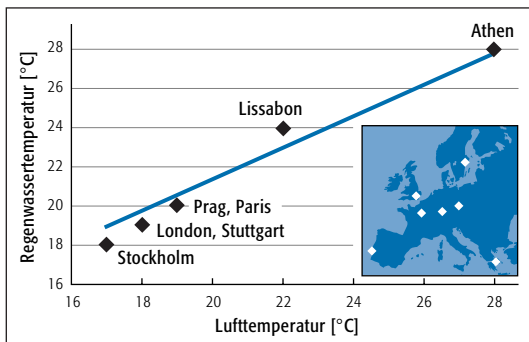


Abb. 5 Korrelation zwischen der Lufttemperatur (Stundenwert) und der Regenabflusstemperatur (Stundenwert) für asphaltierte Oberflächen in verschiedenen Breitengraden (Regen von einstündiger Dauer, zweijährliche Periodizität) (nach [32]).

Die Bedeutung des Abkühlungskoeffizienten erklärt sich wie folgt: Das Modell basiert auf dem Abfluss von einer ebenen, versiegelten Asphaltoberfläche ohne Beschattung und in unmittelbarer Nähe eines Fließgewässers. Durchgeführte Messungen in verschiedenen Einzugsgebieten zeigen eine wesentliche Abkühlung des Regenabflusses in der Kanalisation (zwischen 20 und 30 %), z. B. für einen Parkplatz, der direkt am Ufer liegt [32]. Der Abkühlkoeffizient korreliert stark mit der Länge der Kanalisation, der Art der versiegelten Oberfläche (Asphalt, Beton, Ziegel etc.) sowie der Grösse des Einzugsgebietes. In einer ersten Berechnung ist es möglich, diesen Koeffizienten zu vernachlässigen. Man untersucht in diesem Fall eine extreme oder «Worst Case»-Situation.

Wie man der *Abbildung 5* entnehmen kann, überschreiten unter «normalen» Bedingungen (Regen von einstündiger Dauer, zweijährliche Periodizität) die Temperaturen des Regenabflusses in mitteleuropäischen Städten, die sich auf dem gleichen Breitengrad wie die Schweiz befinden, die 21- bis 22-Grad-Marke nicht. Unter aussergewöhnlichen Bedingungen, wie z. B. die des Sommers 2003, können Temperaturen von bis zu 29 °C erreicht werden, aber die Periodizität dieser Bedingungen ist sehr hoch (ungefähr 100 Jahre). Solche Temperaturen entstehen unter klimatischen Bedingungen, wie man sie normalerweise z. B. in Athen antrifft.

Ist die Temperatur des Regenabwassers ($T_{\text{Regenwasser}}$) bekannt, so kann die Temperatur im Fließgewässer ($T_{\text{unterhalb}}$) mit Hilfe einer einfachen Gleichung und auch wieder für den Extremfall mit Niedrigwasser berechnet werden:

$$T_{\text{unterhalb}}^{\circ} = \frac{Q_{\text{min}} \cdot T_{\text{oberhalb}}^{\circ} + Q_{\text{Regenwasser}} \cdot T_{\text{Regenwasser}}^{\circ}}{Q_{\text{min}} + Q_{\text{Regenwasser}}} \quad (\text{Gl. 2})$$

- Q_{min} : Basisabfluss im Sommer zu Beginn eines Regenereignisses ($\ell \text{ s}^{-1}$)
 T_{oberhalb} : Temperatur oberhalb der Einleitung (°C)
 $Q_{\text{Regenwasser}}$: Regenwasserabfluss, berechnet z. B. mit dem Fließzeitverfahren für ein einstündiges Regenereignis mit Wiederkehrperiode von zwei Jahren ($\ell \text{ s}^{-1}$) (s. *Beispiel 1*)

Die Ergebnisse dieser Berechnung (*Gl. 1*) werden dann mit den folgenden *Kriterien* verglichen:

- Gibt es nach der vollständigen Mischung im Fluss eine Temperatur, die höher als 25 °C ist?
- Ist die Temperaturerhöhung im Fließgewässer grösser als 7 °C?

Bei einer positiven Antwort auf eine dieser Fragen ist eine eingehendere Untersuchung erforderlich. Dabei sind die Ungenauigkeiten der Angaben und der Koeffizient einer potenziellen Abkühlung zu berücksichtigen. Eine Absprache mit Fischereifachleuten ist ebenfalls notwendig. In den übrigen Fällen gibt es kein Temperaturproblem, das spezifisch mit dem Regenabfluss aus der Kanalisation zusammenhängt.

Was die Probleme im Winter betreffen, so kann man ebenfalls nach *Gleichung 2* vorgehen, wobei man allerdings Angaben zur Temperatur des Regenabwassers und zur Menge des abgeleiteten Wassers benötigt.

4. Beispiele aus der Schweiz

Die vorgeschlagene Vorgehensweise mit ihren Kriterien und Grenzwerten (*Abb. 3*) wurde getestet und bestätigt anhand von Beispielen aus detaillierten Untersuchungen. Verschiedene Arten von versiegelten Oberflächen wurden berücksichtigt: Dächer, Stras-

sen, Industriegebiet. Das erste Beispiel im Kanton Aargau ist besonders ausführlich dargestellt, um die Berechnungen nachvollziehen zu können.

Beispiel 1: Direkteinleitung von Dachwasser in ein kleines Fließgewässer (Erzbach, Kanton Aargau)

Die Sektion Jagd und Fischerei der Abteilung Wald des Kantons Aargau verlangte bei grösseren Einleitungen aus versiegelten Zonen *Retentionsmassnahmen*. Damit diese Massnahmen bereits im «Generellen Entwässerungsplan» (GEP) geplant werden können und schnell ein Detailprojekt ausgearbeitet werden kann, wollte der Kanton eine Richtlinie bezüglich des mit der Temperatur verbundenen Risikos ausarbeiten. Aus diesem Grund wurden zwei Untersuchungen durchgeführt, durch die abgeschätzt werden sollte, in welchem Masse und über welchen Zeitraum die Temperatur eines Fließgewässers durch die Einleitung von Regenabwasser beeinflusst wird [36, 37].

