



EAWAG

Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung,
Abwasserreinigung und Gewässerschutz
6047 Kastanienbaum

**Martin Frey, Martin Schmid
und Alfred Wüest**
November 2003

Einfluss von Aufweitungen auf das Temperaturregime der Thur

Inhalt

1. Einführung	5
1.1. Fragestellung	5
1.2. Rhône-Thur Projekt.....	6
2. Methoden.....	7
2.1. Temperaturregime eines Flusses	7
2.2. Modellierung	8
2.3. Flussaufweitungen	9
2.4. Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten	9
3. Temperaturmessreihen	11
3.1. Datenerhebung 2002	11
3.2. Messungen in der Thur	12
3.3. Auswirkungen der seitlichen Zuflüsse.....	16
3.4. Zuflüsse von Abwasserreinigungsanlagen	19
4. Temperaturmessungen im Querprofil.....	22
4.1. Wassertemperaturvariationen über das Querprofil	22
4.2. Aufweitungen	22
4.3. Messresultate.....	23
5. Modellrechnungen	27
5.1. Modell der Thur.....	27
5.2. Verwendete Eingabedaten.....	27
5.3. Eichung des Modells.....	28
5.4. Auswirkungen der Aufweitungen	30
6. Zusammenfassung	34
Quellenangaben	36

Dank

Wir bedanken uns bei Heinz Ehmman und Romeo Favero vom Amt für Umwelt des Kantons Thurgau für die bereitgestellten Daten der Thur, bei Niklas Joos für das Bereitstellen seiner Temperaturmessungen, beim Bundesamt für Wasser und Geologie für die zur Verfügung gestellten Abflussdaten und bei der MeteoSchweiz für den Zugang zu den Meteodaten. Heinz Ehmman, Armin Peter und Werner Meier gaben wertvolle Rückmeldungen zum Entwurf dieses Berichts.

1. Einführung

Um Land zu gewinnen und die Thurebene vor Überschwemmungen zu schützen, wurde im 19. Jahrhundert eine tief greifende Korrektur am Mittel- und Unterlauf der Thur durchgeführt. Der Fluss wurde abgesenkt und erhielt ein begradigtes Flussbett. Durch den monotonen Flussverlauf hat die Thur in der Folge ihre ökologische Vielfalt und landschaftliche Eigenart weitgehend verloren.

Mehrere Hochwasserereignisse im 20. Jahrhundert (1910, 1965, 1966, 1974, 1977, 1978 und 1999) mit Dambrüchen und zum Teil grossen Überschwemmungen haben gezeigt, dass der Hochwasserschutz an der Thur Lücken aufweist. Nach dem Ereignis von 1978 wurde in den Kantonen Thurgau und Zürich mit Planungen für eine weitere Thurkorrektur begonnen. Seit 1987 sind im Kanton Zürich, seit 1993 im Kanton Thurgau, Bauarbeiten zur Verbesserung des Hochwasserschutzes im Gange.

Die kantonalen Behörden wollen in diesen Projekten den Hochwasserschutz möglichst ökologisch verträglich gestalten. Gemäss den modernen Hochwasserschutz-Konzepten werden dazu die Dämme verstärkt, gleichzeitig aber auch Überflutungs- und Rückhaltezone geschaffen, womit eine Revitalisierung angestrebt wird.

Als eine geeignete Revitalisierungsmassnahme gelten Flussaufweitungen. Durch die Gerinneaufweitungen wird das Abflussprofil des Flusses vergrössert, was die Abflusskapazität bei einem Hochwasserereignis erhöht. Zudem ermöglicht das breitere Flussbett eine grössere Diversität aquatischer Lebensräume, wodurch die Flusslandschaft ökologisch aufgewertet wird.

Ein Teil der Korrekturbauarbeiten ist inzwischen bereits abgeschlossen, die Thur wurde an mehreren Stellen aufgeweitet. Von verschiedenen Seiten wurde jedoch die Befürchtung geäussert, dass sich das Temperaturregime der Thur durch die bereits gebauten und die weiteren geplanten Aufweitungen so stark verändern könnte, dass negative Auswirkungen auf die Fischpopulation möglich wären. Insbesondere wurde auf die Gefahr von zu hohen Wassertemperaturen in den Sommermonaten hingewiesen.

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag des Kantons Thurgau an der EAWAG durchgeführt, mit dem Ziel die Auswirkungen von Ausweitungen auf das Temperaturregime der Thur im Sommer zu analysieren und zu bewerten.

1.1. Fragestellung

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Aufweitungen auf das Temperaturregime mit Hilfe eines Computermodells analysiert, um die Frage beantworten zu können, ob durch die Aufweitungen ein erhöhtes Risiko besteht, dass für die Fischbestände kritische Wassertemperaturen auftreten werden. Bei der Modellierung wird der 52 km lange Flussabschnitt zwischen Halden und Alten (Abb. 2) berücksichtigt.

Um die durch die Aufweitungen bedingten Temperaturänderungen zu bewerten, werden sie in Relation zur natürlich beobachteten Temperaturvariabilität und zu den Auswirkungen anderer anthropogener Einflüsse, insbesondere der Kläranlagen, gesetzt.

Der vorliegende Bericht ist folgendermassen aufgebaut: In Kapitel 2 werden die Grundlagen des Temperaturregimes erläutert, und es wird gezeigt, wie sich darauf ein Computermodell aufbauen lässt. Ausserdem werden die Temperaturpräferenzen der wichtigsten in der Thur lebenden Fischarten zusammengefasst. In Kapitel 3 werden die im Rahmen dieser Arbeit in der Thur und in den wichtigsten Zuflüssen, inklusive Kläranlagen, im Sommer 2002 durchgeführten Temperaturmessungen ausgewertet und analysiert. Auf die im Sommer 2003 punktuell gemessenen Temperaturquerprofile wird in Kapitel 4 eingegangen. In Kapitel 5 werden mit dem Computermodell die durch die Aufweitungen verursachten Temperaturänderungen abgeschätzt. Schliesslich werden die Resultate im Kapitel 6 zusammengefasst.

1.2. Rhône-Thur Projekt

Diese Arbeit ist eine Ergänzung zum transdisziplinären Rhône-Thur Projekt der EAWAG und WSL, das Konzepte und Werkzeuge für eine nachhaltige Flussentwicklung zur Verfügung stellen wird. Detaillierte Informationen zum Rhône-Thur-Projekt sind auf der Website des Projektes zu finden (<http://www.rhone-thur.eawag.ch>).

2. Methoden

2.1. Temperaturregime eines Flusses

Die Wassertemperatur hat einen grossen Einfluss auf die Wasserqualität und die aquatische Biota (Flora und Fauna) von Flüssen und Bächen. Sie beeinflusst den Stoffwechsel, die Atmung und die Toleranz von Tieren und Pflanzen gegenüber Parasiten, bestimmt physikalische und chemische Eigenschaften des Wassers wie Dampfdruck, Oberflächenspannung, Dichte, Viskosität, Diffusivität, Löslichkeit von Gasen (z.B. Sauerstoff) und die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen.

Ungünstige Temperaturverhältnisse haben vielfältige negative Auswirkungen auf die aquatische Biota. Im Zusammenhang mit der Temperatur sind vor allem die Auswirkungen erhöhter Temperaturen auf die Fische von Interesse. Hohe Wassertemperaturen führen zu gesteigerter Aktivität der Fische, ab einer gewissen Temperatur arbeitet der Stoffwechsel so schnell, dass die Fische nicht mehr genügend Nahrung finden können. Bei noch höheren Temperaturen versagt als erstes die Schwimmmuskulatur, gefolgt von Atmungsapparat und dem Herz (Küttel et al., 2002).

Die Wassertemperatur in Fliessgewässern wird durch Austauschprozesse mit der Umgebung (kurzwellige Einstrahlung, Austausch mit der Atmosphäre und dem Sediment) beeinflusst. Das Gewässer nimmt auf der einen Seite Wärme auf, gibt diese aber auch wieder an die Umgebung ab. In der Schweiz nimmt die Wassertemperatur im Sommer von der Quelle flussabwärts meistens zu (Ausnahme heisse Quellen). Im Winter kann es je nach klimatischen Bedingungen und Flussgeometrie im Flussverlauf zu Temperaturabnahmen kommen.

Die wichtigsten natürlichen Energieflüsse, welche die Wassertemperatur in Fliessgewässern beeinflussen sind die kurzwellige Sonneneinstrahlung, die langwellige Ein- und Ausstrahlung, der Wärmeaustausch mit dem Sediment, Verdunstung/Kondensation, Wärmeleitung (Konvektion) und die Erwärmung durch die Reibung. Alle diese Prozesse werden im Temperaturmodell berücksichtigt.

Einen geringen Einfluss auf die Wassertemperatur haben auch Niederschlagsereignisse. Die Daten zur genauen Bestimmung des Energiebeitrags durch Niederschläge sind jedoch meistens nicht vorhanden. Wenn in der untersuchten Periode keine grösseren Niederschlagsereignisse stattfinden, kann dieser Prozess vernachlässigt werden. Denkbar ist auch, dass chemische und biologische Prozesse zu einer gewissen Erwärmung des Wassers führen. Die Abwärme bei Reaktionen ist jedoch um Grössenordnungen kleiner als zum Beispiel die Einstrahlung, so dass diese Prozesse nicht berücksichtigt werden.

Die berücksichtigten Prozesse sind in der Abbildung 1 schematisch dargestellt. Genaue mathematische Beschreibungen der Prozesse sind in den Arbeiten von Meier (Meier, 2002) oder Frey (Frey, 2003) zu finden.

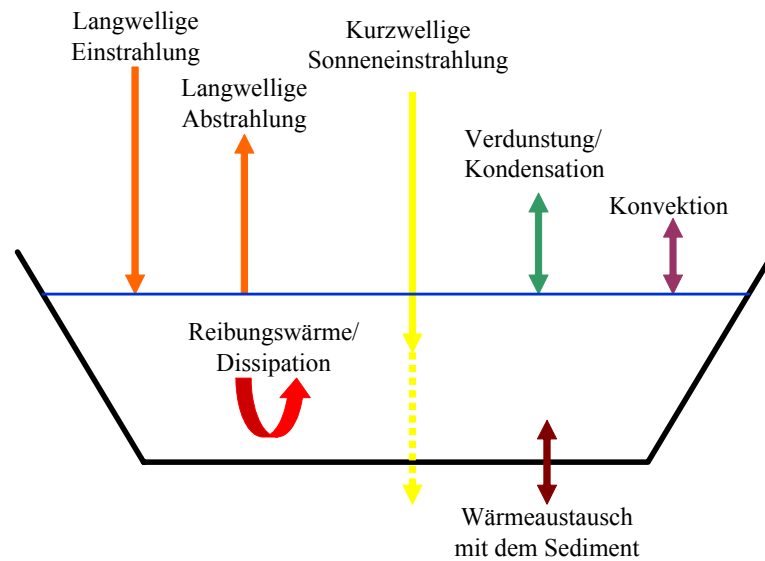


Abbildung 1: Energieflüsse, welche den Wärmehaushalt in Flüssen beeinflussen.

Die Energieaustauschprozesse zwischen dem Wasser und der Umgebung finden über die Wasseroberfläche, respektive das Gewässerbett (Wärmeaustausch mit dem Sediment) statt. Einzig die Reibungswärme wird ausschliesslich vom Gefälle bestimmt. Die Grösse der Wasseroberfläche spielt für die Energieaustauschprozesse eine wichtige Rolle. Vergrössert sich die Wasseroberfläche zum Beispiel durch eine Aufweitung, so nimmt der Fluss mehr Energie über die Atmosphäre auf, respektive gibt bei entsprechenden meteorologischen Bedingungen mehr Energie ab. Der Energieaustausch des Wassers mit dem Sediment ist über längere Zeit betrachtet meist nahezu ausgeglichen (Wärmeaufnahme in der Nacht und im Winter, Wärmeabgabe während dem Tag und im Sommer).

Wie stark sich die Energieflüsse auf die Temperatur des Flusses auswirken, hängt vom Abfluss ab. Bei steigendem Abfluss nimmt die Wasseroberfläche proportional weniger zu als das Volumen, der Energieaustausch steigt also weniger stark an als die zu erwärmende Wassermenge. Bei hohem Abfluss passt sich deshalb die Wassertemperatur weniger schnell an veränderte Wärmeflüsse an, und die Temperaturen sind ausgeglichener als bei niedrigem Abfluss.

Neben den natürlichen Prozessen gilt es auch künstliche Einflüsse auf die Wassertemperatur wie Wasserentnahmen, Kläranlagen, Kühlwassereinleitungen usw. zu berücksichtigen.

2.2. Modellierung

Um den Wärmehaushalt der Thur nachzubilden, wird zuerst ein hydraulisches Modell des Flusses erstellt, um damit die Abflussbedingungen in der Thur zu simulieren. Das hydraulische Modell berechnet dabei aus den gegebenen Randbedingungen (Gerinnegeometrie, Reibungs- und Dispersionskoeffizienten und Zuflüsse) den Abfluss, die Fliessgeschwindigkeit und den benetzten Querschnitt des Flusses. Danach werden die Energieflüsse in dieses Modell implementiert.

Die Modellrechnungen werden mit dem Computerprogramm AQUASIM 2.1 durchgeführt. Mit diesem Modell werden die Flusseigenschaften eindimensional über den Querschnitt des Flusses gemittelt. Dieses eindimensionale Modell eignet sich, um Austauschprozesse über längere Strecken zu simulieren. Aussagen zur Temperaturverteilung über den Längsverlauf, nicht aber über den Querschnitt, sind damit möglich.

