Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 95 (2003)

Heft: 11-12

Artikel: EInfluss von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Abfluss der Thur

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939502

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Einfluss von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Abfluss der Thur

Gruppe «Klima und Hydrologie» der Fallstudie Thur, ETH Zürich

Die Fallstudie «Thur – Perspektiven einer Flusslandschaft»

Moderne Umweltforschung lässt sich nicht in einem Trockenschwimmkurs lernen. Die Studierenden der Umweltnaturwissenschaften an der ETH bearbeiten deshalb während eines halben Jahres ein komplexes Umweltproblem im Rahmen einer Fallstudie und üben dabei die interdisziplinäre Teamarbeit. Von Oktober 2002 bis Februar 2003 analysierten 35 Studierende und 10 Forscherinnen und Forscher der ETH Zürich die Revitalisierungsprojekte an der Thur.

Kanalisierter Wildfluss erhält Lebensraum

Die Thur verhält sich wie ein Wildfluss, da kein See ihre Hochwasserspitzen ausgleicht. Von einem Tag auf den andern kann die Wasserführung um mehr als das Zehnfache ansteigen. Die Thur erreicht dann im Unterlauf die Mächtigkeit des Rheins bei Basel. Deshalb hat der Kanton Thurgau schon 1846 mit einer umfassenden Gewässerkorrektion begonnen. Der ehemalige Wildfluss ist heute begradigt und kanalisiert. Dem verheerenden Hochwasser vom August 1978 hielten die alten Dämme jedoch zum Teil nicht mehr stand, und ein beträchtlicher Teil der Thurebene wurde überflutet. Damals entbrannte eine heftige Diskussion um die Hochwassergefahren, die von stark kanalisierten Flüssen ausgehen. Das Bundesamt für Wasser und Geologie, BWG, verlangt heute bei Hochwasserschutzprojekten auch eine ökologische Aufwertung.

Die fünf Thur-Kantone, St. Gallen, Thurgau, Zürich und die beiden Appenzell, haben sich im September 2001 auf eine mutige Kombination von Ökologie und Hochwasserschutz an der Thur geeinigt. Verschiedene Projekte zur Aufweitung des Gewässerlaufs sind bereits realisiert oder in Arbeit. Dadurch entwickelt die Thur bei Uesslingen und bei Niederneunforn bis heute wieder eine naturnahe Flussdynamik. Andere Aufweitungsprojekte sollen den Wasserrückhalt verbessern und sind z.B. zwischen Weinfelden und Bürglen in der Planungsphase. Dank dem koordinierten Vorgehen der beteiligten Kantone wird heute an der Thur die grösste Serie von naturnahen Hochwasserschutzprojekten in der Schweiz entwickelt, welche für künftige Flussbauprojekte wegweisend sind. Deshalb werden die Aufweitungsstrecken und die entsprechenden Wasserbauprojekte von verschiedenen Forschungsinstitutionen des ETH-Bereichs im Rahmen des «Rhone-Thur-Projektes» wissenschaftlich untersucht. Dieses Forschungsprojekt bot dem Fallstudiensemester ein aktives Umfeld, um theoretisches und praktisches Wissen auf eine relevante Problemstellung anzuwenden. Die verantwortlichen Stellen für die Thur-Revitalisierung in den Kantonen Thurgau und Zürich unterstützten die Fallstudie massgeblich mit ihrem Wissen und mit ihren Kontaktnetzen.

Studierende evaluieren die Revitalisierungsprojekte

Die Aktivitäten der Thur-Fallstudie wurden auf sechs Arbeitsgruppen aufgeteilt, welche von Tutorinnen und Tutoren fachlich und inhaltlich begleitet wurden. Vier Teams haben konkrete Revitalisierungsprojekte analysiert. Dabei wurden z.B. die Fragen bearbeitet, wie die Projektträger mit der Bevölkerung in Dialog treten, wie Projektvarianten evaluiert werden können, wie die ökologische Vielfalt gefördert werden kann und aufgrund welcher Kriterien man den Erfolg von Revitalisierungsprojekten beurteilen sollte. Eine Umfrage bei der betroffenen Bevölkerung in Bürglen und Weinfelden ergab, dass sich die meisten Anwohner einen ökologisch aufgewerteten Flusslauf wünschen, der jedoch für Freizeitaktivitäten zugänglich sein muss. Eine vergleichende ökologische Analyse der Thur mit dem Wildfluss Tagliamento in Italien hat deutlich gemacht, dass der Thur vor allem die Flachwasserzonen fehlen, welche für Vögel, Fische und Kleintiere besonders wertvoll sind. Flussaufweitungen ermöglichen daher vielfältige Synergien zwischen Ökologie, Hochwasserschutz und den Erholungsbedürfnissen der Bevölkerung. Die Kosten solcher Revitalisierungsprojekte bewegen sich typischerweise zwischen 1000 und 5000 Franken pro Laufmeter. Bei grösseren Projekten sollte deshalb eine Erfolgskontrolle abklären, ob die ökologischen Ziele erreicht werden und ob die naturnahen Flussstrecken bei der Bevölkerung positive Resonanz finden.

Änderungen in der Landnutzung und der Klimawandel werden in Zukunft sowohl die Hochwasserrisiken als auch die Gewässerqualität beeinflussen. Zwei weitere Arbeitsgruppen haben während der Thur-Fallstudie mit numerischen Simulationsmodellen gearbeitet, um diese Fragen anzugehen. Die Ergebnisse der Gruppe «Klima und Hydrologie» werden in diesem Artikel vorgestellt.

Zusammenfassung

Hydrologische Prozesse eines Flusseinzugsgebietes werden durch das Klima, die Bodeneigenschaften und die Art der Landnutzung beeinflusst. In der Arbeitsgruppe «Klima und Hydrologie» der Fallstudie Thur wurde die Frage untersucht, inwieweit sich Veränderungen im Bereich des Klimas und der Landnutzung auf das Abflussregime der Thur auswirken. Anhand von Trends in Daten des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) und des Bundesamtes für Statistik (BFS) wurde für beide Einflussfaktoren je ein Szenario mit einem Zeithorizont von 100 Jahren entwickelt. Das Klimaszenario beinhaltete einen deutlichen Temperaturanstieg und eine durchschnittliche Erhöhung der Niederschläge. Zusätzlich wurden bei den Niederschlägen Verschiebungen in der jahreszeitlichen Verteilung berücksichtigt. Das Landnutzungsszenario umfasste einerseits eine deutliche Erweiterung der Siedlungsfläche, andererseits eine Zunahme der Verwaldung in Bergregionen auf Kosten landwirtschaftlicher Nutzflächen.

Um abschätzen zu können, wie sich die in den Szenarien angenommenen Veränderungen auf das Abflussregime der Thur auswirken, wurde das Wasserhaushaltssimulationsmodell (WaSiM) der ETH-Zürich verwendet. Die Berechnungen des WaSiM zeigen, dass das Abflussregime der Thur vor allem durch das Klima beeinflusst wird und Nutzungsänderungen des Bodens von untergeordneter Bedeutung sind. Weiter zeigen die Berechnungen eine Verlagerung der grössten Abflussmengen vom Sommer in den Winter und eine entsprechende Zunahme von winterlichen Hochwasserereignissen und sommerlichen Niedrigwasserereignissen.