Die Untersuchung, die hier als Beispiel dient, wurde in einem Ortsteil der Gemeinde Erlinsbach (Kanton Aargau) durchgeführt, der über eine Trennkanalisation verfügt. Diese nimmt den Regenabfluss von 20 Dächern von freistehenden oder Doppelfamilienhäusern auf (Gesamtfläche 2630 m²). Der Regenabfluss wird in den Erzbach geleitet, ein kleines Fließgewässer, das hauptsächlich von Quellen gespeist wird. Die Temperatur wurde an verschiedenen Standorten gemessen sowie während eines ersten Versuchsabschnitts von Juli bis Oktober 1999 und während eines zweiten Versuchsabschnitts von Mai bis Oktober 2000 (*Abb. 6*).

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

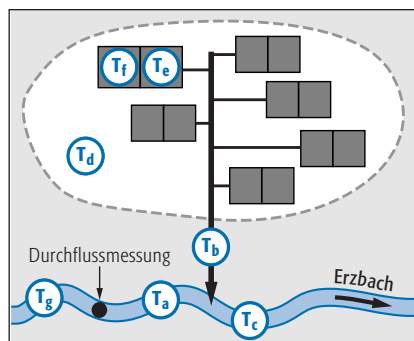


Abb. 6 Standorte der Temperaturmessstationen im Einzugsgebiet und im Erzbach.
Ta Erzbach, oberhalb der Regenwassereinleitung,
Tb Temperatur an der Einleitungsstelle des Dachwassers
Tc Erzbach, unterhalb der Regenwassereinleitung
Td Lufttemperatur (auch Standort Regenmesser)
Te Dachwasser Ostseite
Tf Dachwasser Westseite
Tg Erzbach, oberhalb Laurenzbad.

Für die Berechnung des Abflusses des Erzbachs wurden die Daten einer Messstation im Kanton Aargau verwendet (Station Nr. 377, ca. 670 m bachaufwärts entfernt von der Einleitungsstelle der Regenwassereinleitung).

Ergebnisse der Untersuchung:

Im Erzbach war während der beiden Untersuchungsperioden der minimale Abfluss (Q_{min}) gleich 20 l s^{-1} . Die im Bach gemessenen maximalen Temperaturschwankungen am Punkt *Ta* lagen bei $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$, bei einer mittleren Tagestemperatur von $12,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Zu Beginn des Regens wurden oberhalb und unterhalb der Einleitungsstelle kurzzeitige Temperaturschwankungen im Bach gemessen, jedoch betragen diese niemals mehr als $2 \text{ }^\circ\text{C}$. Die für den Anstieg notwendige Zeit betrug sechs bis zwölf Minuten. Die Erhöhung der Wassertemperatur dauerte 36 bis 48 Minuten und konnte nachher nicht mehr festgestellt werden [36, 37]. Die maximale Temperatur des Regenwasserabflusses von den Dächern (Punkt *Tb*) betrug

$20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (maximaler Wert). In *Abbildung 7* wird nur ein Ausschnitt von wenigen Tagen aus den mehrmonatigen Messreihen gezeigt. Aus *Abbildung 7* geht hervor, dass mit $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ die verlangte maximale Grenztemperatur von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht tangiert wird. Die Temperatur am Punkt *Tb* wird kontinuierlich in einem Schacht gemessen, bei Regenereignissen entspricht der Messwert der Regenabwassertemperatur, ausserhalb von Regenereignissen dem stagnierenden Wasser im Schacht oder der Lufttemperatur. Kurze Regenereignisse haben im Schacht Temperaturerhöhungen von maximal $3 \text{ }^\circ\text{C}$ hervorgerufen. Eine direkte daraus folgende Temperaturerhöhung im Gewässer (Punkt *Tc*) von mehr als $2 \text{ }^\circ\text{C}$ konnte nicht festgestellt werden. Folgt man der durch *Abbildung 3* beschriebenen Vorgehensweise, erhält man folgende Ergebnisse:

a) *Ist die maximale Tagesmitteltemperatur oberhalb der Einleitungsstelle im Sommer höher als $22 \text{ }^\circ\text{C}$ (Abb. 4)?*

Nein, denn der Erzbach wird hauptsächlich durch Quellen gespeist, deren Temperatur relativ niedrig ist. Die durchschnittliche maximale Tagestemperatur während der Untersuchungsperiode ist nicht höher als $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Temperaturbedingungen sind also gemäss *Abbildung 4* optimal. Die in *Abbildung 3* beschriebene Vorgehensweise kann konsequent fortgesetzt werden.

b) *Wie hoch ist die Temperaturerhöhung im Gewässer durch die Dachwassereinleitung?*

Um diese Frage zu beantworten, berechnet man zuerst die Temperatur des Regenabwassers mit Hilfe von *Gleichung 1*. Für hiesige Breitengrade beträgt die mittlere Lufttemperatur bei einem Regenereignis von einständiger Dauer $21 \text{ }^\circ\text{C}$

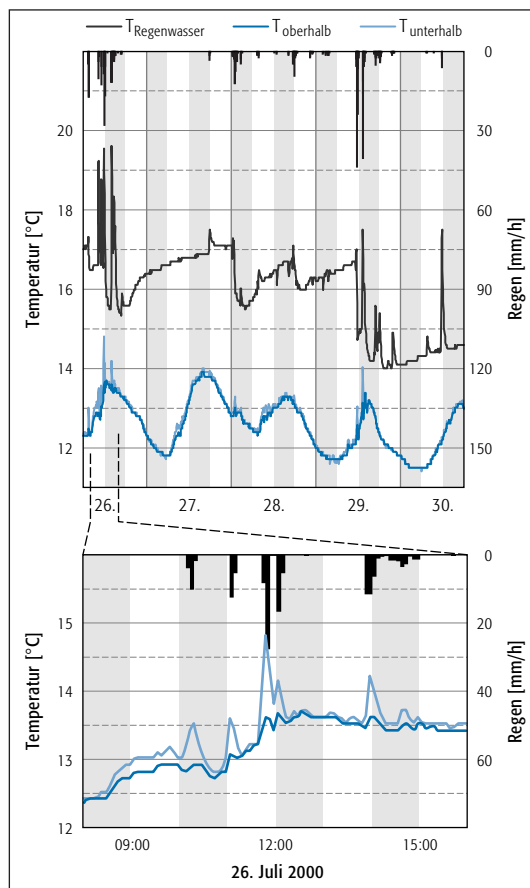


Abb. 7 Temperatur oberhalb der Regenwassereinleitung (*Ta*), im Regenwasser (*Tb*) und unterhalb der Einleitung (*Tc*) im Erzbach. Die Niederschläge sind ebenfalls dargestellt (oben und Skala am rechten Rand).
 Oben: Ergebnisse für den 26. bis 30. Juli.
 Unten: Detaillierte Darstellung eines Regenereignisses (26. Juli).