2.3. Flussaufweitungen

Der Verlust an naturnahen Flüssen, Hochwasserprobleme und Flusssohlenerosion in begräbten Flussabschnitten führten zu Forderungen nach Revitalisierungen von Flüssen. Größere Revitalisierungsprojekte sind ohne erhebliche Eingriffe in das jeweilige, oft intensiv genutzte Umland jedoch nicht zu verwirklichen. Eine Flussaufweitung ist eine Massnahme, die wenigstens punktuell eine gewisse Auflockerung in der Flussstruktur ergibt. Bei Flussaufweitungen handelt es sich um eine, mit flussbaulichen Mitteln realisierte, Verbreiterung über eine kurze Flussstrecke. In diesen erweiterten Abschnitten können verzweigte Flussarme und Kiesbänke entstehen (Hunzinger, 1998), welche die Diversität der aquatischen Lebensräume erhöhen und bei Hochwasser als Pufferräume wirken.

2.4. Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten

Die Wassertemperatur bestimmt als wichtiger Milieufaktor biologische, physikalische und geochemische Prozesse und wirkt dadurch direkt und indirekt auch auf die Existenzgrundlage der Fische. Temperaturveränderungen in einem Fluss können zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung führen und gewisse Fische ganz aus dem Flussgebiet verdrängen. Fischarten können sich an gewisse Temperaturveränderungen anpassen, diesen Anpassungen sind aber physiologische und genetische Grenzen gesetzt.

Um die Situation in der Thur zu bewerten, muss man die Temperaturpräferenzen und -limiten der in der Thur lebenden Fischarten kennen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Auswirkungen der Temperatur auf eine Fischart auch von ihren Lebensstadien abhängig sind. In einer Literaturarbeit haben Küttel et al. (2002) die Präferenzen und Limiten der in den Schweizer Gewässern vorkommenden Arten zusammengetragen. Die Ergebnisse für die wichtigsten in der Thur lebenden Arten (Rey und Ortlepp, 1998) sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Ein allgemeines Temperaturmaximum für alle Fische gibt es nicht. Die Temperaturlimiten sind abhängig von der Fischart und dem Entwicklungsstadium. Nicht alle Fische reagieren gleich auf Extremtemperaturen. Bei den Entwicklungsstadien ist zu beachten, dass vor allem die Fortpflanzung nur in einem engen Temperaturbereich stattfindet.

Tabelle 1: Temperaturpräferenzen der in der Thur vorkommenden Fische, welche in der Arbeit von Küttel et al. (2002) analysiert wurden.

	Eier				Juvenile				Adulte				Fortpflanzung			
	Maximum	Oberes Optimum	Unteres Optimum	Minimum	Maximum	Oberes Optimum	Unteres Optimum	Minimum	Maximum	Oberes Optimum	Unteres Optimum	Minimum	Maximum	Oberes Optimum	Unteres Optimum	Minimum
Aal (<i>Anguilla anguilla</i>)							15		39	30	8	0		8	8	
Äsche (<i>Thymallus thymallus</i>)	16	14	7	0					26	18	4	0	15	10	6	4
Alet (<i>Leuciscus cephalus</i>)	30	24	16	16					39	25	8	8	18	18	13	13
Bachforelle (<i>Salmo trutta fario</i>)	14	9	1	0	28	14	7	0	30	19	4	0	13	10	1	1
Barbe (<i>Barbus barbus</i>)	21	21	16	16				14	30				29	20	14	8
Gründling (<i>Gobio gobio</i>)									37	27			17	17	12	12
Hasel (<i>Leuciscus leuciscus</i>)	18	16	6	4									14	14	9	5
Nase (<i>Chondrostoma nasus</i>)	19	17	12	10									16	16	10	7
Rotaue (<i>Rutilus rutilus</i>)	27	20	12	5					38	25	8	0	22	19	5	8
Schneider (<i>Alburnoides bipunctatus</i>)									27	27	18	18	24	24	12	12
Strömer (<i>Leuciscus souffia</i>)													13	13	11	11

3. Temperaturmessreihen

In diesem Kapitel werden die im Sommer 2002 über eine längere Zeit an verschiedenen Stellen in der Thur gemessenen Wassertemperaturen ausgewertet und die Auswirkungen auf das Temperaturregime der Thur erläutert. Eine kurze Zusammenfassung der Erkenntnisse ist am Ende des Kapitels zu finden.

3.1. Datenerhebung 2002

Während des Sommers und Herbsts 2002 (11. Juni bis 27. November) wurde die Wassertemperatur an verschiedenen Stellen in der Thur und in ihren wichtigsten Zuflüssen gemessen. Dazu wurden Temperatursensoren der Firma Vemco in das Wasser eingesetzt, welche in Abständen von 15 oder 20 Minuten die Temperatur messen und aufzeichnen.

In der Thur wurden die Messungen in Halden, Istighofen, Pfyen und Alten (respektive Andelfingen¹) vorgenommen. Als wichtigste Zuflüsse wurden der Giessen, der Furtbach, der Grüneckkanal und die Murg, sowie die Kläranlagen der Städte Weinfelden und Frauenfeld und der Papierfabrik in Weinfelden berücksichtigt. Zusätzlich wurde im Sommer 2003 während einer kurzen Messperiode (23.7 bis 13.8) auch die Wassertemperatur im unteren und oberen Binnenkanal bei Warth und vor Gütighausen gemessen. Abbildung 2 gibt eine Übersicht über die untersuchte Strecke und die Messstandorte.

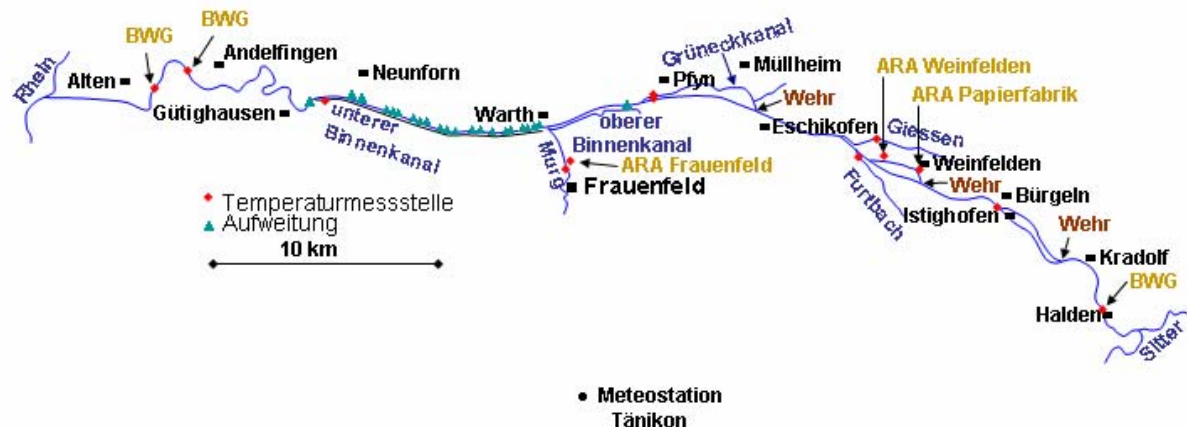


Abbildung 2: Übersichtskarte des untersuchten Thurabschnitts zwischen Halden und Alten (52 km).

¹ Der Temperaturlogger befand sich am Anfang der Messperiode (13. bis 28. Juni) in Andelfingen ca. 3.5 km oberhalb von Alten und wurde erst danach genau bei der Abflussmessung in Alten installiert.

3.2. Messungen in der Thur

Bei der Untersuchung wurde der Thurabschnitt zwischen den BWG Messstationen Halden (456 m ü. M.) und Alten² (351 m ü. M.) analysiert. Die Distanz zwischen den beiden Stationen beträgt ca. 52 km und der Höhenunterschied 105 m, was einem mittleren Gefälle von 0.2 % entspricht.

Die Strecke eignet sich zur Analyse, weil an beiden Enden der Abfluss der Thur gemessen wird. Der mittlere Abfluss am oberen Ende bei der Station Halden betrug im Sommer 2002 (Juni, Juli und August) 45 m³/s. Bis Alten erhöht sich die Wassermenge durch die Zuflüsse auf 51 m³/s. Die Variation des Abflusses ist in der Thur sehr gross, weil es im oberen Flussverlauf keine ausgleichenden Seen gibt. Bei Niederschlägen kann die Thur stark ansteigen. Der grösste Abfluss im Sommer 2002 wurde in Alten am 12. August mit 870 m³/s gemessen. Am kleinsten war der Abfluss am 31. Juli 2002 mit nur rund 12 m³/s. Eine graphische Darstellung des Abflusses in Alten ist in der Abbildung 3 dargestellt.

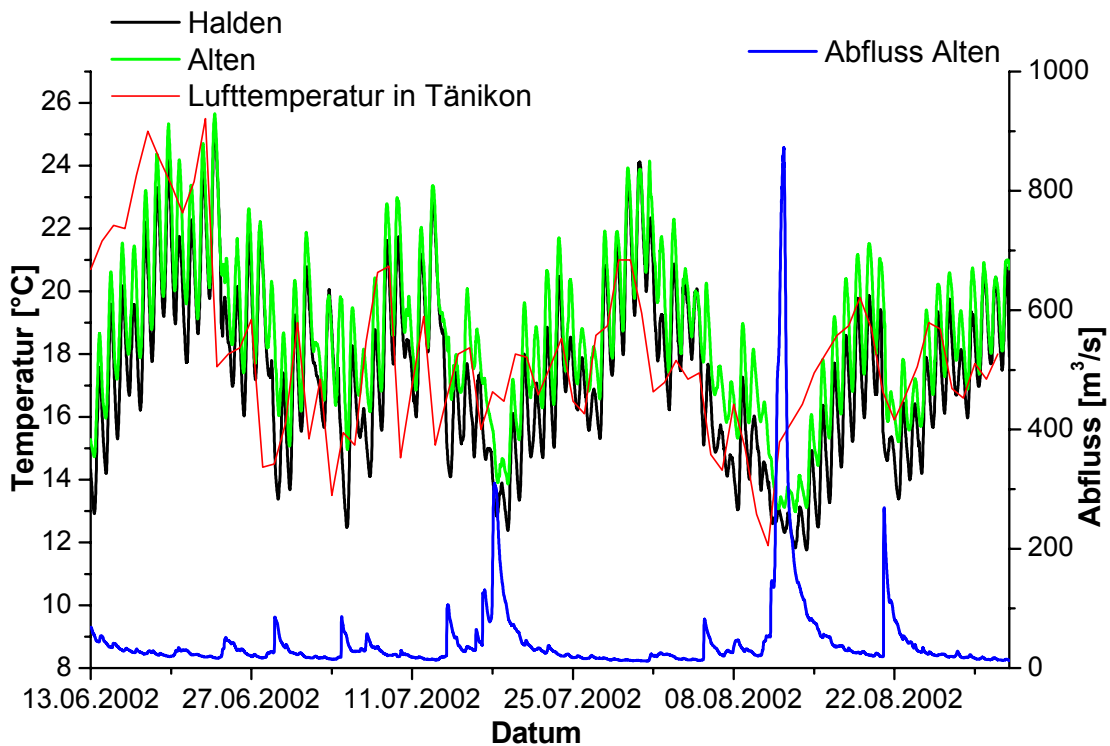


Abbildung 3: Gemessene Temperaturwerte in Halden und Andelfingen (bis 28. Juni 2002) bzw. Alten (ab 28. Juni 2002) und Abfluss in Alten vom 13. Juni bis 31. August 2002.

² Alten ist die Ersatzstation für Andelfingen, die wegen einer Baustelle momentan nicht zur Verfügung steht.

Die Messreihen der Wassertemperaturen am Anfang der Strecke in Halden und am Ende bei Alten³ sind ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt. Beim Vergleich sieht man, dass die Wassertemperaturen an der unterliegenden Station in Alten höher sind als in Halden. Die durchschnittliche Temperatur in Alten während der Messperiode (29. Juni bis 31. August⁴) ist mit 18.1°C im Schnitt 1.3°C höher als in Halden (16.8°C). Das entspricht den Erwartungen, da das Wasser während des Sommers im Verlauf der Fliessstrecke durch die Reibung, die kurzweilige Sonnenstrahlung und die langwellige Wärmeeinstrahlung erwärmt wird.

Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Standorten ist über den Tagesverlauf in etwa konstant. Die tiefsten Werte eines Tages werden am Morgen zwischen 8 und 9 Uhr gemessen, in Halden 15.3°C, in Alten 16.6°C. Das Wasser erwärmt sich dann während des ganzen Tages. Die Tagesmaximalwerte werden an beiden Stellen im Allgemeinen gegen Abend zwischen 18 bis 19 Uhr gemessen. Die Temperaturen der Tagesmaxima betragen im Mittel 18.4°C in Halden und 19.6°C in Alten. Die absolut höchsten Werte wurden am 23.6.2002 in Halden mit 25.2°C und in Alten mit 25.7°C gemessen.

Interessant ist der Zusammenhang zwischen Abfluss und Temperatur. Immer wenn der Abfluss ansteigt, sinken die Wassertemperaturen. Selbst bei einer kleinen Zunahme des Abflusses ist schon ein Absinken der Temperatur zu erkennen. Dieses Phänomen hat verschiedene Ursachen:

Erstens ist eine Zunahme des Abflusses auf Niederschlagsereignisse im Einzugsgebiet der Thur zurückzuführen. Durch die Bewölkung bei Niederschlagsereignissen verkleinert sich die Sonneneinstrahlung und die Lufttemperaturen sinken, wodurch der Wärmeeintrag in die Thur vermindert wird. Dies ist wohl in den meisten Fällen die wichtigste Ursache für die Abkühlung. Zudem ist das Regenwasser in der Regel etwas kälter als das Flusswasser, so dass das Wasser dadurch zusätzlich abgekühlt wird.

Zweitens nimmt die Fliessgeschwindigkeit mit zunehmendem Abfluss zu. Dadurch ist das Wasser weniger lang den atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt und wird weniger erwärmt.