1. Einleitung

Bei der Planung und Durchführung wasserbaulicher Massnahmen wird heute meist ein langfristig konstantes Abflussregime angenommen. Die für die Bemessung relevanten Rückkehrperioden werden dabei aus Abflussdaten der Vergangenheit ermittelt. Angesichts der erwarteten Klimaänderung ist diese Annahme eines kostanten Klimas in Frage zu stellen. Gemäss dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ist bis zum Jahre 2100 mit einer mittleren globalen Erwärmung von zwischen 1,4 und 5,8 °C zu rechnen. Von dieser Erwärmung werden die kontinentalen Landflächen der mittleren und hohen Breiten überdurchschnittlich betroffen sein. Die dazugehörige Verschiebung der Klimazonen wird vielerorts zu Veränderungen des Wasserkreislaufes führen (IPCC 2001). Für Zentraleuropa wird im Winterhalbjahr mit einer Intensivierung des Wasserkreislaufes gerechnet, während im Sommer eher mit einer Abnahme der Niederschlagsmengen (Giorgi et al. 2001) – möglicherweise verbunden mit einer Zunahme der Starkniederschläge (Christensen und Christensen 2002) – gerechnet werden muss. Diese Szenarien werden auch durch kürzliche Simulationen mit dem Regionalen Klimamodell der ETH (Vidale et al. 2003) bestätigt. Hydrologische Modelle, welche mit entsprechenden Klimaszenarien angetrieben werden, illustrieren die grosse Sensitivität der Abflussregimes auf einen derart veränderten Klimaantrieb (Schädler et al. 1990; Gurtz et al. 1997; Kleinn 2002).

Auch Klimareihen der Vergangenheit illustrieren, dass die Annahme eines konstanten Klimas neu überdacht werden sollte. Für die Alpennordseite und das Winterhalbjahr zeigen Beobachtungen der letzten 100 Jahre eine statistisch signifikante Zunahme der Niederschläge um bis zu 30% (Schmidli et al. 2002), eine deutliche Zunahme der intensiven Tagesniederschläge (Frei und Schär 2001) und einen Anstieg der mittleren Abflussmengen und Abflussspitzen (Birsan et al. 2003). Diese beobachteten Veränderungen sind qualitativ konsistent mit Szenarien des zukünftigen Klimas. Ein Zusammenhang mit der Klimaänderung kann jedoch nicht mit Sicherheit nachgewiesen, aber ebenso wenig ausgeschlossen werden.

Nebst dem Klima ist auch die Nutzung und Entwicklung des Bodens einem starken Wandel unterworfen. In den letzten 100 Jahren hat sich die Landnutzung in der Schweiz stark verändert. Auf dem engen Raum im Mittelland der Schweiz konkurrieren wachsende Siedlungen mit der Landwirtschaft um Boden. Seit einigen Jahrzehnten verliert die Landwirtschaft in der gesamten Schweiz an Fläche. An deren Stelle machen sich im ebenen Gelände neue Siedlungsflächen breit, während in steilen und abgelegenen Lagen Wald aufkommt (BFS 2001).

Im Rahmen der Fallstudie «Thur – Perspektiven einer Flusslandschaft» (siehe Kasten) wurde an der ETH Zürich der Einfluss von Klima- und Landnutzungsänderungen auf das Einzugsgebiet der Thur untersucht. Dazu wurden Klima- und Landnutzungsszenarien für das Thureinzugsgebiet entwickelt und die Hydrologie der Thur anhand dieser Szenarien simuliert.

Das Einzugsgebiet der Thur liegt in der Nordostschweiz zwischen dem Walensee im Süden, dem Rheintal im Osten, dem Bodensee im Norden und den Höhenzügen des Toggenburg im Westen. Das Thurgebiet hat eine Fläche von 1700 km^2. Von Nord nach Süd nimmt der Gebirgscharakter stark zu. Die Thur entspringt im oberen Toggenburg, fliesst via Wattwil, Wil, Bischofszell und Weinfelden ins Zürcher Weinland. In Andelfingen mündet sie nach einer Lauflänge von 127 km in den Rhein. In die Thur selbst münden zwei grössere Nebenflüsse: bei Frauenfeld die Murg und bei Bischofszell die Sitter. Der Unterlauf der Thur ist durch Hochwasserschutzprojekte stark beeinflusst. Gegenwärtig ist die zweite Thurkorrektion in der Planungsphase (Baumann 2003).

Zur besseren Differenzierung wurde eine Unterteilung des gesamten Einzugsgebiets in 12 Teileinzugsgebiete vorgenommen. Diese Unterteilung richtete sich nach den vorhandenen Abflussmessstellen der Landeshydrologie des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG). Jedes der 12 Teileinzugsgebiete ist durch einen Pegel abgeschlossen und bildet in der Abflussmodellierung eine Bilanzeinheit. In Bild 1 sind diese 12 Teileinzugsgebiete mit den Namen der Messstellen und der Gewässer dargestellt (nach Schulla 1997).

2. Das hydrologische Modell WaSiM

2.1 Modellbeschreibung

Hauptwerkzeug dieser Studie war das Wasserhaushalts-Simulationsmodell WaSiM der ETH Zürich. WaSiM ist ein modular aufgebautes Modell zur Simulation von Prozessen, die für die Oberflächenhydrologie von Einzugsgebieten wichtig sind. Das verwendete Modell WaSiM wurde am Institut für Atmosphäre und Klima (IAC) und dem Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft (IHW) der ETH Zürich entwickelt. Das Modell ist bereits früher für das Thurgebiet regionalisiert, kalibriert und validiert worden (Schulla 1997).

Die räumliche Auflösung kann in diesem Modell durch ein regelmässiges Gitter mit beliebiger Gitterweite realisiert werden. Im Rahmen der Fallstudie wurde die Gitterweite auf einen Kilometer festgelegt. Zur Bildung von Wasserhaushaltsbilanzen kann eine zusätzliche Unterteilung in beliebige Zonen, etwa in Teilgebiete oder Höhenstufen, erfolgen. Im Falle der Thurmodellierung wurde das gesamte Einzugsgebiet der Thur in 12 Teileinzugsgebiete unterteilt. Neben einem digitalen Höhenmodell wurden flächendifferenzierte Bodenarten- und Landnutzungsdaten verwendet.

Um die Dynamik der Abflussbildungsprozesse zu erfassen, kann das Modell mit Zeitschritten zwischen einigen Minuten und einem Tag arbeiten. Diese Studie benutzte einen Zeitschritt von einer Stunde, bei der Datenauswertung hingegen Tagesmittelwerte.

Als meteorologische Eingangsdaten benötigt das Modell Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit bzw. Dampfdruck. Das Modell berücksichtigt, ob der Niederschlag als Regen oder Schnee fällt, und modelliert Prozesse wie die Schneeakkumulation und -schmelze. Weiter liefert das Modell Verdunstungs- und Bodenwasserhaushaltsberechnungen. Die wichtigste Output-Grösse für diese Studie war der Abfluss. Daneben liefert das Modell aber auch Informationen über Schneespeicher, Bodenwasserhaushalt, Verdunstung, Schneeschmelze usw. (vergleiche Kleinn 2002).