(*Abb. 5*). Eingesetzt in *Gleichung 1* und unter Vernachlässigung des Abkühlungskoeffizienten beträgt die Temperatur des Dachabwassers $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Das Dachwasservolumen kann anhand der Regenintensitätskurve von Hörler und Rhein für einen Regen von zweijährlicher Periodizität und einer Regendauer von einer Stunde ermittelt werden:

$$r = \frac{k}{B + t} = \frac{4400}{12 + 60} = 61 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1} \quad (\text{Gl. 3})$$

K, B: Ortskonstante (Hörler/Rhein)
 t: Dauer des Regens (60 Minuten)

Die mit dieser Gleichung berechnete mittlere Regenintensität multipliziert mit der Dachoberfläche (2630 m^2) ergibt dann einen Dachwasserabfluss von 16 l s^{-1} . Die Temperatur nach Einleitung in den Bach kann folgendermassen berechnet werden (*Gl. 2*):

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

$$T_{\text{unterhalb}} = \frac{Q_{\text{min}} \cdot T_{\text{oberhalb}} + Q_{\text{Regenwasser}} \cdot T_{\text{Regenwasser}}}{Q_{\text{min}} + Q_{\text{Regenwasser}}} = \frac{20 \cdot 12,2 + 16 \cdot 22}{20 + 16} = 16,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Gl.4})$$

Die Antwort auf die Fragen von *Abbildung 3* (max. Temperatur > 25 °C, Δt > 7 °C) ist in beiden Fällen negativ. Die berechnete maximale Temperatur beträgt 16,6 °C trotz Vernachlässigung des Abkühlkoeffizienten «c» aus *Gleichung 1*. Die Differenz zwischen dieser berechneten maximalen Temperatur (16,6 °C) und der mittleren Tagestemperatur (12,2 °C) ergibt eine maximale «Worst Case»-Temperaturerhöhung von 4,4 °C.

In diesem konkreten Fall gibt es also kein Temperaturproblem infolge der Dachwasserableitung in den Erzbach. *Tabelle 2* stellt die berechneten den gemessenen Ergebnissen gegenüber, unter Vernachlässigung oder Berücksichtigung eines Abkühlkoeffizienten «c» von 20 %. Zuerst wird recht pauschal mit den Durchschnitten gerechnet, diese Resultate werden dann mit den Durchschnittswerten beider Messperioden verglichen. Anschließend sind zwei Regenereignisse, deren Messresultate für die Berechnungen verwendet wurden, detailliert dargestellt. Für beide Ereignisse wurde der Koeffizient «c» so berechnet, dass er den Unterschied von der «Worst Case»-Situation zur tatsächlich gemessenen Temperatur wiedergibt. Angesichts der Ergebnisse ermöglicht ein Koeffizient «c» der Größenordnung 10 bis 20 % eine realistische Be-

EINGABEDATEN:	Erzbach (AG)				Burgdorf (BE)		Aire (GE)
	c = 0 %	c = 20 %	26.7.2000	21.8.2000	Dachziegel	Strasse	Industriezone
Q _{min} [l/s]	20,0	44,0	58,0	-	-	58,0	
T _{oberhalb} [°C]	12,2	12,3	14,7	-	-	18,5	
T _{Luft} [°C]	21,0	21,0	21,0	21,0	25,0	21,0	
Koeffizient «c» [%]	0	20,0	20,0	13,0	10,0	10,0	
BERECHNUNGEN:							
T _{Regenwasser} [°C]	22,0	17,6	17,6	19,1	19,8	22,7	19,6
T _{unterhalb} [°C]	16,6	14,6	13,7	15,7	19,8	22,7	19,6
ΔT [°C]	4,4	2,4	1,4	1,0	-	-	1,1
MESSUNGEN:							
T _{Regenwasser max.} [°C]	20,5	19,8	20,5	20,0	23,2	19,7	
T _{unterhalb max.} [°C]	16,3	15,0	16,3	-	-	19,3	
ΔT [°C]	1,4	1,4	1,0	-	-	1,0	

Tab. 2 Zusammenfassung der Parameter, Berechnungen und Messungen für die Beispiele aus der Schweiz.

rechnung der Temperaturerhöhung in diesem Fließgewässer.

Beispiel 2: *Dachwasser von verschiedenen Arten von Dächern und Strassenwasser (Burgdorf, Kanton Bern)*

Eine Studie zur Temperatur des Dachwassers wurde in Burgdorf durchgeführt (www.regenanalyse.ch) [38]. Acht verschiedene Dachtypen mit einer Fläche von jeweils 25 m²,

wurden untersucht: Ziegeldach, mit verschiedenen Substraten begrünte Dächer, Metaldächer (Kupfer, Zink...). Die Temperatur und der Dachabfluss wurden auf diesen Dachtypen sowohl bei trockenem Wetter als auch bei Regenwetter kontinuierlich gemessen (*Abb. 8*).