Der dritte Effekt ist die vergrösserte Wassermenge. Durch den grösseren Abfluss nimmt zwar die Flussbreite zu und somit wird die Energieaustauschfläche mit der Umgebung grösser und der Fluss kann insgesamt mehr Energie aufnehmen. Gleichzeitig nimmt aber auch das Volumen zu und der Energieinput wird auf eine grössere Wassermenge verteilt. Da die Volumenausdehnung verhältnismässig viel grösser ist als die Oberflächenausdehnung, nimmt der Energieeintrag pro Wassermenge ab.

Eine wichtige Erkenntnis aus dieser Beobachtung ist, dass zu hohe Wassertemperaturen nur in Perioden mit geringem Abfluss zu erwarten sind. In der Abbildung 4 ist die Periode vom 24. Juli bis 2. August 2002 vergrössert aufgetragen. In dieser Periode wurden in der Thur die kleinsten Abflussmengen des Sommers 2002 gemessen.

³ Bis zum 28. Juni 2002 Temperaturmesswerte von Andelfingen.

⁴ Nur Temperaturmessungen in Alten berücksichtigt.

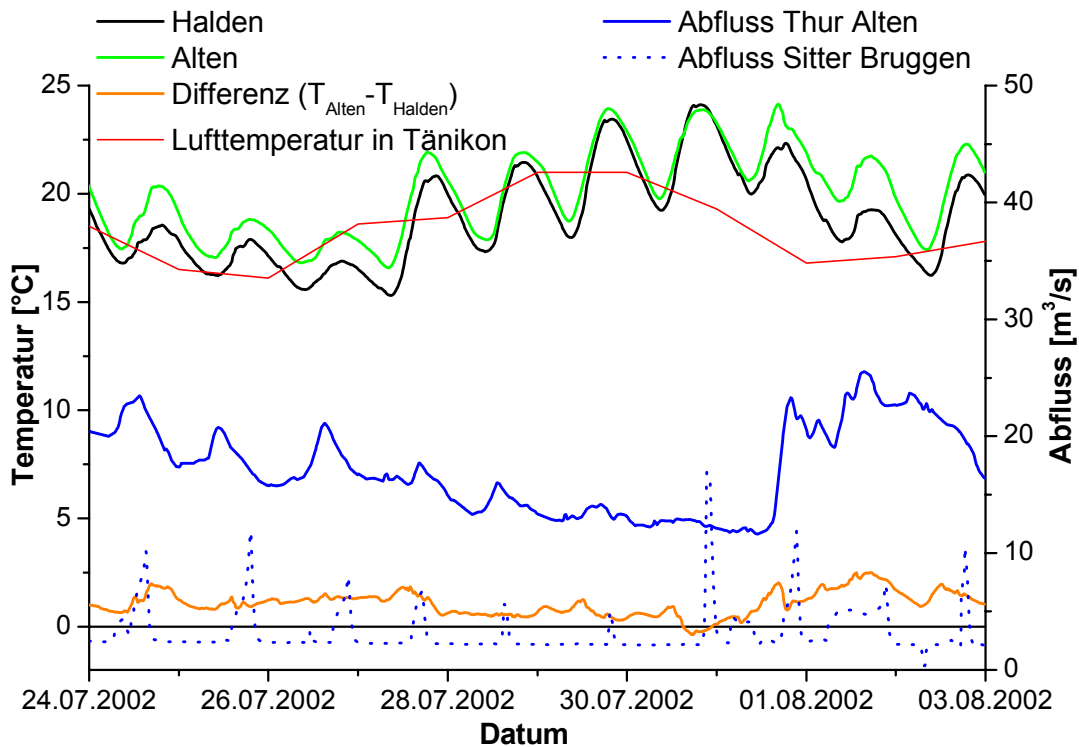


Abbildung 4: Gemessene Wassertemperatur in der Thur bei Halden und bei Alten, Temperaturdifferenz zwischen den beiden Standorten und Abfluss der Thur bei Alten und der Sitter bei Bruggen für die Periode vom 24. Juli bis und mit dem 2. August 2002 und Tagesmittel der Lufttemperatur in Tänikon. In dieser Phase wurde der tiefste Wasserstand für die Thur im Sommer 2002 erfasst.

In dieser verfeinerten Darstellung kann man in den ersten drei Tagen auch einen Tagesgang beim Abfluss erkennen, der sich mit abnehmendem Abfluss immer mehr verflacht. Dieser Tagesgang ist hauptsächlich durch das Kraftwerk Kubel verursacht, welches zeitweise turbiertes Wasser in die Sitter einleitet. Die in der Sitter kurz unterhalb der Kraftwerkseinleitung gemessenen Abflussspitzen erreichen etwa 20 Stunden später die Station in Alten, was einer mittleren Fliessgeschwindigkeit von etwas mehr als 1 m/s auf der rund 80 km langen Fliessstrecke entspricht. Der plötzliche Anstieg der Wassermenge am 31. Juli wurde durch ein Niederschlagsereignis verursacht. Der Abfluss steigt dabei steil an und nimmt nach dem Niederschlag langsam wieder ab. Dabei ist aber zu beachten, dass der Abfluss auch unmittelbar nach diesem Niederschlagsereignis mit ca. 25 m³/s immer noch deutlich unter dem Sommermittel liegt.

Bei den Wassertemperaturen ist eine zeitliche Entwicklung sichtbar. Mit dem Anstieg der Lufttemperatur und dem Absinken des Abflusses steigt das Tagesmittel der Wassertemperatur an. Nach dem Niederschlag sinken die Temperaturen zuerst in Halden, danach in Alten wieder etwas ab.

Grundsätzlich wäre zu erwarten, dass die Temperaturdifferenz zwischen Halden und Alten mit abnehmendem Abfluss zunimmt, da sich der Energieinput bei niedrigem Abfluss auf eine kleinere Wassermenge verteilt. In der erfassten Periode kann eine solche Zunahme jedoch nicht festgestellt werden. Mögliche Gründe dafür sind der Grundwasserzufluss in die Thur, nicht repräsentative Temperaturmessungen und/oder die Gerinnegeometrie:

- Auf der Strecke Halden-Alten wird durch Exfiltration und Binnenkanäle (vergleiche Abschnitt 3.3) Grundwasser in die Thur eingetragen. Die Temperatur des Grundwassers ist im Sommer tiefer als die des Flusswassers, weshalb aus der Exfiltration eine Abkühlung resultiert. Der exfiltrierende Grundwasserfluss ist nicht so starken Schwankungen unterworfen wie der Abfluss in der Thur. Bei kleinem Abfluss in der Thur wird deshalb die abkühlende Wirkung des Grundwassers grösser. Der Zufluss von $1 \text{ m}^3/\text{s}$ Grundwasser mit der Temperaturdifferenz von 10°C führt bei einem Abfluss von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ zu einer Abkühlung von 1°C , bei einem Abfluss von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt die Abkühlung nur 0.2°C .
- Auf Grund der Temperaturmessungen im Querprofil (vergleiche Kapitel 4) kann vor allem bei niedrigem Abfluss nicht garantiert werden, dass die gemessenen Temperaturen für den ganzen Fluss repräsentativ sind. Bei einer Querprofilmessung der Temperatur in Halden im Sommer 2003 bei tiefem Abfluss wurden auch im fließenden Teil des Flusses (ohne Uferbänke) Temperaturvariationen von bis zu 0.5°C gemessen⁵. Dadurch kann die aufgezeichnete Temperatur je nach Messstandort etwas unter oder über der effektiven Durchschnittstemperatur des Flusses liegen. Bei höherem Abfluss ist die Durchmischung über das Querprofil besser, so dass die Temperaturvariationen verschwinden.
- Einen gewissen Effekt hat auch die Flussgeometrie. Dass die Temperaturdifferenz über die betrachtete Strecke bei sehr kleinem Abfluss nicht zunimmt, ist ein Hinweis darauf, dass die Wasseroberfläche trotz den Aufweitungen in Situationen mit kleinem Abfluss abnimmt und somit der Wärmeinput in das Wasser verkleinert wird (siehe auch Abbildung 15). Um den Sachverhalt genauer zu rekonstruieren wird dieser Zeitabschnitt im Kapitel 5 modelliert.

Die gemessenen Amplituden der Tagesgänge der Temperaturen an den Standorten Istighofen und Pfynd sind zeitweise viel grösser als bei den Messungen in Halden respektive Alten. Auch die Maximalwerte sind deutlich höher. Das zeigt, dass sich die Temperatursensoren zeitweise nicht im Wasser befanden und entsprechend falsche Temperaturen aufgezeichnet wurden. Eine eingehende Analyse dieser Daten macht deshalb wenig Sinn. Einzelne Messperioden mit plausiblen Messungen können jedoch zur Eichung des Computermodells verwendet werden.

⁵ Die Ursache kann eine gegenüber der Thur etwas unterschiedliche Wassertemperatur des Zuflusses Sitter etwa 2.5 km oberhalb von Halden sein.

3.3. Auswirkungen der seitlichen Zuflüsse

Um den Einfluss der Zuflüsse der Thur auf dem untersuchten Flussabschnitt zwischen Halden und Alten zu analysieren, wurden während der Messperiode im Sommer 2002 die Wassertemperaturen in den Zuflüssen Giessen, Furtbach, Grüneckkanal und Murg gemessen. Von den Flüssen Murg und Giessen liegen zudem Abflussmessungen vor. Diese Messungen sind in der Abbildung 5 dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung ist in der Abbildung 6 die Periode vom 24. Juli bis 3. August noch einmal vergrössert dargestellt.

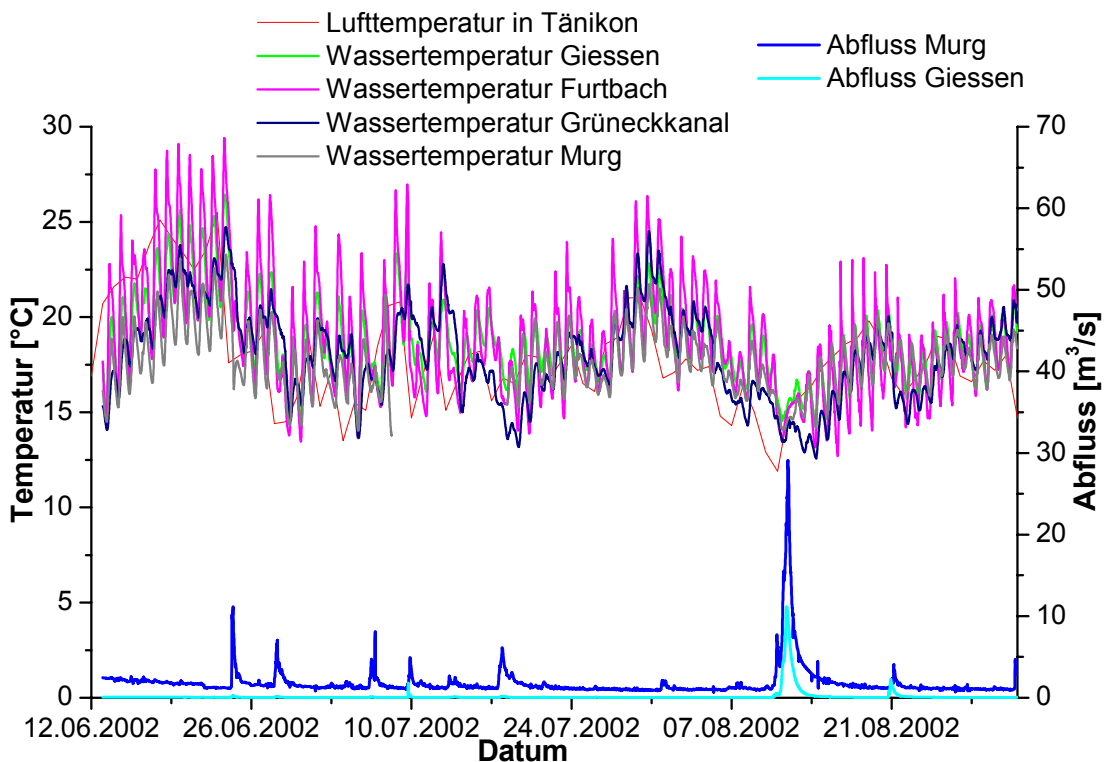


Abbildung 5: Wassertemperaturen ausgewählter Thurzuflüsse im Abschnitt zwischen Halden und Alten während des Sommers 2002. Zusätzlich sind die Abflüsse der beiden Zuflüsse Murg und Giessen und die in Tänikon gemessene Lufttemperatur (Tagesmittel) aufgezeichnet.

Der durchschnittliche gesamte Abfluss der Seitenbäche zwischen Halden und Alten betrug im analysierten Sommer ca. $6 \text{ m}^3/\text{s}$, das entspricht 12% des Abflusses in Alten⁶. Der gewichtigste Zufluss ist dabei die Murg mit einem durchschnittlichen Abfluss von $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ (Maximum $29 \text{ m}^3/\text{s}$). Der Giessen hat im Mittel einen Abfluss von nur $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$, bei einem Hochwasser kann er aber stark ansteigen (über $10 \text{ m}^3/\text{s}$).

⁶ Die effektive Zuflussmenge ist wohl etwas grösser, da ein Teil des Thurwassers ins Grundwasser infiltriert.

Die Temperaturen in den kleineren Zuflüssen Giessen (18.6°C), Furtbach (18.9°C) und dem Grüneckkanal (18°C) sind beim Zufluss in die Thur im Mittel etwas wärmer als die Thur (16.8 bis 18.1°C). Die mittleren Temperaturen der Murg bewegen sich mit 17.7°C etwa im gleichen Bereich wie diejenigen der Thur.

Auch bei den Zuflüssen ist ein Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur und dem Abfluss zu erkennen. Die gemessenen Temperaturen in den Zuflüssen sinken mit zunehmendem Abfluss ebenfalls.