2.2 Modellgüte

Das hydrologische Modell beinhaltet Parameter, welche für das Thureinzugsgebiet angepasst werden müssen. Diese Anpassungen werden anschliessend für eine von der Kalibrierung unabhängige Zeitperiode auf ihre Qualität überprüft. Für die Kalibrierung des Modells wurden stündliche Abflussdaten (Daten des Bundesamtes für Wasser und Geologie) von den 12 Pegeln im Thureinzugsgebiet genutzt (Bild 1). Dazu diente wie bei Schulla (1997) das Jahr 1984. Als Validierungsperiode wurde der Zeitraum 1981 bis 2000 gewählt (abzüglich der Kalibrationsperiode). Diese Periode enthält das Hochwasser vom Mai 1999.

Um Aussagen über die Modellgüte machen zu können, ist eine Kontrollsimulation notwendig. Dabei wird das Modell mit den meteorologischen Daten der MeteoSchweiz der Jahre 1981–2000 sowie den aktuellen Landnutzungsdaten angetrieben. Das somit berechnete hydrologische Regime wird anschliessend mit den gemessenen hydrologischen Daten derselben Zeitperiode verglichen.

Im Thureinzugsgebiet existieren 41 Messstationen für Wetter- und Klimadaten (MeteoSchweiz). Die Messdaten dieser Stationen werden durch ein Interpolationsverfahren auf die Gittergrösse des Modells umgerechnet. Da konventionelle Regenmessungen durch Wind- und Temperatureffekte verfälscht werden, wird zuvor eine Niederschlagskorrektur vorgenommen. Weil die Messstationen nicht regelmässig über das Thureinzugsgebiet verteilt sind (Bild 1), entstehen bei der Interpolation des Niederschlags Ungenauigkeiten. Dies trifft vor allem auf kleinere Teilgebiete zu, die nur mit einer oder zwei Messstationen bestückt sind. Für Teileinzugsgebiete mit deutlich mehr als zwei Messstationen ist der entsprechende Fehler meist klein.

Es folgt damit, dass die simulierten Abflussmengen mit zunehmender Grösse des betrachteten Einzugsgebietes an Qualität gewinnen. Ein Vergleich der berechneten und gemessenen Abflusswerte im Hochwasserjahr 1999 verdeutlicht die Situation. Die Simulation am Pegel Andelfingen, die fast das ganze Thureinzugsgebiet beinhaltet, zeigt eine bessere Übereinstimmung mit den Beobachtungen (Bild 2a) als der Pegel Appenzell mit nur zwei Messstationen (Bild 2b). Da in dieser Arbeit hauptsächlich Veränderungen für das gesamte Thureinzugsgebiet betrachtet wurden, darf von einer hohen Güte der berechneten Abflüsse ausgegangen werden.

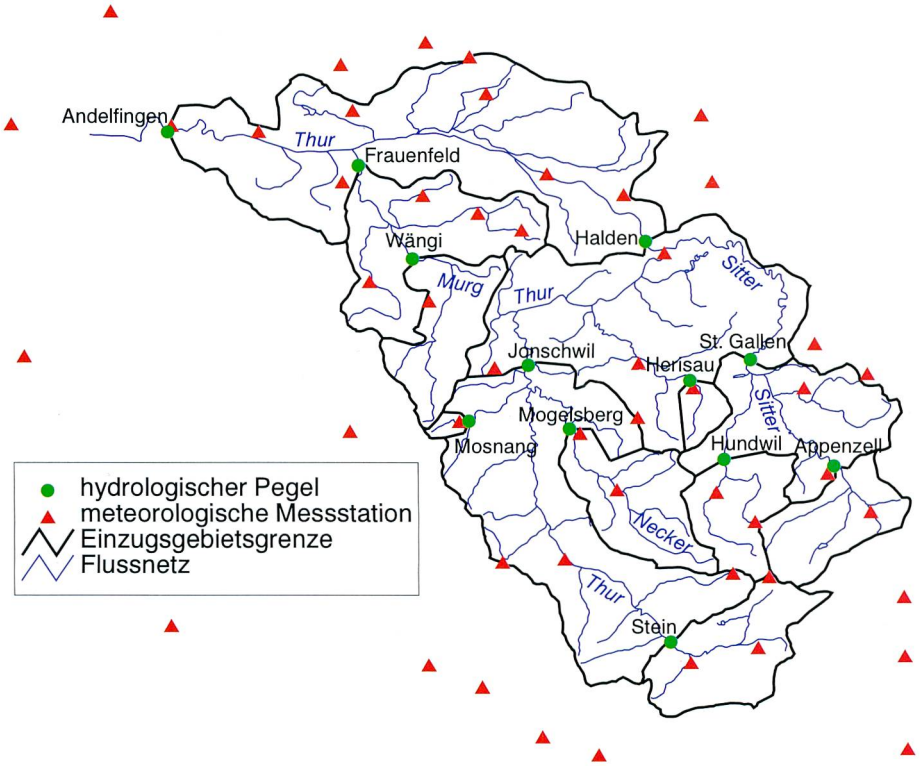

Bild 1. Das Thureinzugsgebiet, mit den Teileinzugsgebieten, den meteorologischen Stationen, den Pegeln und dem Flussnetz.

3. Methoden und Vorgehen

Um die Auswirkungen der erwarteten Klima- und Landnutzungsänderungen zu berücksichtigen, wurden entsprechende Szenarien für den Zeitraum der nächsten 100 Jahre formuliert. Ausgangslage für die Erstellung des Klimaszenarios waren bereits bestehende Klimaszenarien des IPCC. Als Basis für das Landnutzungsszenario dienten Erhebungen des Bundesamtes für Statistik (BFS).

Das hydrologische Modell WaSiM wurde mit diesen Szenarien angetrieben und generierte daraus die dazugehörigen hydrologischen Daten, welche eine Analyse der Veränderungen des Abflussregimes der Thur aufgrund der angenommenen Szenarien erlaubten. Diese Resultate der verschiedenen Szenarien wurden mit den Ergebnissen der Kontrollsimulation verglichen.

Für die zwei hier genauer betrachteten Szenarien wurde die Zeitperiode des Kontrolllaufes (1981–2000) erneut simuliert. Im Falle des Klimaszenarios wurde den antreibenden meteorologischen Daten eine mittlere Klimaänderung aufgeprägt. Die stündlichen Temperatur- und Niederschlagswerte der Kontrollperiode wurden dazu um einen jahreszeitlich variablen Betrag verändert, welcher aus dem Klimaszenario hervorging. Im Falle des Landnutzungsszenarios wurde die Kontrollperiode unter den gegenwärtigen Klimabedingungen wiederholt, aber unter Verwendung einer zukünftigen hypothetischen Landnutzung (siehe Tabelle 1).