Für dieses Beispiel wurden die gemessenen Temperaturen verwendet, um so die maximale Dachwassertemperatur zu ermitteln. Es wurde kein Gewässer berücksich-

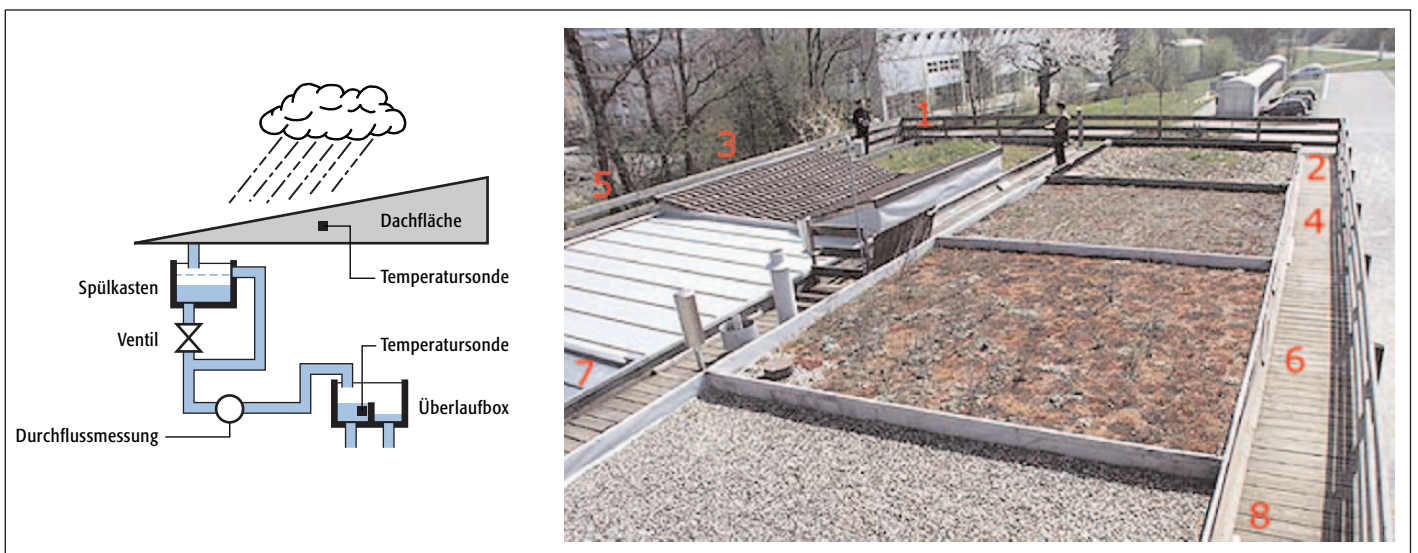


Abb. 8 Eine Abbildung des Messsystems. Rechts: Experimentelle Dachwasseruntersuchungen für verschiedene Dachtypen in Burgdorf (www.regenanalyse.ch). Die Zahlen entsprechen den verschiedenen Dachtypen.

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

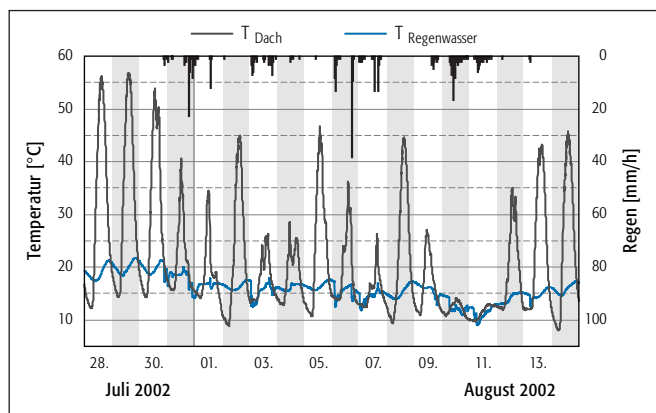


Abb. 9a Temperatur eines Ziegeldaches und des Regenabflusses für den Zeitraum vom 28. Juli bis 14. August 2002.

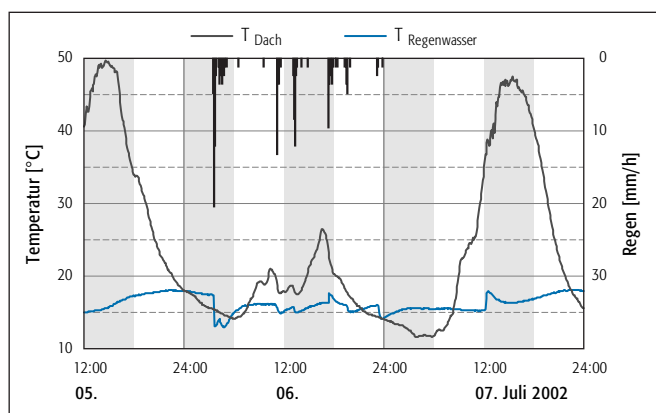


Abb. 9b Darstellung eines Regenereignisses (6. Juli 2002) für ein Ziegeldach.

tigt, sondern nur folgende Frage untersucht:

Wie hoch ist die maximale Temperatur von Dachwasser im Sommer?

Selbst wenn im Sommer bei trockenen Wassertemperaturen von mehr als 55 °C auf einem Ziegeldach erreicht werden, war die Temperatur des Dachwassers niemals höher als 21 °C (Abb. 9a). Ohne Regenereignis entspricht die Temperatur meistens der Lufttemperatur unter dem Dach. In Abbildung 9b wird ein Regenereignis dargestellt, bei dem man festgestellt hat, dass die Temperatur des Daches sehr schnell bei Eintritt eines Regenereignisses abnimmt. Diese Ergebnisse bestätigen die Richtigkeit der vorgeschlagenen Vorgehensweise, bei der die stündliche

Maximaltemperatur des Dachwassers (Regenabwassers) in der Schweiz nicht mehr als 22 °C beträgt. Die Ergebnisse der Berechnung sind ebenfalls in Tabelle 2 dargestellt. Darüber hinaus kann man feststellen, dass diese Vorgehensweise es ermöglicht, die maximale Temperatur auf einfache Weise zu berechnen. Es darf nicht vergessen werden, dass die maximale Regenabflusstemperatur für eine Asphaltoberfläche gilt. Diese Art von Oberfläche speichert mehr Wärme als ein Ziegeldach. Mit einem Abkühlungskoeffizient in der Größenordnung von 10 %, der für diese Art von Oberfläche (Ziegel anstatt Asphalt) zu verwenden ist, stimmt das Modell mit der gemessenen, tatsächlichen Temperatur von 20 °C an dieser Stelle überein.