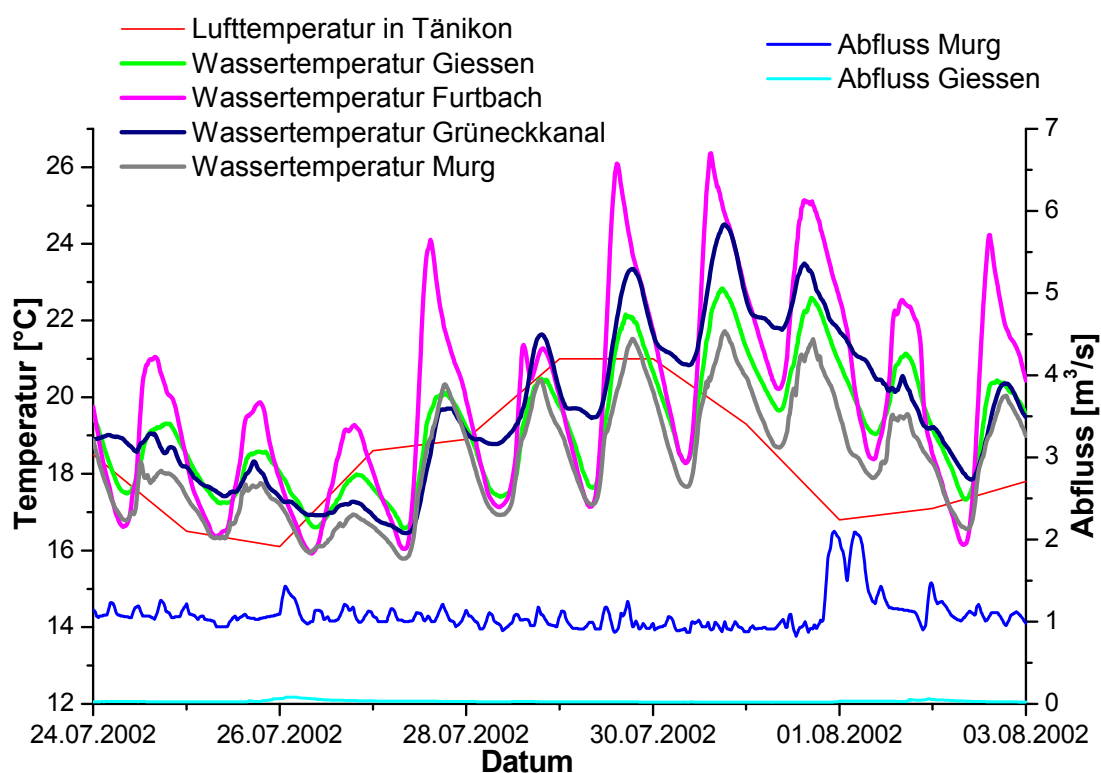


Abbildung 6: Wassertemperatur ausgewählter Thurzuflüsse im Abschnitt zwischen Halden und Alten, die Tagesmittel der Lufttemperatur (gemessen in Tänikon) sowie Abfluss der Murg und des Giessen, während der Periode vom 24. Juli bis 3. August 2002.

Bei der feineren Auflösung erkennt man, dass die täglichen Schwankungen der Zuflüsse sehr unterschiedlich sind. Bei den Flüssen mit kleinem Abfluss ist der Tagesgang viel ausgeprägter als bei den grösseren Flüssen: Der mittlere Unterschied zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum betrug im Furtbach 5.9°C, im Giessen 3.3°C und in der Murg 3°C. Die klimatischen Bedingungen sind in den Einzugsgebieten der Zuflüsse ungefähr gleich, die Pufferwirkung einer kleinen Wassermenge ist jedoch geringer. Am geringsten sind die Tagesschwankungen im Grüneckkanal (1.7°C).

Während den Feldbegehungen im Sommer 03 sind die Binnenkanäle auf der südlichen Seite der Thur ins Blickfeld des Interesses gerückt. Bei den Zuflüssen dieser Kanäle wurden deutlich tiefere Temperaturen als in der Thur selbst gemessen. Um ein besseres Verständnis für

diese Zuflüsse zu erhalten, wurden die Temperaturen während einer Periode vom 24. Juli bis 12. August 03 gemessen und aufgezeichnet. In den Binnenkanälen wird das austretende Grundwasser zusammen mit Oberflächenwasser ausserhalb der Dämme gesammelt und an Stellen, wo der Damm unterbrochen ist, in die Thur geleitet. Gemessen wurden die Wassertemperaturen im unteren Binnenkanal, welcher beim Asperhof vor Gütighausen in die Thur einfließt und im oberen Binnenkanal, welcher parallel zur Murg bei Frauenfeld in die Thur mündet. Die Messungen (Abbildung 7) wurden jeweils kurz vor der Mündung durchgeführt.

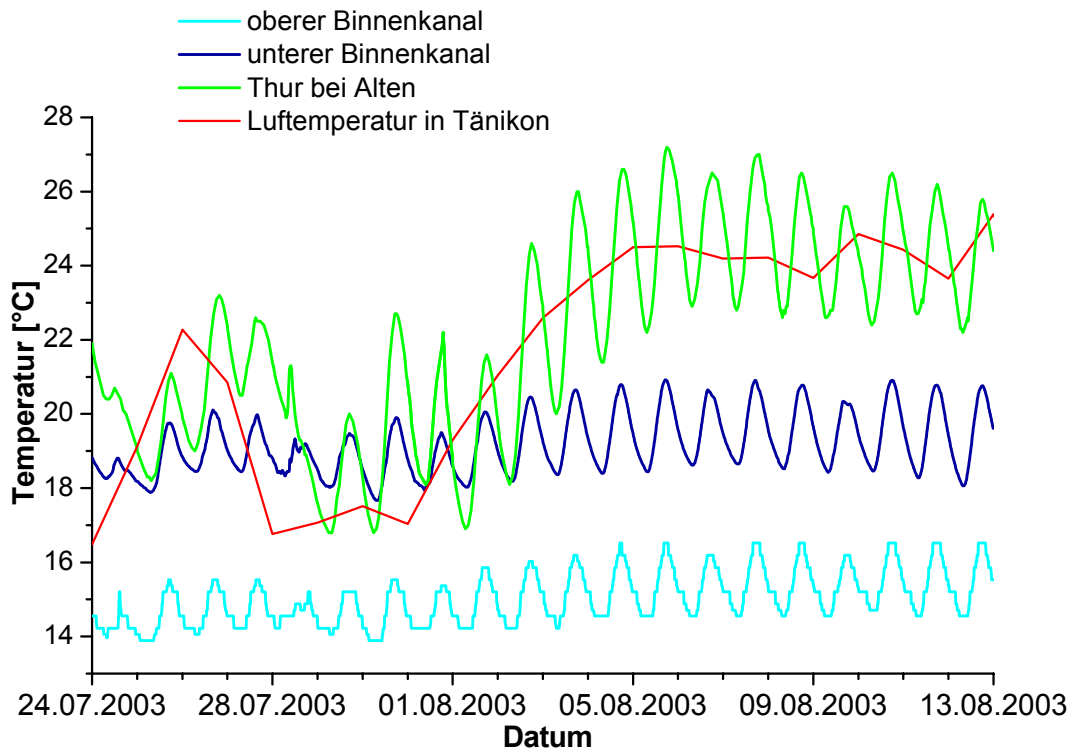


Abbildung 7: Gemessene Wassertemperatur der Binnenkanäle bei Frauenfeld und Gütighausen, die Wassertemperatur der Thur in Alten sowie die in Tänikon gemessenen Tagesmittel der Lufttemperatur.

Die mittlere Wassertemperatur im oberen Binnenkanal betrug 14.6°C , im unteren Binnenkanal wurde eine durchschnittliche Temperatur von 19.2°C gemessen. Zum Vergleich: In der Thur bei Alten wurde in dieser Zeit eine Wassertemperatur von durchschnittlich 22.4°C gemessen. Während die mittleren Tagestemperaturen in den Kanälen nahezu konstant blieben, folgte die Temperatur in der Thur in etwa der mittleren Lufttemperatur. Die tieferen Temperaturen in den Kanälen werden durch das Grundwasser verursacht. Die Wassertemperaturen im Grundwasser sind viel ausgeglichener als in einem Fluss. Im Sommer ist es kälter als das Flusswasser, im Winter wärmer. Zudem fließen die Binnenkanäle grösstenteils zwischen Bäumen und Hecken und sind somit der Sonneneinstrahlung nur in geringem Mass ausgesetzt.

Der Temperaturunterschied zwischen den beiden Binnenkanälen kann durch einen unterschiedlichen Anteil an Grundwasser erklärt werden (im unteren Binnenkanal ist der Anteil geringer). Zudem ist der untere Binnenkanal im letzten Abschnitt nicht beschattet. Auch die Tagesschwankungen sind im unteren Binnenkanal etwas grösser (2°C zu 1.6°C).

Der Zufluss des kühlen oberen Binnenkanals führt lokal zu einer Abkühlung der Thur (Variation bis zu 5°C wurden gemessen; vergleiche Kapitel 4). Der gesamte Einfluss des Grundwassers auf die Wassertemperatur fällt vor allem bei tiefem Wasserstand in der Thur ins Gewicht, da der Grundwasserzufluss recht konstant ist und sein Einfluss dann relativ hoch wird.

Bei hohen Wassertemperaturen der Thur können die kühleren Einleitstellen und die Kanäle selbst ein Rückzugsgebiet für die Fische darstellen. Neben den Binnenkanälen gibt es auch Stellen wo das Grundwasser direkt ins Flussbett exfiltriert⁷. Eine Untersuchung dieser Exfiltration wird derzeit durch die Arbeitsgruppe Trinkwasserchemie an der EAWAG Dübendorf durchgeführt.

3.4. Zuflüsse von Abwasserreinigungsanlagen

Die Thur dient für die zivilisatorische Abwasserreinigung als Vorfluter. Um die Auswirkungen der Kläranlagen auf das Temperaturregime der Thur abzuschätzen, wurden die Wassertemperaturen beim Ausfluss zweier Kläranlagen, sowie im gereinigten Abwasser der Papierfabrik in Weinfeldern gemessen. Die gemessenen Werte sind in der Abbildung 8 dargestellt.

Das Wasser aus den Kläranlagen weist im Mittel eine etwas höhere Temperatur als das Flusswasser der Thur auf. In Weinfeldern wurde eine durchschnittliche Temperatur von 20.9°C, in Frauenfeld⁸ eine von 20.2°C gemessen.

Die Auswirkungen der Kläranlagen auf das Temperaturregime der Thur sind abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen dem Wasser in der Thur und der Kläranlagen, sowie dem Verhältnis der Abflüsse (Thurabfluss zu Abfluss der Kläranlagen). Wenn die Temperaturdifferenz gross und der Abfluss der Thur klein ist, sind die Auswirkungen der Kläranlagen am grössten. Bei einer grossen Temperaturdifferenz von z.B. 10°C und einem Abflussverhältnis von 10 m³/s zu 0.5 m³/s wird das Thurwasser insgesamt um ungefähr 0.5°C erwärmt (ohne Einbezug der Rückkopplungseffekte beim Energieaustausch mit der Atmosphäre). Solche Bedingungen sind jedoch nur im Winter zu erwarten, bei den Spitzenwerten im Sommer führt die Einleitung des Wassers aus den Kläranlagen zu keiner zusätzlichen Erwärmung der Thur.

Die Temperatur des Abwassers der Papierfabrik in Weinfeldern ist mit einem Mittelwert von 30.6°C dagegen auch im Sommer deutlich höher als die Wassertemperatur in der Thur. Bei der Papierfabrik wurden sogar Spitzenwerte bis zu 35.5°C gemessen. Der Abfluss ist mit

⁷ Nach der Grundwasserkarte ist die Thur jedoch grösstenteils Infiltrat, das heisst Thurwasser fliesst ins Grundwasser.

⁸ Der Temperatursensor bei der Kläranlage in Frauenfeld hatte während der Messperiode teilweise einen Offset, welcher korrigiert werden musste. Die Genauigkeit der Daten wurde dadurch etwas beeinträchtigt.

durchschnittlich 17 l/s jedoch sehr klein. Auf Grund der hohen Temperatur dieses Zuflusses wird die Thur auch an warmen Sommertagen noch erwärmt. Bei Extrembedingungen mit geringem Abfluss und einer hohen Wassertemperatur in der Thur bewegen sich diese Erwärmungen aber lediglich im Bereich eines Hundertstelgrads.

Als markanter Punkt in Abbildung 8 ist das starke Niederschlagsereignis vom 12. August an der Abnahme der Wassertemperaturen und Zunahme der Abflüsse (Meteorwasser) bei den Kläranlagen zu erkennen.