3.1 Klimaszenario

Eine gute Ausgangslage für die Bildung eines Klimaszenarios bieten die vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) erstellten SRES-Treibhausgasszenarien (IPCC 2001). Die SRES-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios) beschreiben die zu-

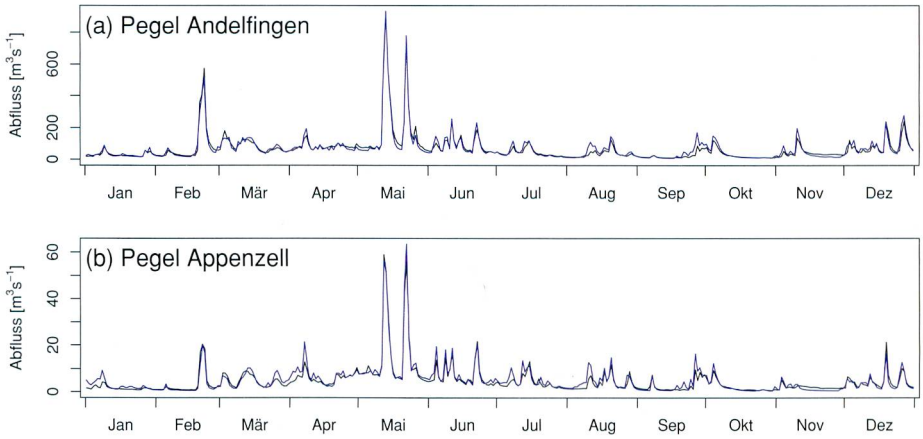

Bild 2. Berechneter (schwarz) und gemessener (blau) Abfluss (m^3s^{-1}) für das Hochwasserjahr 1999: (a) Pegel Andelfingen, (b) Pegel Appenzell.

Szenario	Szenariobeschreibung
Kontrolllauf	Meteorologische Daten der Jahre 1981–2000 und Landnutzungsdaten der Gegenwart
Klimaszenario	Zunahme der Temperatur um 3 °C, durchschnittliche Zunahme der Niederschläge um 7%, Niederschlagsverteilung gemäss Bild 3
Landnutzungsszenario	Verdoppelung der heute bestehenden Siedlungsfläche, Verwaldung der landwirtschaftlichen Nutzfläche oberhalb 1000 m ü.M.

Tabelle 1. Überblick über die durchgeführten Simulationen.

künftige Entwicklung klimaaktiver Substanzen in der Atmosphäre. Sie berücksichtigen Bevölkerungswachstum, ökonomische und soziale Entwicklungen, technologische Veränderungen sowie Ressourcenverbrauch und Umweltmanagement für die nächsten 100 Jahre. Die verwendeten Szenarien gehen davon aus, dass die Weltbevölkerung weiter zunimmt, dass sich die ökonomische und technologische Entwicklung im Vergleich zu heute etwas verlangsamt und – für einen Teil der Szenarien – dass der Umweltschutz ein bedeutendes gesellschaftliches Anliegen wird.

Von diesen Annahmen ausgehend wurde ein Ad-hoc-Szenario für Temperatur- und Niederschlagsänderungen im Thurgebiet formuliert. Ein solches Szenario stellt einen plausiblen Konsens der vorliegenden mit globalen Klimamodellen erzeugten Klimaszenarien dar. Im Wesentlichen wurden die grossräumigen Klimatrends Europas auf das Thurgebiet übertragen.

Bei der Bestimmung der Temperaturzunahme für das Klimaszenario bildeten die SRES-Szenarien A2 und B2 die Grundlage. Es wurden Klimaszenarien von 7 verschiedenen Modellen untersucht. Die damit gewonnenen Klimasimulationen zeigen alle eine deutliche Erwärmung, aber in unterschiedlicher Ausprägung. Der Jahresmittelwert der Erwärmung variiert bis zum Ende dieses Jahrhunderts je nach Szenario und Modell zwischen zirka 1 und 4 °C. Der Einfachheit halber wurde in dieser Studie mit einer jahreszeitlich konstanten Erwärmung von 3 °C gearbeitet.

Klimamodelle basierend auf den SRES-Szenarien bilden die Basis für die Abschätzung zukünftiger Niederschläge. Tendenziell lassen die Klimamodelle für Zentraleuropa eine deutliche Zunahme der Winterniederschläge (Dezember bis Februar) und eine schwache Abnahme der Sommerniederschläge (Juni bis August) erwarten, wobei die Amplitude dieses Effekts stark vom jeweiligen Modell und Szenario abhängt.

Diese Abschätzungen wurden als Ausgangslage für das Niederschlagsszenario verwendet, wobei bei der Gewichtung der verschiedenen Szenarien auch die Trends des letzten Jahrhunderts und das physikalische Prozessverständnis berücksichtigt wurden.

Für Januar wurde mit einer Niederschlagszunahme von 30% gerechnet, für Juli mit einer Reduktion um 10%. Die Werte zwischen diesen maximalen Änderungen wurden durch eine angepasste Sinusfunktion dargestellt (Bild 3). Daraus folgt eine durchschnittliche Zunahme der Niederschläge von rund 7% über das gesamte Jahr.

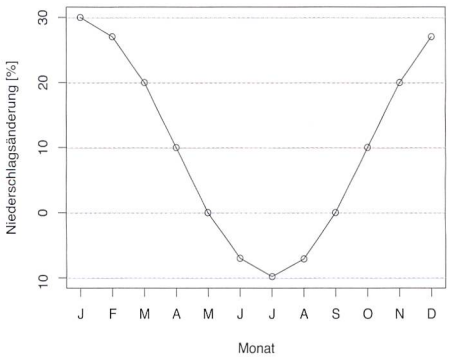

Bild 3. Monatliche Änderung der Niederschlagsintensitäten in % (verwendet für das Klimaszenario).

Das so gewonnene Klimaszenario muss als vergleichsweise moderates Szenario bezeichnet werden. Man beachte insbesondere, dass sich die Wintertemperaturen im Alpenvorland in den letzten 100 Jahren um etwa 1,5 °C erhöht und dass die Winterniederschläge im selben Zeitraum um bis zu 30% zugenommen haben.

3.2 Landnutzungsszenario

Das Bundesamt für Statistik liefert gute Informationen über die Landnutzung und ihre Veränderungstendenzen (BFS 2001). Als Ausgangslage für die Ermittlung des Landnutzungsszenarios wurde ein Datensatz des BFS mit einer Auflösung von 1 km^2 verwendet, welcher als Ist-Zustand im hydrologischen Modell bereits implementiert war.

Für die Bildung des Landnutzungsszenarios wurde von folgenden Veränderungstendenzen der Landnutzung ausgegangen:

- Veränderungen der Siedlungsflächen: Zunahme der Siedlungsfläche um rund 10% in 10 Jahren (Abschätzung aus BFS-Daten)
- Veränderungen landwirtschaftlicher Nutzflächen: Abnahme um 3% in 10 Jahren (Abschätzung aus BFS-Daten), Verwaldung sämtlicher landwirtschaftlicher Nutzflächen oberhalb von 1000 m ü.M.