Im Rahmen derselben Untersuchung [38] wurde auch die Temperatur des Regenabflusses von Strassen untersucht. Der Regenabfluss eines Strassenabschnittes (1500 m²) wurde in einem nahen Schacht gesammelt und in eine Versuchsanlage zur Reinigung gepumpt. Regenabflussmenge und Regenabflusstemperatur wurden kontinuierlich gemessen. Das Ergebnis für ein Regenereignis vom 18. August 2003 ist in Abbildung 10 dargestellt. In diesem Fall war die gemessene Lufttemperatur bei Trockenwetter genauso hoch wie die Temperatur des Schachtwassers vor dem Regenereignis. Unmittelbar nach Beginn des Regens (gegen Mittag), sank die Temperatur auf 22–23 °C.

Unter Berücksichtigung der besonderen Umstände des Sommers 2003 berechnet man die Temperatur des Regenabflusses auf der Basis einer Lufttemperatur von 25 °C und von einem Abkühlungskoeffizienten «c» von 10 % (Tab. 2) (Sammlung des Wassers in einem Schacht). Diese Annahmen ermöglichen es, eine Temperatur des Regenabwassers (22,7 °C) zu berechnen, die der tatsächlich gemessenen Temperatur entspricht (23,2 °C).

Beispiel 3: Einleitung von Regenabfluss aus einem Industriegebiet in ein Fließgewässer (Aire, Kanton Genf)

Im Kanton Genf wurde eine Studie zur Berechnung des Regenabflusses aus einem Industriegebiet durchgeführt [39]. Die Auswirkungen dieses Regenabflusses auf das Fließgewässer «Aire» waren ebenfalls Teil von Untersuchungen. Dafür wurden die Temperaturen oberhalb und unterhalb der Einleitung des Regenabflusses des Industriegebietes von Plan-les-Ouates (ZIPLO, 63 ha) in die Aire mit Hilfe von Multiparametersonden gemessen. Parallel wurde der Regenabfluss in der Kanalisation vor der Einleitung kontinuierlich gemessen. Die Abflussmengenwerte des Gewässers wurden der Datenbank einer Messstation oberhalb der Einleitung entnommen. Für die Berechnung wurden die Daten des Regenereignisses vom 13. und 14. Juli 2002 berücksichtigt (Tab. 2), mit einer Durchflussmenge der Aire von 58 l s⁻¹ vor dem Regenereignis. Ein Ergebnisbeispiel ist in Abbildung 11 dargestellt. Es zeigt die Durchflussmenge oberhalb der Einleitung (Q_{vorfluter}), die Durchflussmenge des Regenabflusses (Q_{regenwasser}) und die Temperatur der Gewässers oberhalb (T_{oberhalb}) resp. unterhalb

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

($T_{\text{unterhalb}}$) der Einleitung. Die Antworten auf die Fragen der vorgeschlagenen Vorgehensweise lauten folgendermassen:

a) Ist die maximale Tagesmitteltemperatur oberhalb der Einleitung im Sommer höher als $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abb. 4)?

In diesem Gewässer befindet sich die Temperatur bei Trockenwetter ausserhalb des optimalen Temperaturbereichs für Forellen in der Schweiz (Abb. 4). Darüber hinaus wird der festgesetzte maximale Grenzwert von $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei Trockenwetter beinahe erreicht, was sich aber nach Abschluss der Wiederbegrünungsmassnahmen für die Fische verbessern wird.

b) Wie hoch sind die Temperaturerhöhungen in einem Gewässer im Zusammenhang mit dem Regenabfluss seines industriellen Einzugsgebietes?

Im vorliegenden Fall kann man kleine Temperaturzunahmen im Gewässer in der Grössenordnung von $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Zusammenhang mit dem Regenabfluss feststellen. Die gemessenen Werte (Temperaturen unterhalb, Temperaturunterschied) können durch die vorgeschlagene Vorgehensweise reproduziert werden unter Berücksichtigung eines Abkühlungsfaktors von 11% (Tab. 2).

5. Allgemeine Bemerkungen

Die Temperatur lässt sich sehr zuverlässig messen, die Abweichungen betragen höchstens $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Über viele Schweizer Gewässer sind zahlreiche Informationen vorhanden, die entweder von den Bundesmessstationen (www.bwg.admin.ch) oder von den kantonalen Stationen stammen.

Tagesmitteltemperaturen von über $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ kommen in grossen Mittellandflüssen vor, die sich nachts nur um $0,5\text{--}1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ abkühlen. Sie gehören nicht zu den Forellengewässern der Schweiz, weil sie ohnehin zu warm sind. In untersuchten kleineren Flüssen mit wenig Wassertiefe kommen auch ab und zu Tagesmitteltemperaturen von über $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ vor. Diese können sich tagsüber stark erwärmen, fallen aber nachts aus demselben Grund ebenso stark um $3\text{--}7\text{ }^{\circ}\text{C}$ wieder zurück in den idealen Temperaturbereich für Forellen und dann können sich die Fische wieder erholen vom Temperaturstress des Tages.

Die Verwendung des minimalen Sommerabflusses Q_{min} bei der Berechnung der Gewässertemperatur (Gl. 2) birgt eine gewisse Sicher-

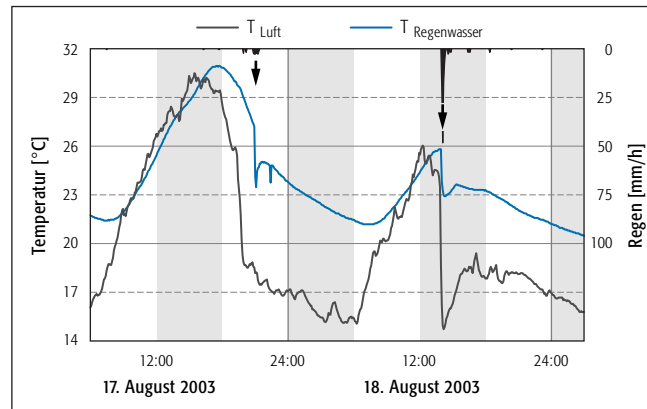


Abb. 10 Lufttemperatur und Temperatur des Regenabflusses von Strassen während eines Regenereignisses am 18. August 2003 (Skala 17. und 18. August).