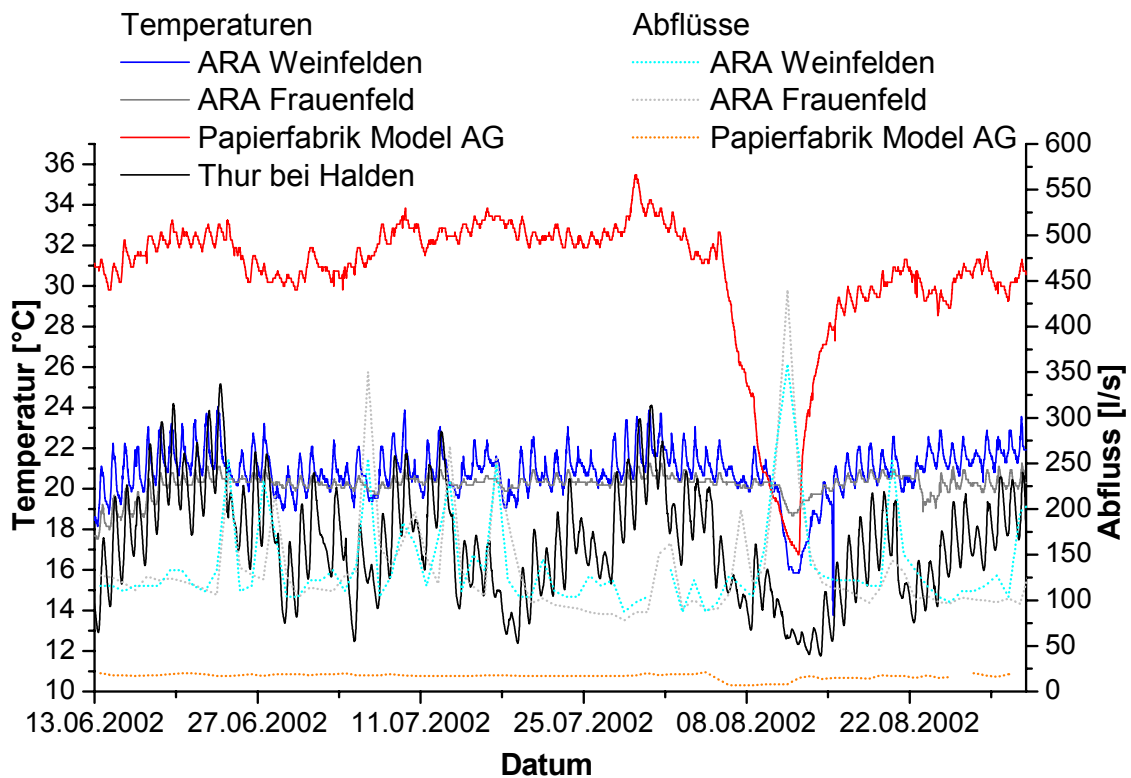


Abbildung 8: Gemessene Wassertemperaturen beim Ausfluss der Kläranlagen von Weinfeld und Frauenfeld, der Papierfabrik in Weinfeld und der Thur bei Halden während des Sommers 2002. Zusätzlich sind die entsprechenden Abflüsse der Papierfabrik und der Kläranlagen aufgetragen (gepunktete Linien).

Zusammenfassung

Durch den Wärmeaustausch mit der Umgebung nimmt die Wassertemperatur in der Thur im Sommer in Fliessrichtung zu. Im beobachteten Zeitraum betrug diese Zunahme auf der Fliessstrecke von 52 km zwischen Halden und Alten im Mittel 1.3°C. Die absolute Höhe der Wassertemperatur wird neben den meteorologischen Bedingungen stark vom Abfluss beeinflusst. Bei hohem Abfluss werden tiefere Temperaturen gemessen, da der Wärmeeintrag auf eine grössere Wassermenge verteilt wird.

Aufgrund des geringeren Abflusses sind die Wassertemperaturen in den Zuflüssen im Sommer etwas höher als in der Thur. Eine Ausnahme bilden die Binnenkanäle, welche vom kühlen Grundwasser gespeist werden. Sie weisen im Sommer teilweise deutlich niedrigere Wassertemperaturen als die Thur auf und kühlen somit die Thur ab. Bei hohen Wassertemperaturen sind diese Binnenkanäle wichtige Rückzugsplätze für die Fische.

Die Zuflusstemperaturen bei den untersuchten Anlagen (Kläranlagen und Papierfabrik) sind im Mittel höher als die Wassertemperaturen der Thur. Eine signifikante Erwärmung der Thur von mehreren Zehntelgraden durch diese Anlagen ist aber nur bei niedrigem Abfluss im Winter zu erwarten.

4. Temperaturmessungen im Querprofil

In diesem Kapitel werden die im Sommer 2003 an verschiedenen Orten in der Thur gemessenen Wassertemperaturen analysiert. Eine kurze Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse ist wiederum am Ende des Kapitels zu finden.

4.1. Wassertemperaturvariationen über das Querprofil

Die Wassertemperatur der Thur ist im fließenden Flussquerschnitt relativ homogen. An bestimmten Stellen können jedoch auch über den Querschnitt Temperaturvariationen, verursacht durch Zuflüsse, seichte Stellen oder so genannte Totzonen (Stillwasserzonen), entstehen.

Wenn zwei Flüsse mit unterschiedlicher Wassertemperatur zusammenfließen, sorgt die turbulente Strömung dafür, dass die Temperaturdifferenz über den Fließquerschnitt ausgeglichen wird. Wegen der grösseren Bachbreite erfolgt die Mischung über die Wassertiefe normalerweise schneller als die Mischung in Querrichtung. Mit der folgenden Formel kann die Mischdistanz (s_{QM}), innerhalb derer die Temperaturunterschiede praktisch verschwinden (bis auf 3%), abgeschätzt werden.

$$s_{QM} = \frac{2.4w^2}{a_{QM} \sqrt{fd}}$$

Wobei w der Wasserbreite, f dem Reibungskoeffizienten und d der Wassertiefe entspricht. Der Koeffizient a_{QM} kann bei einem seitlichen Zufluss gleich 1 gesetzt werden. Die Mischdistanz, welche mit den Abflussbedingungen variiert, liegt in der Größenordnung von 10 km.

An seichten Stellen des Flusses ist die Fließgeschwindigkeit geringer als im übrigen Fluss, so dass das Wasser langsamer ausgetauscht wird. Wegen der geringen Tiefe ist auch das Wasservolumen an diesen Stellen geringer. An einem warmen Sommertag mit grosser Sonneneinstrahlung erwärmt sich das Wasser an diesen Stellen stärker als im tiefen Hauptstrombereich. Im Winter wenn die Thur Wärme abgibt, nimmt die Wassertemperatur in diesen Bereichen wegen des geringeren Volumens stärker (bis zur Eisbildung) ab. Noch verstärkt tritt dieser Effekt in den Totzonen z.B. hinter Bühnen auf. Mit der Zeit vermischt sich das Wasser aus den Totzonen wieder mit dem Wasser in der Hauptströmung und die Temperaturunterschiede werden ausgeglichen.

4.2. Aufweitungen

Durch die neu erstellten Aufweitungen an der Thur bilden sich zusätzliche Kiesbänke, Kolke und ruhige Buchten, mit seichten, langsam fließenden Stellen. Dort wird im Sommer eine gegenüber dem restlichen Flussbett erhöhte Wassertemperatur erwartet. Hier ist die Frage von Interesse, inwiefern sich die Temperaturvariationen bei den Aufweitungen von den ansonst gegebenen Variationen im übrigen Flussverlauf unterscheiden. Dazu wurden die Wassertemperaturen über den Querschnitt der Thur an verschiedenen Stellen gemessen und analysiert.

4.3. Messresultate

Die Messungen der Querprofile fanden am 9. Juli 2003 statt. Das Wetter war an diesem Tag mit einer mittleren Lufttemperatur von 20.3°C ⁹ und einem Tagesmaximum von 26.4°C um 16:20 sehr warm. Für den Rekordsommer 2003 waren diese Werte jedoch nicht aussergewöhnlich (Monatsmittel der Lufttemperatur: Juni 21.8°C , Juli 19.2°C , mittlere Tagesspitzen: Juni 28.2°C , Juli 25.3°C). Der Wasserabfluss in Alten war mit $8.64\text{ m}^3/\text{s}$ sehr klein (Halden $6.67\text{ m}^3/\text{s}$); das langjährige Mittel für den Juli (gemessen in Andelfingen) beträgt $51.5\text{ m}^3/\text{s}$. Entsprechend den äusseren Bedingungen (heisses Klima, geringer Abfluss) wurden dann auch sehr hohe Wassertemperaturen gemessen (Maximalwert 29.7°C).

Die Messungen wurden beim Abschnittsbeginn in Halden, bei Kradolf, in den Restwasserstrecken bei Bürgeln und bei Eschikofen, bei Pfy, bei Warth vor dem Zufluss der Murg und des oberen Binnenkanals und kurz unterhalb bei der Aufweitung, sowie bei der Aufweitung Niederneunforn durchgeführt. Die Messorte sind schematisch in der Abbildung 9 dargestellt.



Abbildung 9: Messstandorte der Querprofilmessungen vom 9. Juli 2003 in der Thur.

Die gemessenen Querprofile zusammen mit der entsprechenden Wassertiefe sind in der Abbildung 10 dargestellt. Bei der Untersuchung werden drei verschiedene Flussabschnitte unterschieden: unveränderte (d.h. nicht aufgeweitete) Abschnitte, Restwasserstrecken und Aufweitungen. Die absoluten Werte der Messungen lassen sich nicht vergleichen, da der Temperaturverlauf einen Tagesgang aufweist und die Temperatur im Sommer mit zunehmender Fliessstrecke und Tageszeit zunimmt.

Im Allgemeinen ist bei den Profilen ein Zusammenhang zwischen der Wassertiefe und der Temperatur zu erkennen. An den weniger tiefen Stellen am Rand sind die Wassertemperaturen erwartungsgemäss höher als in den tieferen Bereichen des Hauptströmungskanal.

⁹ Gemessen bei der Meteostation in Tänikon.

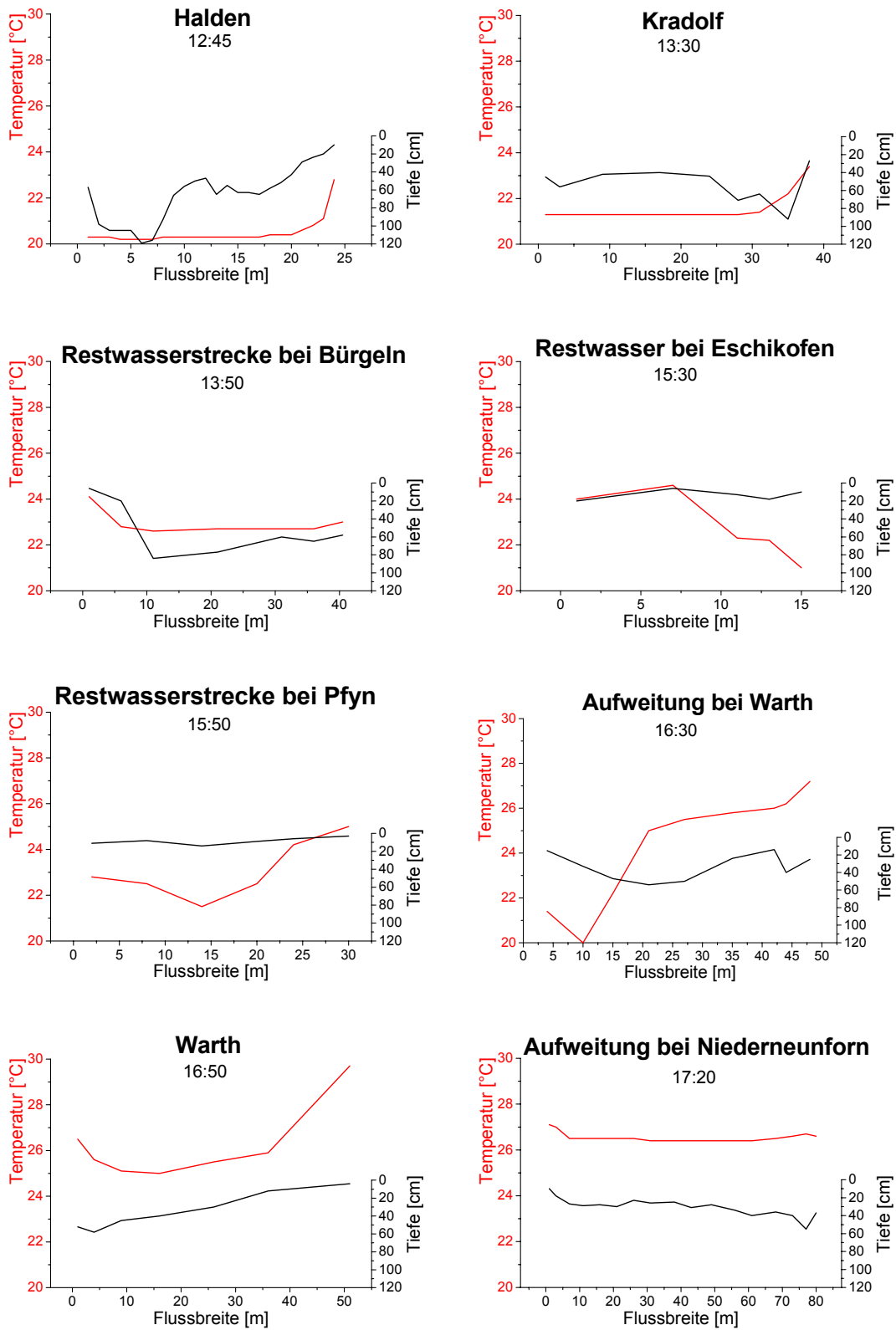


Abbildung 10: Querprofile der Wassertemperaturen in der Thur gemessen am 9. Juli 2003 zwischen 12:45 und 17:20 Uhr. (Distanzen vom rechten Flussufer gemessen, Temperaturen in roter, Wassertiefen in schwarzer Farbe).

Auch bei den unveränderten Profilen in Halden, Tänikon und Warth (vor dem Zufluss des oberen Binnenkanal und der Murg) wurden bei Niederabfluss Temperaturvariationen festgestellt (in Halden 2.6°C, in Kradolf 2.1°C und in Warth 4.2°C). Das liegt daran, dass sich bei einer so stark reduzierten Wassermenge auch im Kanal bei den Kiesablagerungen untiefe Zonen bilden, bei welchen das flachere und langsamer abfliessende Wasser durch die Sonneneinstrahlung stärker erwärmt wird als in der Flussmitte.

Die gemessene Temperaturvariation bei der Aufweitung von Niederneunforn ist mit 0.7°C sogar am kleinsten, weil die Wassertiefe bei dieser Messung über den ganzen Querschnitt relativ konstant ist. Bei der Aufweitung nach der Brücke bei Warth ist die Temperaturvariation mit 7.2°C klar am grössten. Die grossen Unterschiede bei dieser Messung sind auf zwei Besonderheiten zurückzuführen. Auf der linken Seite sind die Temperaturen durch den Zufluss des oberen Binnenkanals (50 m flussaufwärts) vergleichsweise tief (20°C). Gegenüber dem 100 m flussaufwärts, vor dem Zufluss, gemessenen Profil beträgt die Abkühlung etwa 5°C (die zwei Messungen dürfen hier verglichen werden, da sie zeitlich nur 20 Minuten auseinander liegen). Auf der rechten Seite sind die Temperaturen trotz einer relativ grossen Wassertiefe hoch. Bei diesem Bereich handelt es sich um eine Totzone mit langsamem Wasseraustausch mit dem fliessenden Flussabschnitt. Die maximale Temperatur in der Totzone (27.4°C) ist jedoch geringer als im flachen Abschnitt vor der Aufweitung (29.7°C).