Auf der Basis der Datenerhebung des BFS wurde schliesslich folgendes Landnutzungsszenario entwickelt:

- Verwaldung sämtlicher landwirtschaftlicher Nutzflächen oberhalb von 1000 m ü.M.
- Verdoppelung der Siedlungsfläche der schon bestehenden Siedlungen auf Kosten landwirtschaftlicher Nutzflächen

Die folgenden Abbildungen zeigen die aktuelle und die zukünftige Landnutzung. Bild 4a stellt den Ist-Zustand dar, wie er in der Kontrollsimulation verwendet wurde. Bild 4b zeigt das Landnutzungsszenario mit einer Verwaldung oberhalb von 1000 m ü.M. und einer Verdoppelung der Siedlungsfläche. Die Verdoppelung der Siedlungsfläche (rot) führt zu grossen Ballungszentren in tiefer liegenden Teilen des Einzugsgebietes, während sich die Verwaldung (dunkelgrün) fast ausschliesslich auf die Bergregion des Toggenburgs und Alpsteins beschränkt.

4. Auswertungen und Interpretation der Resultate

Für die Auswertung der Resultate wurden die Einzugsgebiete Andelfingen, Halden und Jonschwil genauer betrachtet (Bild 1). Somit wurden bei der Auswertung ein Einzugsgebiet mit einer hohen Modellgüte (Andelfingen), eines mit einem geplanten Rückhaltebecken (Halden) und auch ein Einzugsgebiet des Oberlaufs mit einem hohen Waldanteil (Jonschwil) berücksichtigt. Folgende Daten und Resultate wurden mit täglicher Auflösung in die Auswertungen einbezogen:

- Abfluss in [m^{3}s^{-1}] am Pegel
- Verdunstung in [m^{3}s^{-1}] in den einzelnen Teileinzugsgebieten
- Niederschlag in [m^{3}s^{-1}] in den einzelnen Teileinzugsgebieten
- Schneespeicher in [mm] Wasseräquivalent in den einzelnen Teileinzugsgebieten
- Temperatur in [°C]

Das Modell berechnet die Output-Daten in Stundenschritten. Für die Darstellung wurden diese Stundenwerte in Monats-

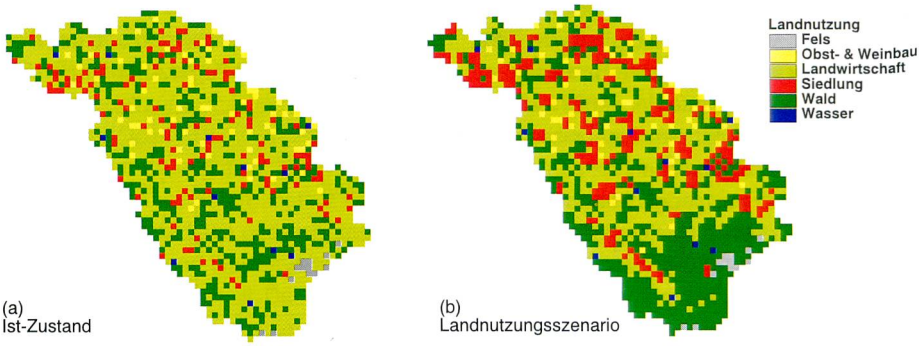

Bild 4. Landnutzungsszenario: (a) Ist-Situation der Landnutzung im Thureinzugsgebiet, (b) Situation der Landnutzung bei einer Verdoppelung der Siedlungsfläche und einer Verwaldung oberhalb von 1000 m ü.M.

mittelwerte umgerechnet und jeweils von November bis Oktober (hydrologisches Jahr) aufgetragen.

4.1 Resultate Klimaszenario

4.1.1 Veränderungen bei den Abflüssen

Das Klimaszenario zeigt grosse Änderungen im Vergleich zur Kontrollsimulation. Grosse Unterschiede zeigen sich in der Abflussmenge, der Verdunstung und im Schneespeicher. Sowohl die mittlere jährliche Abflussmenge wie der Jahresgang des Abflusses ändern sich stark (Bild 5). Das heutige Flussregime zeigt eine ausgeprägte Sommerspitze mit den maximalen Abflüssen in den Monaten April bis Juni, während im Fall des Klimaszenarios die maximalen Abflüsse in den Monaten Dezember und März erfolgen. Die Monate mit hohen Abflüssen verschieben sich somit vom Sommer in der Kontrollsimulation (heutiges Klima) auf den Winter im Klimaszenario.

Ein Vergleich zwischen heutigen Abflüssen und dem Abfluss im Klimaszenario zeigt, dass die mittleren monatlichen Abflüsse bei allen Pegeln in den Monaten November bis März zunehmen, während sie in den Monaten April bis Oktober abnehmen. Die verhältnismässig grösste Abnahme wird im August mit zirka –30% erreicht, obschon die Niederschläge in den Sommermonaten nur um rund 10% abnehmen. Die grösste Zunahme des Abflusses tritt im Dezember mit rund +20% auf. Über das ganze Jahr gesehen nimmt die Abflussmenge über das gesamte Einzugsgebiet um rund 9% ab, obwohl die totale Niederschlagsmenge um 7% zunimmt.

Die Verschiebung der Abflussspitzen in tief gelegenen Einzugsgebieten auf die Wintermonate kann darauf zurückgeführt werden, dass bei wärmeren Wintertemperaturen ein deutlich grösserer Anteil der Niederschläge nicht mehr als Schnee, sondern als Regen fällt (Bild 6). Der Abfluss aus dem Schneespeicher nimmt in einem wärmeren Klima (Klimaszenario) deutlich ab. Dieser Effekt verringert die Abflusszeit der gefallenen Niederschläge erheblich, sodass die Wassermenge, welche heute als Schnee bis in den Frühling hinein im Einzugsgebiet liegen bleibt, im Klimaszenario mit kurzer Verzögerung bereits wieder abfliesst.

Die Abnahme der jährlichen Abflussmenge trotz zunehmenden Niederschlägen kann damit erklärt werden, dass die Verdunstung während des gesamten Jahres höher liegt. So steigt die mittlere jährliche Verdunstung im Teileinzugsgebiet Andelfingen um 24%, im Teileinzugsgebiet Halden um 29% (Bild 7) und im Teileinzugsgebiet Jonschwil gar um 36%.

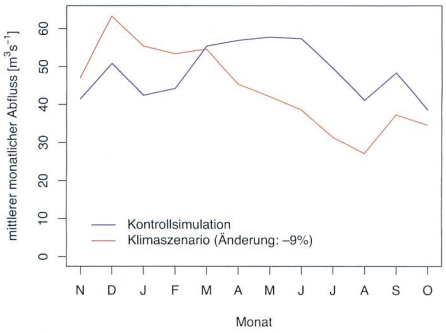

Bild 5. Vergleich der Abflüsse (m^3s^{-1}) zwischen Kontrollsimulation und Klimaszenario am Pegel Andelfingen.