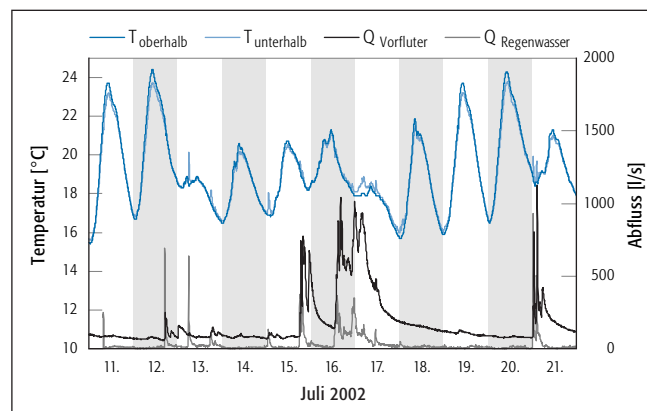


Abb. 11 Temperatur im Fluss Aire ober- und unterhalb der Einleitung des Regenabflusses eines Industriegebietes. Die Durchflussmenge des Regenabflusses sowie des Gewässers sind ebenfalls dargestellt (aus [39]).

heit. Dies, weil die «Abflusskonzentration» des Regenabflusses von versiegelten Oberflächen weniger lang andauert als die des natürlichen Einzugsgebietes des Vorfluters. Es ist deswegen vorzuziehen, für die resultierende Temperatur den mittleren Abfluss des Regenereignisses zu verwenden.

Die Ermittlung des Abkühlungskoeffizienten ist zurzeit noch schwierig und könnte mit der Zeit für spezifische versiegelte Flächen bestimmt und tabelliert werden. Angesichts der in diesem Artikel vorgestellten Beispiele scheint ein Wert zwischen 10 und 20% angemessen zu sein. Grossflächige Einzugsgebiete mit längeren Kanalisationswegen können mit einem höheren Koeffizienten besser beschrieben werden.

Ein wichtiger Prozess, der in der beschriebenen Vorgehensweise nicht berücksichtigt wurde, ist der synergetische Aspekt der verschiedenen Prozesse bei Regenwetter. Tatsächlich sind die Auswirkungen einer Temperaturerhöhung, so minimal sie auch sein mögen, mit einem grossen Einfluss von organischen Substanzen verbunden und viele andere umweltschädliche Stoffe können hier aufeinandertreffen [10]. Darüber hinaus können mehrere aufeinanderfolgende Stresssituationen schädlich für lebende Organismen sein, wenn sie so häufig auftreten, dass diese Organismen sich zwischendurch nicht mehr erholen können.

Eine Studie über die Temperaturen der Gewässer in der Schweiz wurde

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

von 1978 bis 2002 im Rahmen des Projekts FISCHNETZ [40] durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine allgemeine Erhöhung der Temperatur in der Grössenordnung von 0,4 bis 1,6 °C in den Schweizer Gewässern [8]. Die zunehmende Versiegelung der Einzugsgebiete sowie die Auswirkungen des städtischen Regenabflusses könnten zu der Erhöhung der Durchschnittstemperatur beigetragen haben [35].

Die Gesamtheit der Grenzwerte basiert auf Fischen als Indikatoren. Andere Arten, wie z. B. die Wirbellosen leiden ebenfalls unter Temperaturschwankungen. Fische haben allerdings den Reflex vor Stressfaktoren wie z. B. Temperaturänderungen zu fliehen, was für die Wirbellosen, so gut wie unmöglich ist (Drift). Die Auswirkung der Temperatur auf die Wirbellosen war ebenfalls Objekt einer Studie [41]. Eine schnelle Erhöhung der Temperatur (Erhöhung von 12 °C Ausgangstemperatur auf 20 °C in 5–10 Min.) hat gezeigt, dass die Wirbellosen ihr Verhalten in den ersten zehn Minuten nicht veränderten. Danach begannen sie aktiver zu werden, aber es gab keine sichtbaren bleibenden Veränderungen, wenn die Ausgangssituation wiederhergestellt wurde.

Im Allgemeinen kann man eine Abkühlung der Temperatur bei Regen- oder Schneereignissen in Mischsystemen im Winter verzeichnen. Unter bestimmten Umständen können Regenüberläufe allerdings auch im Winter zu einer Temperaturerhöhung in einem Gewässer führen. Solch eine Situation muss von Fall zu Fall untersucht werden.

Die Entsorgung von Schnee in Bäche soll unterlassen werden, da nebst einer Veränderung des Temperaturregimes auch Schadstoffe mit dem Schnee in die Gewässer gelangen können.

In Fällen, wo die Temperaturen problematisch sind, stehen dem Ingenieur verschiedene Optionen zur Auswahl [35]. Was das Einzugsgebiet betrifft, so ist es möglich, die Beschattung der versiegelten Oberflächen zu erhöhen, z. B. durch mehr Vegetation. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Materialien, die die Wärme nicht speichern (auf Beton wird eine niedrigere Temperatur erreicht als auf Asphalt bei gleichen Bedingungen), oder der Abfluss kann begrenzt werden durch Versickerungsanlagen.

In diesem Dokument wird nicht auf die Frage eingegangen, inwiefern die Versickerung von Regenabfluss zu einer Temperaturerhöhung des Grundwassers führt.

6. Zusammenfassung

Die Temperatur ist einer der wichtigsten Faktoren für die Schweizer Gewässer. Für den Erhalt der Faunavielfalt ist es wichtig, die bestmöglichen optimalen Temperaturbedingungen zu erhalten. Wegen der zunehmenden Versiegelung der Ballungsräume müssen heute Probleme betrachtet werden, die sich vorher nicht gestellt haben. So verhält es sich auch mit der Temperatur des Regenabflusses, die Thema dieses Artikels ist.