Die Restwasserstrecken sind insofern speziell, als dass in diesen Abschnitten der Abfluss der Thur noch stärker reduziert ist. Bei den Wehren in Kradolf-Schönenberg, Weinfeldern und Müllheim wird Wasser aus der Thur in einen Kanal abgezweigt und nach der Nutzung der Höhendifferenz in kleinen Kraftwerken flussabwärts in die Thur zurückgeleitet. Die Restwassermenge¹⁰ bei den Wehren in Kradolf und Weinfeldern beträgt jeweils 2 m³/s¹¹. Bei Müllheim wurde keine Restwassermenge festgelegt, die Konzessionsmenge¹² des Kraftwerks ist mit 8 m³/s zwar klein, bei niedrigem Gesamtabfluss in der Thur von 10-15 m³/s, wie er im Sommer 2002 üblich war, kann der Abfluss nach dem Wehr aber trotzdem sehr klein werden. Die Temperaturvariationen in den Restwasserstrecken verhalten sich ähnlich wie in den anderen Abschnitten.

Die absoluten Temperaturen, welche an diesem Tag gemessen wurden, waren teilweise sehr hoch und bewegten sich für die Fische im kritischen Bereich. Durch die Temperaturvariationen über den Querschnitt und die Länge (insbesondere im Bereich der Binnenkanäle) haben die Fische gewisse Möglichkeiten, sich in bekömmliche Zonen zurück zu ziehen.

Niklas Joos (Joos, 2003) hat im Rahmen seiner Diplomarbeit an verschiedenen Tagen im Sommer 2003 ebenfalls Temperaturmessungen über den Querverlauf der Thur durchgeführt. Aus seinen Messungen ist ersichtlich, dass grosse Temperaturvariationen vor allem bei einem tiefen Abfluss gemessen werden. Bei niedrigem Abfluss gibt es mehr Stellen, an welchen der Wasseraustausch mit der Hauptströmung verlangsamt ist und das Wasser stärker erwärmt wird.

¹⁰ Minimale Abflussmenge welche unterhalb des Wehres noch in der Thur vorhanden sein muss.

¹¹ Daten von Romeo Favero vom Amt für Umwelt des Kantons Thurgau.

¹² Maximale Wassermenge die genutzt werden darf.

Neben den oben erwähnten Mechanismen können lokal auch Grundwasseraufstöße zu niedrigeren Temperaturen führen. Dieser Effekt steht nicht in direktem Zusammenhang mit den Aufweitungen und wurde bei den vorliegenden Messungen nicht untersucht, die dadurch entstehenden kühleren Zonen könnten aber für einige Fischarten von Bedeutung sein.

Zusammenfassung

Die Wassertemperaturen in der Thur sind über den Flussquerschnitt nicht konstant. Mit sinkendem Abfluss nehmen die Temperaturvariationen zu. Gegenüber der Temperatur der Hauptströmung sind die Temperaturen an Stellen mit niedriger Wassertiefe und/oder mit verlangsamttem Wasseraustausch (Totzonen) zum Teil um mehrere °C erhöht. Bei den Mündungen der Binnenkanäle mit kühlerem Grundwasser können lokal gegenüber der Hauptströmung stark erniedrigte Temperaturen erreicht werden. Es wurden Temperaturdifferenzen im Querschnitt von bis zu 7°C beobachtet.

Lokal wurden im Juli 2003 an untiefen Stellen Temperaturen gemessen, die über dem Maximum der Toleranz einzelner Fischarten lagen, und auch im Hauptgerinne wurden mit fast 27°C Temperaturen im Bereich der Toleranzgrenze von Aesche und Schneider erreicht. Derart hohe Temperaturen werden jedoch nur bei niedrigem Abfluss erreicht, wenn die Thur auch in kanalisierten Abschnitten das Flussbett nicht vollständig ausfüllt. Bezüglich der Temperaturvariation über den Querschnitt konnten denn auch keine systematischen Unterschiede zwischen den kanalisierten und den aufgeweiteten Abschnitten festgestellt werden.

5. Modellrechnungen

5.1. Modell der Thur

Die geometrische Struktur des Flussbetts der Thur wird mit Hilfe der vom Kanton Thurgau und dem Kanton Zürich zur Verfügung gestellten Querprofilmessungen von Halden bis Alten erstellt¹³. Dieses Vorgehen garantiert, dass die - für den Wärmehaushalt wichtige - Abhängigkeit der Wasseroberfläche vom Abfluss realistisch abgebildet wird. In das geometrische Modell einbezogen werden auch die Kanäle bei Kradolf-Schönenberg, Weinfeldern und Müllheim. Eine Übersicht über die Strecke ist der Abbildung 2 zu entnehmen.

Der Reibungswiderstand und die Dispersion (Mischung in Fliessrichtung, verursacht durch die Variation der Fliessgeschwindigkeit über den Flussquerschnitt) werden mit Hilfe von Tracerversuchen, Abflussmessungen und der Korngrösse an der Bachbettssole abgeschätzt.

Bei den Tracerversuchen wird eine genau bestimmte Menge eines Stoffes (im vorliegenden Fall Uranin¹⁴) als einmaliger Input in den Fluss gegeben. Nach einer definierten Distanz flussabwärts, auf welcher sich der Stoff gleichmässig über den Flussquerschnitt verteilt hat, wird mit einem Sensor die Konzentration des Stoffs im Wasser gemessen und aufgezeichnet. Die gemessene Tracerkurve kann zur Schätzung der Dispersion und der Reibung verwendet werden, indem der Tracerversuch mit dem hydraulischen Modell nachgebildet wird. Bei der Eichung werden dann die unbekannt Parameter so lange variiert, bis die gemessene und die simulierte Tracerkurve möglichst gut übereinstimmen.

5.2. Verwendete Eingabedaten

Als Randbedingungen für den Abfluss am oberen Ende der Fliessstrecke stehen die Daten von der Messstation des Bundesamts für Wasser und Geologie (BWG) in Halden zur Verfügung. Auch von einzelnen Zuflüssen (Giessen, Murg und Kläranlagen) gibt es Abflussmessungen. Die Abflüsse der weiteren berücksichtigten Zuflüsse werden aus der Abflussmessung bei der BWG Station am Ende der Strecke in Alten (Ersatzstation für Andelfingen) abgeschätzt.

Als Eingabetemperatur dienen die Messwerte von Halden. Die Temperaturen der Zuflüsse werden ebenfalls von den Messungen übernommen. Die Temperaturen in den Binnenkanälen werden durch sinusförmige Temperaturkurven mit konstantem Grundwert und konstanter Amplitude angenähert.

Um den Wärmeaustausch zu beschreiben werden verschiedene Wetterdaten (Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Luftdruck, Windstärke, relative Luftfeuchtigkeit und Bewölkungsanteil) benötigt. Diese werden von der Wetterstation der MeteoSchweiz in Tänikon (536 m ü. M.) übernommen. Diese Station befindet sich etwa in der Mitte des untersuchten Abschnittes rund 12 km südlich der Thur.

¹³ Die gemessenen Profile werden bei der Modellierung in Doppeltrapeze umgewandelt.

¹⁴ Uranin ist ein Fluoreszenzfarbstoff, welcher sich unter Lichteinfluss abbaut.

Gewisse flussspezifische Eigenschaften, die für den Wärmehaushalt eine Rolle spielen, lassen sich im Feld nur schwer oder gar nicht bestimmen. Diese Werte können durch die durchgeführten Temperaturmessungen am Ende der Strecke abgeschätzt werden, indem man die Abweichungen der modellierten und der gemessenen Temperaturkurven minimiert. Bei den Modellierungen in der Thur werden die Wärmeleitung des Sediments, die Wärmekapazität des Sediments, der Beschattungsanteil und der Anteil der kurzwelligen Strahlung, welche ins Sediment gelangt, so abgeschätzt.

Genauere Angaben zum Vorgehen bei der Modellierung sind in der Literatur zu finden (Meier, 2002; Frey, 2003).

5.3. Eichung des Modells

Bei der Modellierung werden zwei Phasen berücksichtigt. Die erste dauert vom 13. bis 21. Juni 2002. In dieser Zeit wurden die höchsten Wassertemperaturen der Messreihe im Sommer 2002 gemessen. Die zweite Phase umfasst die Zeit vom 24. Juli bis 2. August 2002. Während dieser Zeit war der Abfluss in der Thur am kleinsten.

Die modellierten und die gemessenen Werte sind in den Abbildung 11 und 12 abgebildet.

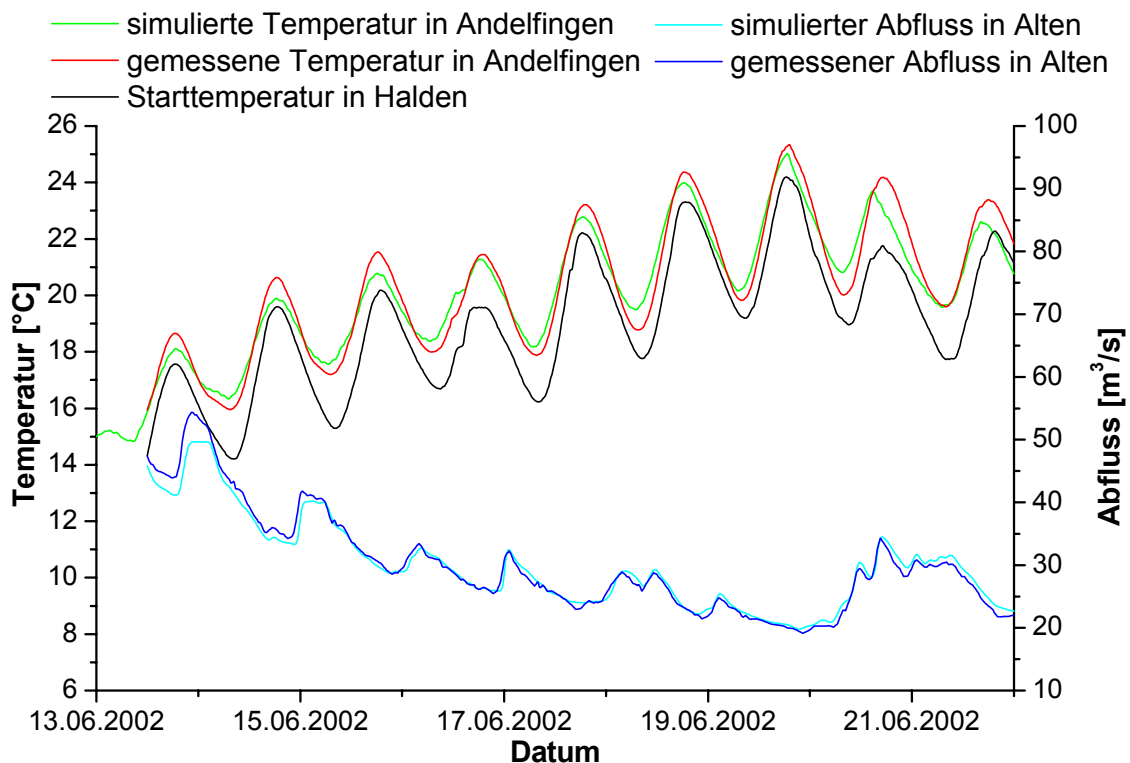


Abbildung 11: Simulierte und gemessene Wassertemperatur in Andelfingen und Abflussmenge in Alten sowie gemessene Starttemperatur in Halden, vom 13. bis 21. Juni 2002.

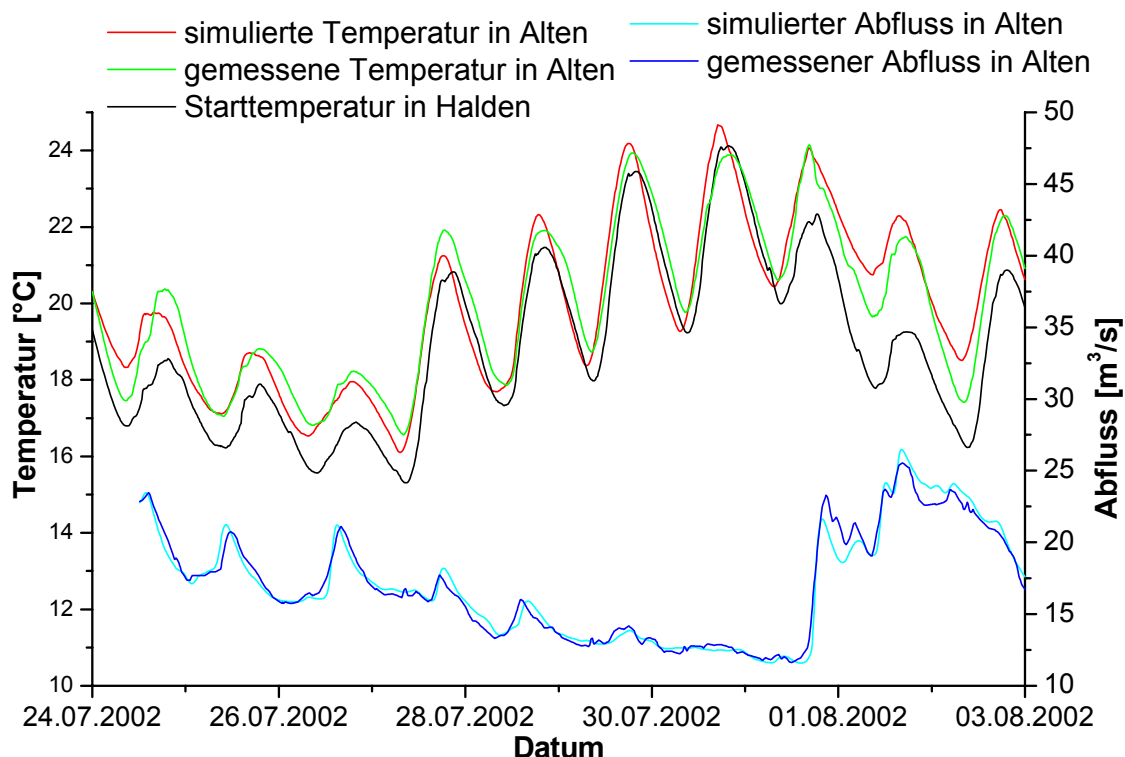


Abbildung 12: Simulierte und gemessene Wassertemperatur und Abfluss in Alten, sowie gemessene Starttemperatur in Halden, vom 24. Juli bis 2. August 2002.