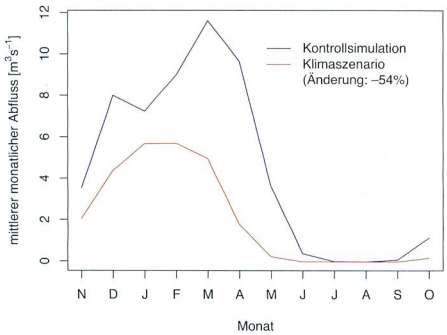

Bild 6. Vergleich der Abflüsse (m^3s^{-1}) aus dem Schneespeicher zwischen Kontrollsimulation und Klimaszenario am Pegel Jonschwil.

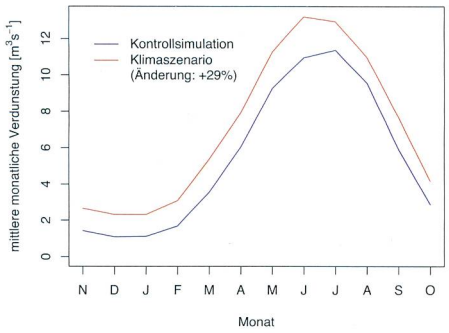

Bild 7. Vergleich der Verdunstung (m^3s^{-1}) zwischen Kontrollsimulation und Klimaszenario im Teileinzugsgebiet Halden.

Wird für die Pegel das Verhältnis zwischen Verdunstung und Niederschlagsmenge für den Monat Juli berechnet, so ergeben sich für das Klimaszenario folgende Werte: Bis zum Pegel Jonschwil verdunsten im Schnitt 43% des Niederschlags, bis zum Pegel Halden schon 53% und im ganzen Einzugsgebiet der Thur bis Andelfingen verdunsten durchschnittlich 59% des Niederschlags. Zum Vergleich: Im ganzen Thureinzugsgebiet verdunsteten im Juli in der Periode 1981–2000 durchschnittlich 46% des Niederschlags.

Im Teileinzugsgebiet Andelfingen verdunstet gemäss Klimaszenario von Mai bis Juli gleich viel Wasser, wie die Niederschläge in dieser Periode liefern. Das bedeutet, dass im Teileinzugsgebiet Andelfingen im Mittel Mai bis Juni netto kein Wasser den Flüssen oder dem Grundwasser zufliesst. Das Wasser am Pegel Andelfingen stammt somit hauptsächlich aus den höher gelegenen Teileinzugsgebieten der Thur und aus dem Grundwasserspeicher. Wie viel Wasser dem Grundwasserspeicher entzogen wird, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

4.1.2 Veränderung bei der Häufigkeit von Extremereignissen

Die relative kumulative Häufigkeit von Abflussereignissen zeigt die Häufigkeit auf, mit welcher eine bestimmte Abflussmenge überschritten wird. Der minimale Abfluss hat somit die relative kumulative Häufigkeit 1. Werden die Abflusshäufigkeiten im Klimaszenario betrachtet (Bild 8), zeigt sich eine Tendenz zu vermehrten Hoch- und Niedrigwasserereignissen.

Im Winter (Bild 8a) liegt die Kurve der kumulierten Häufigkeiten des Klimaszenarios deutlich über der Kurve der beobachteten kumulierten Häufigkeiten. Daraus lassen sich folgende Aussagen ableiten: Erstens, die maximale tägliche Abflussmenge des stärksten winterlichen Hochwasserereignisses wächst im Mittel von heute beobachteten ~60 m^3s^{-1} auf zirka 75 m^3s^{-1} im Klimaszenario (die Häufigkeit dieses Ereignisses beträgt ca. $^1/_{100}$, da 3 Monate betrachtet werden). Zweitens, die Häufigkeit von Ereignissen mit ~40 m^3s^{-1} Tagesabfluss wächst von 2,2 Ereignissen pro Winter (Häufigkeit ~0,02) auf über 5 Ereignisse pro Winter. Damit folgt, dass die Häufigkeit von winterlichen Hochwasserereignissen in diesen Kategorien um mehr als einen Faktor 2 zunimmt.

Die umgekehrte Situation zeigt sich im Sommerhalbjahr (Bild 8b). Die Kurve der kumulierten Häufigkeiten des Klimaszenarios verläuft klar unterhalb der Kurve der beobachteten kumulierten Häufigkeiten. Die maximalen sommerlichen Abflussmengen nehmen somit deutlich ab. Parallel dazu steigt die Häufigkeit von sommerlichen Niedrigwassern.

4.1.3 Weitergehende Fragestellungen

Das Abflussregime ändert seine Charakteristik im Klimaszenario grundlegend. Die Änderungen im Abflussregime hängen direkt mit den Szenarioannahmen zusammen (Erwärmung, Niederschlagszunahme im Winter, Abnahme im Sommer) und gelten nur unter diesen meteorologischen Bedingungen. Aus den Resultaten ergeben sich weitergehende Fragestellungen, die in einer zukünftigen Studie vertieft bearbeitet werden müssten, um fundierte Aussagen machen zu können:

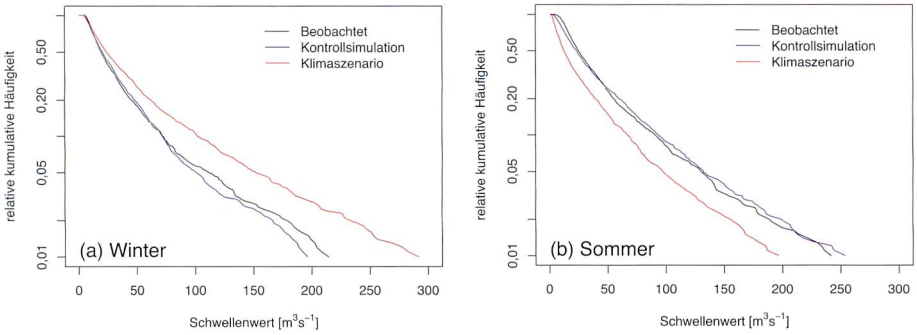

Bild 8. Relative kumulative Häufigkeit von täglichen Abflüssen: (a) Pegel Halden im Winter, (b) Pegel Halden im Sommer. Die kumulative Häufigkeit entspricht der Wahrscheinlichkeit, mit welcher der Schwellenwert überschritten wird.

- Fallen kleinere Bäche im Teileinzugsgebiet Andelfingen, die nicht vom Grundwasser oder von Quellen mit grossem Reservoir gespiesen werden, in den Sommermonaten in einem wärmeren Klima trocken?
- Wie verändern sich die Grundwasserneubildung und der Grundwasserspiegel im Teileinzugsgebiet Andelfingen in einem wärmeren Klima?
- Welchen Einfluss hat die erhöhte Wassertemperatur der Thur auf die Wasserqualität, die Ökologie und den Fischbestand?
- Wie wirken sich die Veränderung des Abflusses und die Verschiebung der Hochwasserereignisse vom Sommer- in die Wintermonate auf die Geschiebeführung der Thur aus?