Spezifische Temperaturanforderungen für Regenwetter wurden definiert und eine Vorgehensweise entwickelt, die ermöglicht, auf einfache Weise die Situation in einem Gewässer mit einer Regenwassereinleitung zu prüfen. Diese Vorgehensweise wurde anhand von verschiedenen Beispielen in der Schweiz auf Brauchbarkeit getestet. Sie ist sehr einfach anzuwenden und benötigt keinerlei komplexe thermodynamische Berechnungen. Es scheint, dass die durch Regenabwasser verursachten Temperaturänderungen

in Schweizer Gewässern im Allgemeinen zu gering sind, um sich schädlich auf die Fauna auszuwirken. Die Untersuchungen zeigen, dass nur Gewässer mit einer maximalen Tagesmitteltemperatur von höchstens 22 °C im Sommer (Vorentscheid) und höchstens 12 °C im Winter (*Kriterium T3*) überhaupt als Lebensraum von Forellen gelten können, dass die maximale Temperatur von 25 °C (*Kriterium T1*) für den Regenabfluss in unseren Breitengraden so gut wie nie erreicht wird und dass eine plötzliche Temperaturerhöhung in der Grössenordnung von 5 bis 7 °C (*Kriterium T2*) nur in Spezialfällen zu einem Problem werden kann, z. B. in relativ kalten Gewässern, die durch Quellen oder Grundwasser gespeist werden. Die Problematik von Temperaturveränderungen im Gewässer bei Regenwetter, die wir im Rahmen von Projekt «STORM» untersucht haben, kann mit der vorgeschlagenen Vorgehensweise gut kontrolliert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Cairns, J., Buikema Jr., A.L., Heath, A.G., Parker, B.C. (1978): Effects of temperature on aquatic organism sensitivity to selected chemicals, Va. Water Resour. Res. Ctr. Bull. 106, p. 9–70.
- [2] Green, D.W.J., Williams, K.A., Hughes, D.R.L., Shaik, G.A.R., Pascoe, D. (1988): Toxicity of phenol to *Asellus aquaticus* (L.): effects of temperature and episodic exposure, Water Res. 22, p. 225–231.
- [3] Garnacho, E., Peck, L.S., Tyler, P.A. (2000): Variations between winter and summer in the toxicity of copper to a population of the Mysid *Praunus flexuosus*, Mar. Biol. (Ger.), 137, 631.
- [4] Leung, K.M.Y., Taylor, A.C., Furness, R.W. (2000): Temperature-dependent physiological responses of the Dogwhelk *Nucella lapillus* to cadmium exposure, J. Mar. Biol. Ass. (U.K.), 80, 647.
- [5] Magaud, H., Migeon, B., Morfin, P., Garric, J., Vindimian, E. (1997): Modelling fish mortality due to urban storm run-off: interacting effects of hypoxia and un-ionized ammonia, Wat. Res. Vol. 31, No 2, p. 211–218.
- [6] Whitelaw, K., Solbé, J.F. (1989): River catchment management: an approach to the derivation of quality standards for farm pollution and storm sewage discharges, Wat. Sci. and Techn. 21, p. 1065–1076.
- [7] Krejci, V., Kreikenbaum, S. (2004): Akute Ammoniak- und hydraulische Beeinträchtigungen, gwa Nr. 9, p. 671–679.
- [8] Hari, R., Güttinger, H. (2004): Temperaturverlauf in Schweizer Flüssen 1978–2002. Auswertungen und grafische Abbildungen fischrelevanter Parameter, Fischnetzpublikation. Projekt «Netzwerk Fischrückgang Schweiz», Teilprojekt-Nr. 01/08, EAWAG, Switzerland, 96 pp.
- [9] Karr, J.R., Schlosser, I.J. (1977): Impact of nearstream vegetation and stream morphology on water quality and stream biota, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 600/3–77/097.
- [10] Elliott, J.M. (2000): Pools as refugia for Brown Trout during two summer droughts: trout responses to thermal and oxygen stress, Journal of fish biology 56, p. 938–948.
- [11] Burton, G.A., Pitt, R.E. (2002): Stormwater effects Handbook, A toolbox for Watershed Managers, Scientists, and Engineers, Lewis Publishers.
- [12] Diaz, F., Bückle, L.F. (1999): Effect of the critical thermal maximum on the preferred temperatures of *Ictalurus punctatus* exposed to constant and fluctuating temperatures Journal of Thermal Biology 24, p. 155–160.
- [13] Beitinger, T.L., Wayne, A.B., McCauley, R.W. (2000): Temperature tolerances of North American freshwater fishes exposed