Die geschätzten Parameter bewegen sich in einer vernünftigen Grössenordnung¹⁵. Obwohl die Variationen der geschätzten Parameter zwischen den beiden simulierten Zeitabschnitten relativ gross sind, ist der Effekt der unterschiedlichen Grösse der Parameter gering. Der kleinere Beschattungsanteil in der zweiten Phase wird durch eine grössere Einstrahlung ins Sediment kompensiert. Die grössere Einstrahlung ins Sediment führt auch zur grösseren Wärmekapazität in der zweiten Phase.

Mit den verwendeten Werten gelingt die Nachbildung des Abflussregimes sehr gut und auch beim Temperaturregime werden alle wichtigen Änderungen der gemessenen Daten gut nachgebildet.

Gewisse Abweichungen beim Temperaturmodell lassen sich jedoch nicht vermeiden. Bei den Modellrechnungen im Juni 2002 sind die simulierten Temperaturen im Mittel 0.05°C tiefer als die gemessenen Temperaturwerte, bei den Modellrechnungen im Juli beträgt die Abweichung im Durchschnitt 0.09°C (die simulierten Werte sind ebenfalls tiefer). Der Grund für die Abweichungen liegt in der Auflösung der Eingabedaten (insbesondere der Meteorodaten).

¹⁵ Wärmeleitung des Sediments: $41 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ in der 1. Phase, $24 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$ in der zweiten Phase; Wärmekapazität des Sediments: $330000 \text{ J} / (\text{m}^2 \text{ K})$ (1. Phase) und $320000 \text{ J} / (\text{m}^2 \text{ K})$ (2. Phase), Beschattungsanteil: 0.2 (1. Phase) und 0.1 (2. Phase), Anteil der kurzwelligen Strahlung welche ins Sediment gelang: 0.04 (1. Phase) und 0.15 (2. Phase).

Die örtliche Auflösung ist eingeschränkt, weil die Meteodaten nicht überall die exakten lokalen Verhältnisse bei der Thur widerspiegeln. So werden die Variationen im Verlauf der Strecke nicht berücksichtigt. Die zeitliche Auflösung ist limitiert, weil zum Beispiel der Bevölkerungsanteil „nur“ dreimal am Tag bestimmt wird. Zudem weisen die Eingabedaten bezüglich der lateralen Zuflüsse Lücken auf.

Für die zu untersuchende Fragestellung über die Auswirkungen der Ausweitungen auf das Temperaturregime stellen diese Abweichungen kein Problem dar. Bei der Analyse der Strecke mit und ohne Aufweitungen werden die beiden simulierten Temperaturkurven verglichen, die systematischen Fehler heben sich dadurch weitgehend auf.

5.4. Auswirkungen der Aufweitungen

Bei den Modellrechnungen ohne Aufweitungen werden die selben Eingaben wie beim aktuellen Flusssystem verwendet, einzig die aufgeweiteten Stellen werden ausgeschnitten, das heisst das Modell interpoliert diese Stellen mit den Geometriedaten vor und nach den Aufweitungen.

Die simulierten Ergebnisse sind in den Abbildungen 13 und 14 wiedergegeben. Von Auge ist kaum ein Unterschied zwischen den Temperaturkurven auszumachen. Bei der numerischen Auswertung wird ersichtlich, dass die Wassertemperatur bei Gütighausen, direkt unterhalb der Strecke mit den meisten Aufweitungen, im Juni im Mittel um 0.024°C und im Juli um 0.027°C höher war. Die etwas grössere Temperaturdifferenz in der zweiten Phase ist auf den Abfluss zurückzuführen. Im Juli waren die Abflüsse tiefer, der zusätzliche Wärmeinput der Aufweitungen wurde so auf eine kleinere Wassermenge verteilt.

Von grossem Interesse sind vor allem die Unterschiede zwischen den Maximaltemperaturen. Diese erhöhten sich gemäss den Modellrechnungen durch die Aufweitungen an den wärmsten Tagen um 0.12 bis 0.16°C im Juni und 0.15 bis 0.18°C im Juli.

Am Ende der simulierten Fliessstrecke bei Andelfingen oder Alten, 10 respektive 14 km unterhalb von Gütighausen, ist der Effekt der Aufweitungen bereits weniger spürbar. Die mittleren Temperaturdifferenzen liegen hier bei 0.021°C , und die grössten Temperaturunterschiede haben sich durch die Fliesszeit zwischen den beiden Standorten und die Dispersion von den wärmsten Stunden etwas in die späteren Abendstunden verschoben. Die Tagesmaxima sind deshalb an dieser Stelle nur noch um 0.02 bis 0.09°C erhöht.

Zum Vergleich wurde für den Monat Juli eine Simulation mit und ohne die beiden Kläranlagen in Weinfeldern durchgeführt. Die simulierte Wassertemperatur kurz nach dem Zufluss der ARA's war im Mittel um 0.005°C erhöht, die stärksten Erhöhungen von bis 0.03°C wurden vor allem an den kühleren Tagen simuliert, während die Spitzentemperaturen kaum beeinflusst wurden.

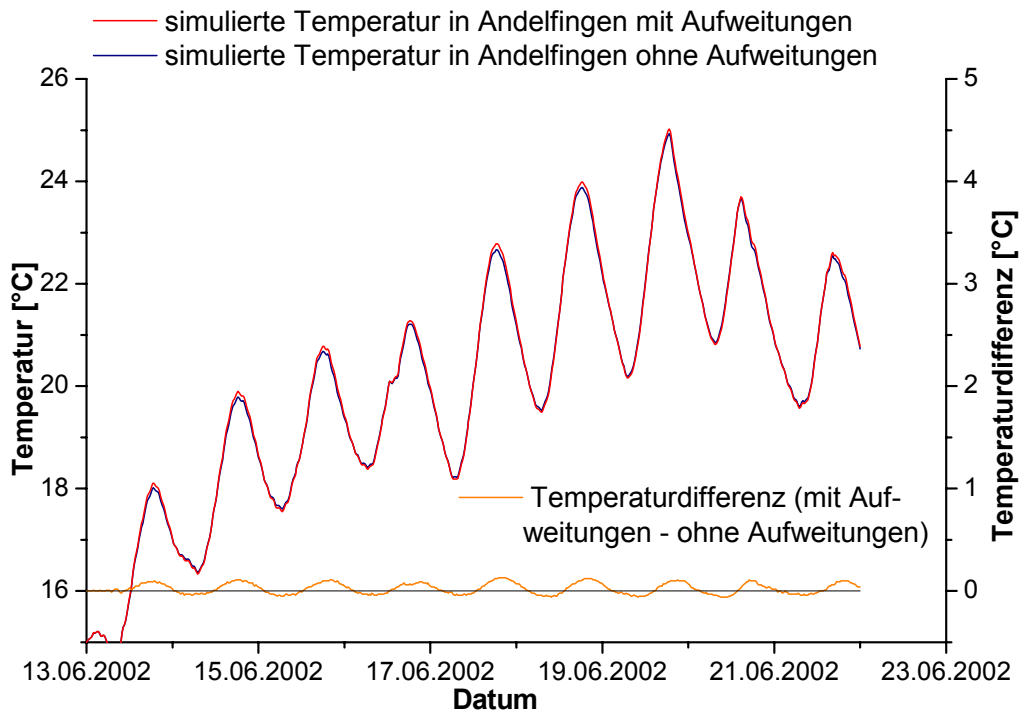
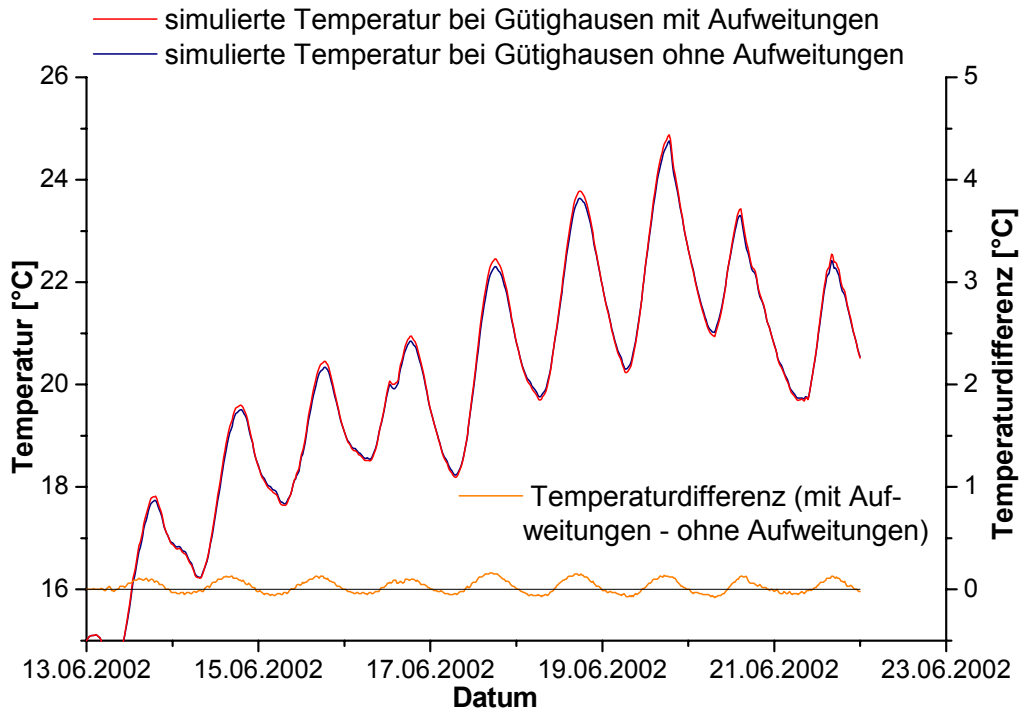


Abbildung 13: Simulierte Wassertemperaturen der Thur bei Gütighausen, direkt unterhalb der Aufweitungen (oben), und bei Andelfingen am Ende der untersuchten Strecke (unten) mit und ohne Aufweitungen, für die Zeit vom 13. bis 21. Juni 2002. Man beachte die unterschiedlichen Skalen bei den Temperaturen und bei den Temperaturdifferenzen.

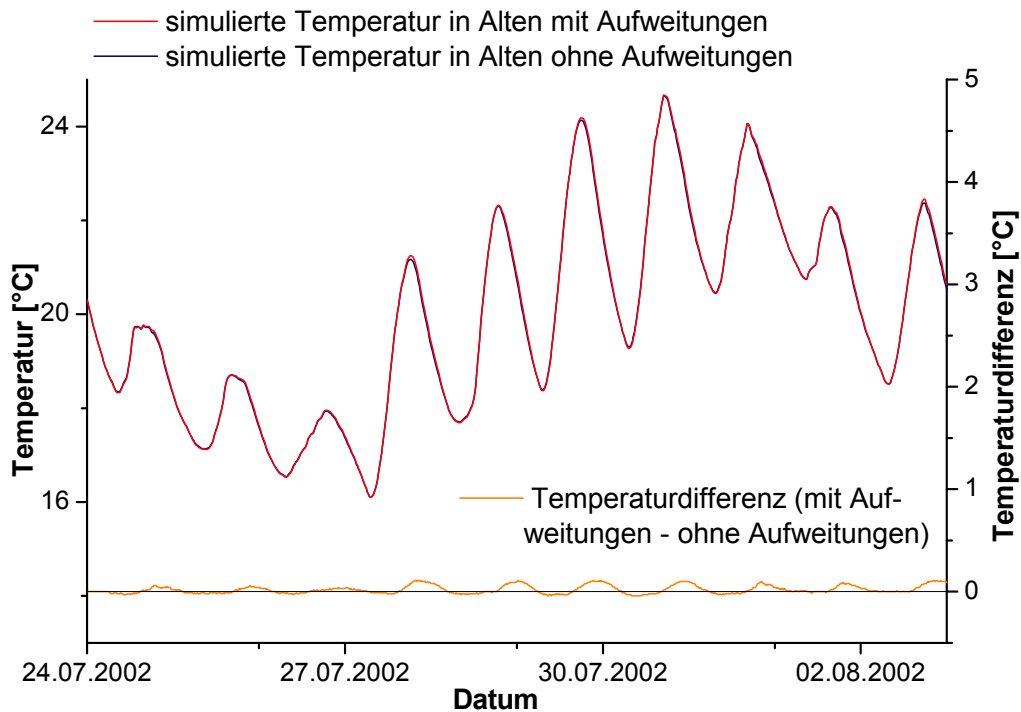
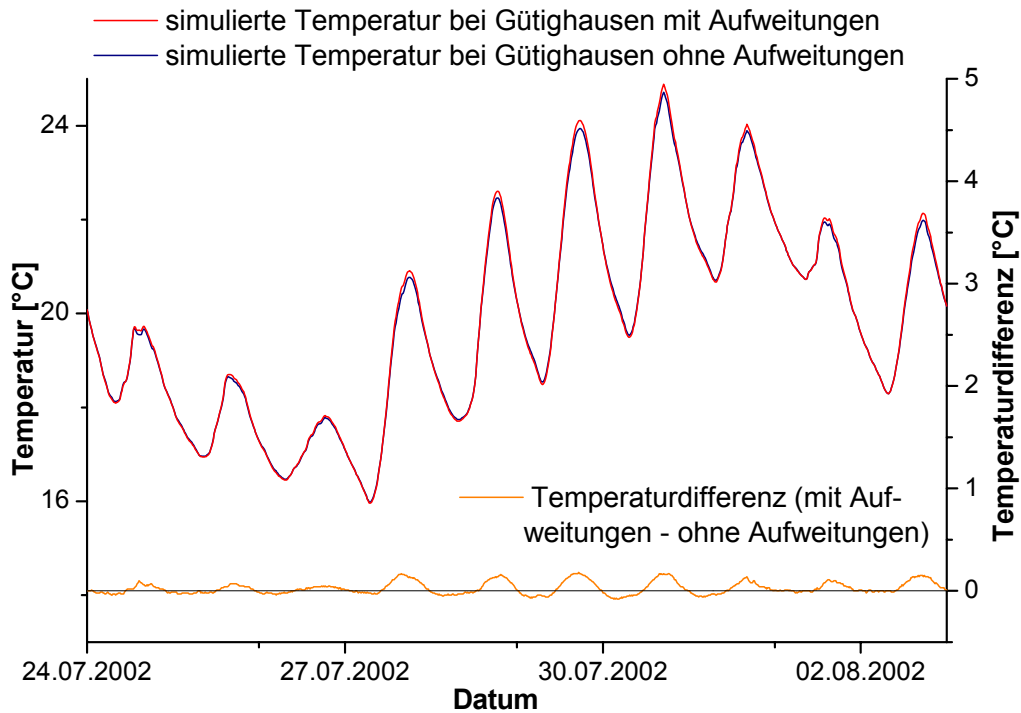