4.2 Resultate Landnutzungsszenario

Das Bild 9 zeigt den Vergleich des Landnutzungsszenarios mit der Kontrollsimulation im Jahresgang. Die Landnutzungsänderung führt zu geringfügig erhöhten Abflusswerten in der zweiten Jahreshälfte, im Vergleich zum Einfluss durch die Klimaänderung ist der Effekt jedoch sehr klein. Bei der Interpretation dieses Resultats muss berücksichtigt werden, dass für die Landnutzungsänderung zwei Effekte betrachtet werden, welche sich teilweise kompensieren könnten (Verdoppelung der Siedlungsfläche, Verwaldung oberhalb 1000 m). Um diese Frage zu klären, wurden weitere Szenariorechnungen durchgeführt, in welchen die beiden Änderungen separat vorgeschrieben wurden. Diese Rechnungen zeigen, dass der in Bild 9 sichtbare Effekt weitgehend durch die Verdoppelung der Siedlungsfläche zustande kommt und dass der Effekt der Verwaldung in höheren Lagen vernachlässigbar klein ist.

Im Fall der Verdoppelung der Siedlungsfläche auf Kosten landwirtschaftlicher Nutzflächen darf die Hypothese angenommen werden, dass der Abfluss zunimmt, weil das Regenwasser schneller den Gewässern zugeführt wird und deshalb zu einem geringeren Teil verdunstet. Im Gegensatz dazu kann das Regenwasser bei nicht versiegelten Flächen bis zur Sättigung vom Boden aufgenommen und zwischengespeichert werden. Dieser Effekt kann qualitativ in den Modellrechnungen festgestellt werden (Bild 9), ist jedoch quantitativ eher unbedeutend. Die simulierten Änderungen liegen im Bereich der Modellunsicherheit. Frühere Untersuchungen im Murg-Einzugsgebiet kamen ebenfalls zum Ergebnis, dass eine Zunahme der Siedlungsflächen keinen bedeutenden Einfluss auf das Abflussregime hat (Rosso 2000). Der relativ kleine Einfluss der Siedlungsstruktur auf den Wasserhaushalt der Thur begründet sich mit dem vergleichsweise kleinen Flächenanteil der Siedlungsflächen. Für das Gesamtgebiet der Thur (bis Pegel Andelfingen) beträgt der Siedlungsflächenanteil gegenwärtig 7,8%, und im Landnutzungsszenario wird von einer Verdoppelung ausgegangen. Es ist wichtig festzuhalten, dass in kleineren Teileinzugsgebieten, welche hier nicht betrachtet wurden, der Siedlungsflächenanteil wesentlich grösser sein kann, womit auch ein grösserer Einfluss von Landnutzungsänderungen zu erwarten wäre.

Im Fall der Verwaldung landwirtschaftlicher Nutzflächen oberhalb 1000 m ü.M. erhöhen sich die Wasserspeicherkapazität und die Verdunstung in erhöhten Lagen. Dies wiederum müsste zu einer Abnahme der Abflussmengen führen. Auch diese Hypothese wird durch die Simulation bestätigt, die Änderungen im Gesamteinzugsgebiet sind jedoch um fast eine Grössenordnung kleiner als bei einer Verdoppelung der Siedlungsflächen.

5. Schlussfolgerungen

Die geschilderten Resultate für die Landnutzungs- und Klimaszenarien legen nahe, dass zukünftige Änderungen des Abflussregimes der Thur durch Klimaänderungen und Klimaschwankungen dominiert werden. Der erwartete Einfluss der Klimaänderung auf das Abflussregime ist bedeutend grösser als derjenige einer veränderten Landnutzung. Die erwartete Zunahme der Siedlungsfläche und eine starke Verwaldung in höheren Lagen spielen gemäss den Simulationen mit dem hydrologischen Modell eine eher marginale Rolle, zumindest wenn das Gesamteinzugsgebiet der Thur betrachtet wird.

Infolge der Klimaerwärmung wird der Schneeanteil im Niederschlag reduziert und man erwartet eine Verschiebung der maximalen Abflüsse vom Frühjahr und Frühsommer in den Winter. Dieses Resultat ist konsistent mit früheren Arbeiten zum Thema (Gurtz et al. 1997, Kleinn 2002). Parallel dazu erhöht sich die Verdunstung in den warmen Jahreszeiten, was zu einer Reduktion der Abflüsse führt. Diese zwei Prozesse werden durch die erwarteten Änderungen der Niederschläge unterstützt.

Aus der Sicht der Wasserwirtschaft und des Hochwasserschutzes interessieren vor allem die Hoch- und Niederwasserereignisse. Diese werden im Folgenden ausführlicher diskutiert.

5.1 Hochwasserereignisse

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die Häufigkeit von winterlichen Hochwasserereignissen tendenziell zunehmen wird. Ein hohes Potenzial für Hochwasserereignisse ist bei lang andauernden Niederschlagsperioden mit hoher Schneefallgrenze und gesättigten Böden gegeben. Solche Situationen sind im Winterhalbjahr in Zukunft häufiger zu erwarten, sofern die erwarteten Klimaänderungen tatsächlich eintreten sollten. Die Ursache der diskutierten Veränderungen liegt zu einem beträchtlichen Teil in der erhöhten Schneefallgrenze, welche eine schnelle Abflussbildung fördert. Diese Veränderung muss mit einer vergleichsweise hohen Wahrscheinlichkeit erwartet werden. Somit wird dem Hochwasserschutz entlang der Thur auch in Zukunft eine grosse Bedeutung zukommen. Aktuelle Hochwasserspitzen im Frühsommer, wie sie heute vor allem auftreten, nehmen bei der Betrachtung von ge-

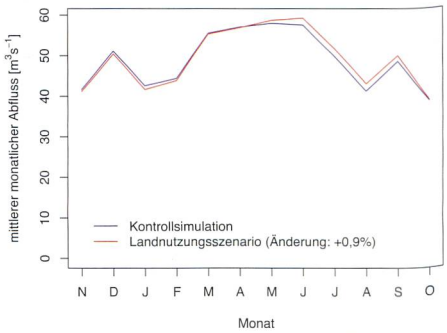

Bild 9. Vergleich der Abflüsse (m^3s^{-1}) zwischen Kontrollsimulation und Landnutzungsszenario am Pegel Andelfingen.

mittelten Tageswerten gemäss Modellrechnungen tendenziell ab. Es ist wichtig, hier zwei Einschränkungen zu machen. Erstens gelten die Aussagen nur für grössere Einzugsgebiete. In kleineren Teileinzugsgebieten können heftige Sommergewitter das Abflussverhalten kurzfristig beeinflussen. Zweitens sind die Klimaszenarien zu den Sommerniederschlägen weit unsicherer als jene für den Winter und dürfen somit nicht überbewertet werden (siehe z.B. Vidale et al. 2003).