Projekt «STORM»: Abwassereinleitungen aus Kanalisationen bei Regenwetter

- to dynamic changes in temperature, *Environmental Biology of Fishes* 58, p. 237–275.
- [14] Küttel, S., Peter, A., Wüest, A. (2002): Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fließgewässer, Rhône Revitalisierung Project, Publikation Nr. 1, www.rhone-thur.eawag.ch.
- [15] Oliver, G.G., Fidler, L.E. (2001): Towards a water quality guideline for temperature in the province of British Columbia, Ministry of Environment, Lands and Parks, British Columbia, Canada.
- [16] Elliott, J.M. (1981): Some aspects of thermal stress on freshwater teleosts. In *Stress and Fish* (A. D. Pickering, ed), London, Academic Press, p. 209–245.
- [17] Rossi, L., Krejci, V., Kreikenbaum, S. (2004). Anforderungen an die Abwassereinleitungen, gwa Nr. 6, p. 431–438.
- [18] Brungs, W.S., Jones, B.R. (1977): Temperature criteria for freshwater fish: protocols and procedure, US-EPA, Environ. Research lab, Ecological Resources Service, Office of Research and Development, Duluth, MN.
- [19] Armour, C.L. (1991): Guidance for evaluating and recommending temperature regimes to protect fish, Washington DC, US department of the Interior, Fish and Wildlife Service 13.
- [20] US-EPA (1972): Water criteria 1972. A report of the Committee on Water Quality Criteria, National Academy of Sciences, Washington D.C.
- [21] Nolan, D.T., Hadderingh, R.H., Spanings, F.A.T., Jenner, H.A., Wendelaar Bonga, S.E. (2000): Acute temperature elevation in tap and Rhine Water affects skin and gill epithelia, hydromineral balance, and Na⁺/K⁺-ATPase activity in Brown Trout (*Salmo trutta*) smolts, *Can. J. Aquat. Sci.* 57, p. 708–718.
- [22] Burkhardt-Holm, P., Schmidt, H., Meier, W. (1997): Heat shock protein (hsp70) in brown trout epidermis after sudden temperature rise, *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, 120, 35–41.
- [23] Schmidt, H., Posthaus, H., Busato, A., Wahli, T., Meier, W., Burkhardt-Holm, P. (1998): Transient increase in chloride cell number and heat shock protein expression (hsp70) in Brown Trout (*Salmo trutta fario*) exposed to a sudden temperature elevation, *Biol. Chem.* 379, p. 1227–1233.
- [24] Iwama, G.K., Thomas, P.T., Forsyth, R.B., Vijayan, M.M. (1998): Heat shock protein expression in fish, *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 8, p. 35–56.
- [25] Massa, F. (2000) : Sédiments, physico-chimie du compartiment interstitiel et développement embryon-larvaire de la truite commune (*Salmo trutta*): Étude en milieu naturel anthropisé et en conditions contrôlées, Institut National Agronomique, Sciences de l'environnement, Paris, Paris Grignon, 179 pp.
- [26] Jungwirth, M., Winkler, H. (1984): The temperature dependence of embryonic-development of Grayling (*Thymallus thymallus*), Danube Salmon (*Hucho hucho*) Arctic Char (*Salvelinus alpinus*) and Brown Trout (*Salmo trutta fario*), *Aquaculture* 38, p. 315–327.
- [27] Humpesch, U.H. (1985): Inter-specific and intra-specific variation in hatching success and embryonic-development of 5 species of salmonids and *Thymallus-thymallus*, *Archiv für Hydrobiologie* 104, p. 129–144.
- [28] McCullough, D.A. (1999): A review and synthesis of effects of alterations to the water temperature regime on freshwater life stages of Chinook Salmon, with special reference to Chinook Salmon, US Environmental Protection Agency (EPA 910-R-99-010), Seattle Washington.
- [29] Weatherbe, D.G. (1994): A simplified stream temperature model for evaluating urban drainage inputs. Stormwater and Water Quality Management Modelling Conference, p. 259–274, Reference n° S2516.
- [30] Verspagen, B. (1995): Experimental investigation of thermal enrichment of storm water runoff from two paving surfaces, M.Sc. Thesis Univ. Guelph, 163.
- [31] James, W., Verspagen, B. (1997): Thermal enrichment of stormwater by urban pavement. *Advances in Modeling the management of Stormwater impacts*, Vol. 5, Chap. 8, p. 155–177.
- [32] Van Buren, M.A. (1999): Thermal enhancement of urban receiving waters, Department of Civil Engineering, Kingston, Ontario, Canada, Queen's University, 199.
- [33] Haq ul, R., James, W. (2002): Thermal enrichment of stream temperature by urban storm water, Conference Proceedings, 9th ICUD, Portland, OR.
- [34] Arrington, K.E. (2003): Tools to support the protection of cold water streams from the thermal impact of development in Dane County, Wisconsin, M.S. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 279.
- [35] LeBlanc, R.T., Brown, R.D., FitzGibbon, J.E. (1997): Modelling the effects of land use change on the water temperature in unregulated urban streams, *Journal of Environment Management* 49, p. 445–469.
- [36] Bodmer, K. (2000): Thermische Auswirkungen von Dachwassereinleitungen in kleine Oberflächengewässer, Versuch am Erzbach in Erlinsbach, Aarau, Kanton Aargau, Abteilung Wald und Abteilung für Umwelt, 5 + Anhang.
- [37] Bodmer, K. (2001): Thermische Auswirkungen von Dachwassereinleitungen in kleine Oberflächengewässer, Versuch am Erzbach in Erlinsbach, Versuchswiederholung 2000, Aarau, Kanton Aargau, Abteilung Wald und Abteilung für Umwelt, 5 + Anhang.
- [38] Boller, M., Kaufmann, P., Ochsenbein, U., Langbein, S., Steiner, M. (Ende 2004): Schlussberichte der Forschungsprojekte 1) «Wasser- und Materialflüsse bei der Entwässerung von Metall-, Ziegel-, Kies- und Gründächern» und 2) «Schadstoffe im Strassenabwasser einer stark befahrenen Strasse und deren Retention mit neuartigen Filterpaketen aus Geotextil und Adsorbentmaterial», EAWAG, Dübendorf, in Vorbereitung.
- [39] Davoli, F., Pasteris, G., Schweizer, J., Cordonnier, A. (2003): Impact pollitif global des eaux de ruissellement de certaines zones industrielles de Genève sur leur milieu récepteur et conséquences sur les modes de dépollution, Lausanne, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 133 + annexes.
- [40] Projektleitung Fischnetz (2004): Dem Fischrückgang auf der Spur. Schlussbericht des Projektes Fischnetz «Netzwerk Fischrückgang Schweiz», EAWAG, Schweiz, 138 pp. + Anhang und CD.
- [41] Gammeter, S. (1996): Einflüsse der Siedlungs-entwässerung auf die Invertebraten-Zünose kleiner Fließgewässer, Naturwissenschaften, Zürich, ETH Zürich, 157.

Keywords

Temperatur – Temperaturänderungen – Bachforellen – Regenabfluss – versiegelte Flächen

Adresse der Autoren

Luca Rossi
Tel. +41 (0)1 823 53 78
luca.rossi@eawag.ch

Renata Hari
Tel. +41 (0)1 823 55 16
renata.hari@eawag.ch

EAWAG, CH-8600 Dübendorf
Fax +41 (0)1 823 53 89