Abbildung 14: Simulierte Wassertemperaturen der Thur bei Gütighausen, direkt unterhalb der Aufweitungen (oben), und bei Alten am Ende der untersuchten Strecke (unten) mit und ohne Aufweitungen, für die Zeit vom 24. Juli bis 2. August 2002. Man beachte die unterschiedlichen Skalen bei den Temperaturen und bei den Temperaturdifferenzen.

Die Energieänderung (Energieinput – Energieoutput) ist ungefähr proportional zur Wasseroberfläche¹⁶. Die Änderung dieser Oberfläche ist deshalb von grossem Interesse. Bei einem Abfluss von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ wird, ohne Aufweitungen, eine Abnahme der Wasseroberfläche von ca. 2.54 km^2 auf 2.48 km^2 simuliert (2.5%), bei einem Abfluss von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt die Abnahme 2.2% (von 2.45 auf 2.39 km^2). Die prozentuelle Abnahme verringert sich somit bei kleinem Abfluss. Das kann durch die Gerinneform der Aufweitungen erklärt werden. Aufweitungen weisen häufig eine Niederabflussrinne auf. Bei geringem Wasserabfluss kann so die Wasseroberfläche gegenüber einem kanalisiertem Abschnitt sogar verkleinert sein. Zur Veranschaulichung ist das Querprofil vor und bei der Aufweitung von Neunforn in der Abbildung 15 abgebildet. Da in Phasen mit niedrigem Wasserstand die Gefahr von zu hohen Wassertemperaturen am grössten ist, können die Aufweitungen die Temperaturverhältnisse in bestimmten Fällen sogar marginal verbessern.

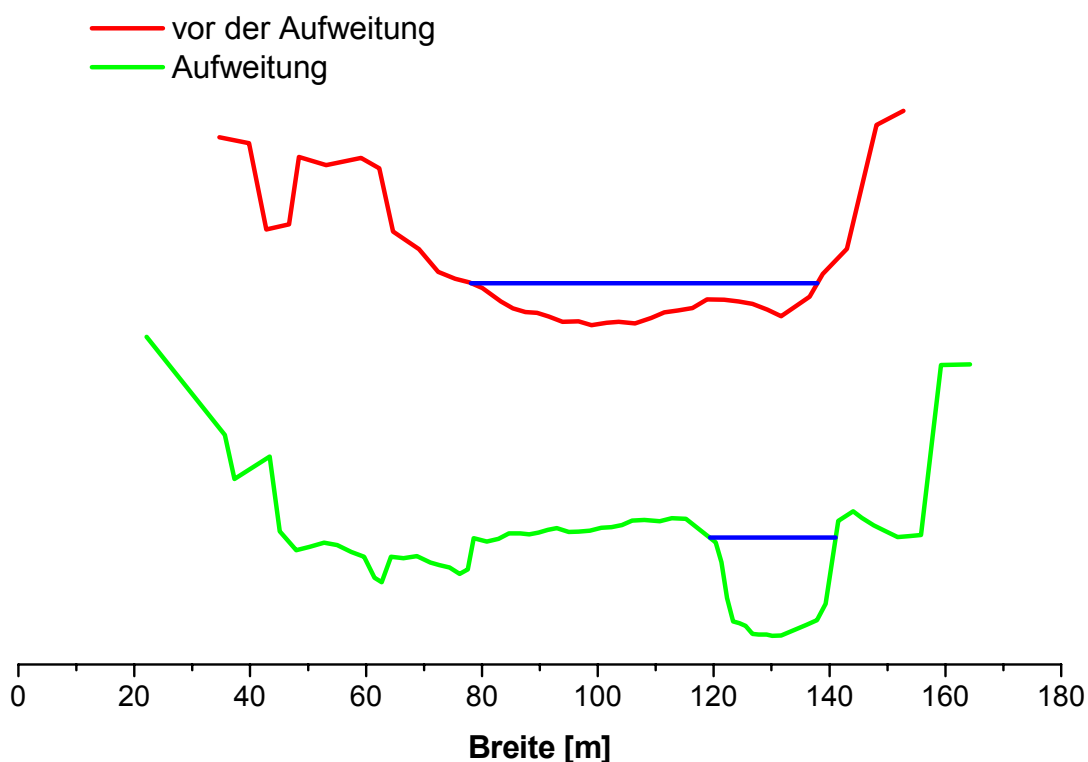


Abbildung 15: Querprofil der Aufweitung bei Neunforn und des Steckenabschnittes kurz oberhalb mit dem Wasserspiegel bei niedrigem Abfluss.

¹⁶ Neben der Wasseroberfläche spielt auch die Wassertemperatur eine gewisse Rolle. So ist zum Beispiel die langwellige Ausstrahlung eines Flusses bei einer hohen Wassertemperatur etwas grösser.

6. Zusammenfassung

Zur Verbesserung des Hochwasserschutzes und der ökologischen Vielfalt wurde die Thur an verschiedenen Stellen aufgeweitet. Die Aufweitungen erhöhen die Diversität der aquatischen Lebensräume und dienen bei Hochwasserereignissen als Pufferzonen.

Bei der Analyse des Temperaturregimes der Thur interessiert, ob die Aufweitungen einen relevanten Einfluss auf die Wassertemperatur haben. Insbesondere will man wissen ob sich durch die Aufweitungen die Gefahr erhöht, dass für die aquatische Lebensgemeinschaft zu hohe Temperaturen erreicht werden.

Neben den klimatischen Bedingungen wird der Temperaturhaushalt in einem Fluss hauptsächlich durch die Abflussverhältnisse bestimmt. Der Energieaustausch des Wassers mit der Umgebung findet über die Wasseroberfläche und die Sedimentoberfläche statt. Im Sommer findet eine netto Wärmeaufnahme des Wassers statt. Die Wassertemperatur wird neben der Oberfläche vor allem durch die Abflussmenge bestimmt. Bei grossem Abfluss wird der Wärmeinput auf eine grössere Wassermenge verteilt; somit sind die Auswirkungen geringer. Da bei einem hohen Abfluss das Volumen gegenüber der Oberfläche verhältnismässig stärker zunimmt, kann eine Abnahme der Wassertemperatur bei zunehmendem Abfluss gemessen werden. Die Gefahr zu hoher Wassertemperaturen besteht demnach in Perioden mit niedrigem Abfluss.

Um das Temperaturregime mit und ohne Aufweitungen zu vergleichen, wurde, basierend auf einem hydraulischen Modell, ein Wärmehaushaltsmodell für den Thurabschnitt von Halden bis nach Alten erstellt. Als Folge der durch die Aufweitungen vergrösserten Wasseroberfläche wurde eine Erhöhung der Temperatur durch die Aufweitungen erwartet. Die Berechnungen, mit den hydraulischen und meteorologischen Randbedingungen für Juni 2002 (durchschnittlicher Abfluss in Alten $29.6 \text{ m}^3/\text{s}$, durchschnittliche Starttemperatur in Halden 19.1°C , durchschnittliche Lufttemperatur 22.6°C), ergeben direkt unterhalb der Aufweitungen eine durch die Aufweitungen bedingte Temperaturerhöhung von durchschnittlich 0.024°C . Bei der Modellierung einer zweiten Phase mit niedrigerem Abfluss (Juli 2002: durchschnittlicher Abfluss $16.8 \text{ m}^3/\text{s}$, durchschnittliche Starttemperatur 19°C , durchschnittliche Lufttemperatur 18.2°C), wurde eine Temperaturerhöhung von 0.027°C berechnet. Die Temperaturspitzen wurden durch die Aufweitungen um 0.1 bis 0.2°C erhöht. Die Erhöhung der Maximaltemperaturen nimmt mit der Fliesstrecke unterhalb der Aufweitungen schneller wieder ab als die Durchschnittstemperaturen, weil die stärkste Erwärmung zeitlich nach hinten in die kühleren Abendstunden verschoben wird.

Die Modellierungen zeigen auch, dass die Erwärmungen bei sehr kleinem Abfluss nicht zwingend höher ausfallen. Dieser Effekt ist auf das Gerinneprofil der Aufweitungen zurückzuführen. Aufweitungen haben oft eine Niederabflussrinne, was bei niedrigem Wasserspiegel sogar zu einer Verkleinerung der Wasseroberfläche führen kann. Dieser Effekt ist positiv, da die Gefahr zu hoher Wassertemperaturen bei kleinen Abflussmengen am grössten ist.

Eine signifikante Erwärmung der Thur durch die Industrieanlagen (Kläranlagen und Papierfabrik) ist lediglich bei niedrigem Abfluss im Winter zu erwarten. Eine Modellrechnung für den Juni 2002 ohne die Kläranlage und die Papierfabrik in Weinfeldern ergab lediglich eine mittlere Erwärmung von 0.005°C , die vor allem auf die Erwärmung von 0.02 bis 0.03°C an den kühleren Tagen zurückzuführen ist.

Eine zusätzliche Analyse der Temperaturverteilung über den Fliessquerschnitt im Sommer 2003 zeigte, dass die Wassertemperatur in flacheren Zonen mit verlangsamtem Wasseraustausch gegenüber der Hauptströmung erwärmt ist. Solche untiefen Stellen können sowohl in aufgeweiteten wie auch in kanalisierten Abschnitten entstehen. Es konnte kein wesentlicher Einfluss der Aufweitungen auf die Temperaturvariabilität im Flussquerschnitt bei niedrigem Wasserstand festgestellt werden. Mit Abstand die grössten lokalen Temperaturvariationen (mit kühleren Regionen) wurden in dieser Messreihe an denjenigen Stellen gemessen, wo durch die Binnenkanäle kühles Grundwasser in die Thur geleitet wird.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Temperaturen in der Thur im Sommer bei niedrigem Abfluss Werte erreichen können, die für einzelne Fischarten, namentlich die Aesche und den Schneider, im oder sogar über dem kritischen Bereich liegen. Durch die bestehenden Aufweitungen werden die Temperaturmaxima um 0.1 bis 0.2°C erhöht, wobei die Wirkung der Aufweitungen vom jeweiligen Wasserstand und von der Form des Querprofils abhängt und mit zunehmender Fliessdistanz nach der Aufweitung abnimmt. Eine ausgeprägte Niederwasserrinne vermindert die Temperaturerhöhung durch eine Aufweitung.

Für die Fische in der Thur sind bei sehr hohen Temperaturen die Ausweichmöglichkeiten in die vom Grundwasser gekühlten Seitenkanäle und die kühlende Wirkung dieser Seitenkanäle für die Thur wichtig. Bei der Planung weiterer baulicher Massnahmen an der Thur ist also vor allem darauf zu achten, dass diese Ausweichmöglichkeiten erhalten bleiben. Hingegen kann das Risiko einer zu starken Temperaturerhöhung durch den Bau von zusätzlichen Aufweitungen als sehr gering eingestuft werden.

Quellenangaben

Frey, M. (2002). Temperaturmodellierung – Auswirkungen von Kraftwerken auf das Temperaturregime in Zuflüssen der Rhône. Diplomarbeit. Rhône-Thur Publikation Nr. 2, ETH Zürich/EAWAG Kastanienbaum, <http://www.rhone-thur.eawag.ch/publikationen.html>.

Hunzinger, L. M. (1998). Flussaufweitungen – Morphologie, Geschiebehaushalt und Grundsätze zur Bemessung. VAW Mitteilungen 159. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

Küttel, S., A. Peter und A. Wüest (2002). Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fliessgewässer. Rhône-Thur Publikation Nr 1. EAWAG, Kastanienbaum, <http://www.rhone-thur.eawag.ch/publikationen.html>.

Joos, N. (2003). Spatial-temporal distribution of periphyton in the lower parts of the River Thur: The influence of morphology, hydraulics and hydrology. Diplomarbeit. ETH Zürich/EAWAG Dübendorf, <http://www.rhone-thur.eawag.ch/publikationen.html>.

Meier, W. (2002). Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen. Dissertation ETH Nr. 14526. Ökostrom Publikation Band 11.

Rey, P. und J. Ortlepp (1998). Fischbiologisches Monitoring – Zwischenbericht November 1998. HYDRA – Institut für angewandte Hydrobiologie. Konstanz.