Für die Entstehung von Extremhochwassern ist die zeitliche Verteilung der Niederschläge von grosser Bedeutung. In den verwendeten Simulationen wird von derselben Niederschlagsstatistik ausgegangen wie in der Periode 1981 bis 2000. Im Klimaszenario wurde lediglich die Intensität der Einzelereignisse verändert. Wahrscheinlich wird sich aber mit der Klimaänderung nicht nur die Intensität, sondern auch die Struktur der Niederschlagsereignisse verändern. Solche Änderungen wurden im Modell nicht berücksichtigt. Insofern sind die Aussagen über zukünftige Hochwasser mit Vorsicht zu bewerten. Es ist somit schwierig, die neuen Resultate bei der Planung von Hochwasserschutzmassnahmen zu gewichten und umzusetzen. Generell sollten solche Massnahmen flexibel gestaltet werden, sodass auf zukünftige Veränderungen des Abflussregimes reagiert werden kann. In der Zukunft wird es auch zunehmend wichtiger werden, die Erkenntnisse aus Klimaszenarien in die Planung einzubeziehen.

5.2 Niedrigwasserereignisse

Heute treten Niedrigwasserperioden vor allem im Winter und Spätsommer auf. Die Resultate der Szenarien zeigen eine Verschiebung der Niedrigwasserereignisse in die Sommermonate. Daraus ergeben sich Konsequenzen für Nutzer, die auf eine Wasserversorgung durch die Thur angewiesen sind. Die Zunahme von sommerlichen Niedrigwasserereignissen, aber auch die allgemeine Tendenz zu geringeren Abflussmengen kann zu erhöhten Belastungen des Flusses mit Stoffen aus Landwirtschaft und Siedlungsabwässern führen. Führt der Fluss nur wenig Wasser, erhöht sich entsprechend die Konzentration der Stoffe, die von den Abwasserreinigungsanlagen in den Fluss geleitet werden. Schon heute ist die Wasserqualität bei Niedrigwasser im Sommer teilweise mangelhaft. Wie stark diese Auswirkungen in Zukunft sein werden, kann im Rahmen dieser Studie nicht abgeschätzt werden.

Auch die Landwirtschaft ist für Bewässerungszwecke auf Thurwasser angewiesen. Besonders in den tiefer gelegenen Thureinzugsgebieten wird heute Thurwasser für die Bewässerung von landwirtschaftlichen Kulturen verwendet. Die Resultate weisen auf eine deutliche Abnahme der Abflüsse in den bewässerungsintensivsten Monaten hin. Geringere Abflussmengen im Sommer könnten in Zukunft zu Konflikten zwischen der landwirtschaftlichen Nutzung und Naturschutzanliegen führen. Allerdings sind die Simulationen für Niedrigwasser deutlich unsicherer als Simulationen für mittlere Abflussmengen. Insofern sind diese Aussagen mit Vorsicht zu bewerten.

Die Simulationen zeigen, dass die Verdunstung in den Sommermonaten erheblich zunimmt. Da in diesen Jahreszeiten gleichzeitig auch eine Abnahme der Niederschlagstätigkeit erwartet wird, stellt sich die Frage, wie dies den Grundwasserspiegel im Einzugsgebiet beeinflusst. Aufgrund der Modellergebnissse ist zu erwarten, dass infolge reduzierter Niederschläge und erhöhter Verdunstung der Grundwasserspiegel im Sommer absinken könnte. Die quantitative Rolle dieses Prozesses ist jedoch schwierig abzuschätzen, da das Grundwasser im unteren Thurgebiet weitgehend durch die Thur selbst gespiesen wird, wobei Hochwasserereignisse eine besonders wichtige Rolle spielen. Eine Beurteilung der sich ergebenden Konsequenzen erfordert somit weitere Arbeiten auf dem Gebiet der Fluss- und Grundwasserhydrologie.

Literaturhinweise

Baumann, M., 2003: Die 2. Thurkorrektion im Thurgau – Hochwasserschutz und Lebensraumgestaltung. Wasser Energie Luft, 95 (1/2), 15–19.

BSF, 2001: Bodennutzung im Wandel. Arealstatistik Schweiz. Bundesamt für Statistik, Neuenburg 2001.

Birsan, M.-V., P. Molnar, P. Burlando and *M. Pfaundler,* 2003: Streamflow trends in Switzerland. J. Hydrol., submitted.

Christensen, J. H. and *O. B. Christensen,* 2002: Severe summertime flooding in Europe. Nature, 421, 805–806.

Frei, C. and *C. Schär,* 2001: Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. J. Climate, 14, 1568–1584.

Giorgi, F., B. Hewitson, J. Christensen, M. Hulme, H. von Storch, P. Whetton, R. Jones, L. Mearns and *C. Fu,* 2001: Regional Climate Information – Evaluation and Projections. Chapter 10 in: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [can be downloaded from http://www.ipcc.ch/].

IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press [can be downloaded from http://www.ipcc.ch/].

Gurtz, J., A. Baltensweiler, H. Lang, L. Menzel and *J. Schulla,* 1997: Auswirkungen von klimatischen Variationen auf den Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. Schlussbericht NFP31, vdf Hochschulverlag, Zürich, 160 S.

Kleinn, J., 2002: Climate Change and Runoff Statistics in the Rhine Basin: A Process Study with a Coupled Climate-Runoff Model. Dissertation ETH Nr. 14663.

Rosso, R., 2000: Flash-flood Risk Assessment under Impacts of Land-Use Changes and River Engineering Works. Final Report to the EU Environment and Climate Research Programme ENV4-CT97-0529, Politechnico di Milano, Milano.

Schädler, B., 1990: Abfluss. In: Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre. Proc. Fachtagung vom Mai 1990. VAW-Mitteilungen 108, 109–125.

Schmidli, J., C. Schmutz, C. Frei, H. Wanner, and *C. Schär,* 2002: Mesoscale precipitation variability in the Alpine region during the 20th century. Int. J. Climatol., 22, 1049–1074.

Schulla, J., 1997: Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Dissertation ETH Nr. 12018.

Vidale, P. L., D. Lüthi, C. Frei, S. Seneviratne, C. Schär, 2003: Predictability and uncertainty in a regional climate model. J. Geophys. Res. – Atmos., 108 (D18), 4586.

Danksagung

Wir möchten uns bei der MeteoSchweiz, dem Bundesamt für Wasser und Geologie und dem Bundesamt für Statistik für die unentgeltliche Lieferung von Daten bedanken. Aber nicht nur Institutionen halfen bei der Verwirklichung dieser Arbeit, sondern auch Personen im Umfeld der Fallstudie unterstützten uns mit hilfreichen Hinweisen. Hier gebührt unser spezieller Dank *Marco Baumann* (Kanton Thurgau) und *Ulrich Göttelmann* (Fallstudienorganisation), die mit ihren Anregungen entscheidend zur Qualität dieser Arbeit beigetragen haben.

Anschrift der Verfasser

Daniel Gasser, Lukas Hauser, Raffaele Quirici, Peter Preuschoff, Mario Schläpfer, Roland Wegmann, Studierende des Departements Umweltnaturwissenschaften der ETH Zürich.

Dr. *Jan Kleinn, Mark Verbunt,* Dr. *Joachim Gurtz,* Prof. *Christoph Schär,* Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich, Winterthurerstrasse 109, CH-8057 Zürich. schaer@iac.umnw.ethz.ch

Prof. *Bernhard Wehrli,* Forschungszentrum für Limnologie, Eawag, CH-6047 Kastanienbaum. bernhard.wehrli@eawag.ch