Computersimulation im Dienst des Hochwasserschutzes: Darstellung am Beispiel der Thur

Autor(en): **Fäh, Roland / Kühne, Anton**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 47

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75569

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Computersimulation im Dienst des Hochwasserschutzes

Darstellung am Beispiel der Thur

Von Roland Fäh und Anton Kühne, Zürich

Die in einem Vorprojekt vorgesehenen baulichen Hochwasserschutz-Massnahmen werden im Rahmen der Detailplanung quantitativ festgelegt. Dabei gilt es beispielsweise, die Höhe der Schutzdämme zu bestimmen, den Einfluss von Verlandung und Verbuschung von Vorländern zu untersuchen sowie den Standort und die Form eines Zulaufbauwerks zu einem Hochwasser-Rückhalteraum so zu bestimmen, dass dieser optimal genutzt werden kann, usw. Der Hochwasserabfluss in einem Fluss hängt auch von den Retentionsgebieten im Hinterland des Hauptgerinnes ab. Dieses kommuniziert mit dem Hauptfluss über speziell angelegte Entwässerungskanäle oder über ein bestehendes Netz von Nebenflüssen. Die natürlichen oder künstlich erschlossenen Rückhaltegebiete füllen und leeren sich im Verlauf des Hochwassers in Abhängigkeit von Grösse und Form der Hochwasserwelle. Diese Einflüsse sind beim Studium der Abflussvorgänge gebührend zu berücksichtigen.

Damit sind wesentliche Forderungen an ein mathematisches Modell, welches zur rechnerunterstützten Untersuchung des Abflussgeschehens in einem Flussgebiet angewendet werden soll, umrissen. Es muss grundsätzlich in der Lage sein, den instationären Abfluss in einem Netzwerk von offenen Gerinnen mit beliebigen Querprofilformen zu beschreiben bzw. zu berechnen. Am Beispiel der Thur im Kanton Thurgau wird ein solches Modell vorgestellt und gezeigt, wie es angewendet wird.

Einleitung

Nach dem Hochwasser im August 1978 (Bild 1) wurde das aus dem Jahre 1971 stammende Thur-Richtprojekt bezüglich seiner Bemessungsgrundlagen neu geprüft. Die auf dem Gebiet des Kantons Thurgau geplanten Korrektionsmassnahmen wurden im sogenannten «Richtprojekt 1979» zusammengefasst.

Von seiten der Projektverfasser und der verantwortlichen Behörden bestand das Bedürfnis, zusätzliche Informationen über die Wirksamkeit einzelner geplanter Massnahmen zu beschaffen. In diesem Zusammenhang beauftragte das Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich mit der numerischen Simulation von verschiedenen Hochwassersituationen.

Die entsprechenden Untersuchungen beschränkten sich auf den Thurgauer Thur-Abschnitt zwischen km 0.0 (Kantonsgrenze ZH/TG) und km 22.0 (Bild 2). Sie sollten unter anderem folgende Fragen beantworten:

- Wie verläuft die Hochwasserspur bei verschiedenen Hochwasserereignissen und bei unterschiedlichen Voraussetzungen in bezug auf Gerinnegeometrie und Reibungsverhältnisse?
- Wie hoch muss der seitliche Überfall zum Rückhalteraum Haslibecken (Bild 2) angeordnet werden? Wie stark reduziert dieses Retentionsgebiet die Hochwasserwelle? Wie wirkt sich eine allfällige Verlandung des Vorlandes in diesem Bereich aus?
- Wie beeinflusst die Überflutungszone Allmend Frauenfeld (Bild 2) die Hochwasserwelle, und wie muss ein Streichwehr, welches den Überlauf reguliert, ausgebildet werden?
- Wie verändert die Verlandung oder Verbuschung des Vorlandes oder eine Verbreiterung des Mittelgerinnes das Abflussverhalten in einzelnen Bereichen der Thur-Strecke?

Abflussmodell

Weshalb ein mathematisches Modell?

Zur Lösung flusshydraulischer Probleme kommen sowohl physikalische als auch mathematische Modelle in Betracht. Letztere werden vor allem dort verwendet, wo das zu untersuchende Gebiet gross ist, d. h. sich über mehrere Kilometer erstreckt. Falls die hydraulischen Vorgänge mit genügender Genauigkeit in eindimensionaler Form beschrieben werden können, ist das mathematische Modell kostengünstiger. Es ist einfacher zu konstruieren; Änderungen der Randbedingungen oder der Gerinnegeometrie lassen sich mit wenig Aufwand berücksichtigen. Andererseits liefert das physikalische Modell ein umfassenderes Bild der Wirklichkeit, wenn auch in massstäblich verkleinerter Form, da der physikalische Prozess kontinuierlich dargestellt wird, während bei der mathematischen Simulation die Resultate nur für diskrete Raum- und Zeitpunkte bestimmt werden.

Forderungen an das Modell

Bei der Thur-Korrektion im letzten Jahrhundert wurde der ehemals stark mäandrierende Fluss in ein mehr oder weniger prismatisches Gerinne mit Doppeltrapezprofil verlegt. Dadurch wird die mathematische Beschreibung des Fliessgeschehens vereinfacht, denn Fliessrichtung und Fliesslänge verän-

Bild 1. Überflutung des Hinterlandes der Thur beim Weiler Feldi zwischen Ellikon und Altikon während des Hochwassers vom August 1978 (Foto: Comet, Zürich)



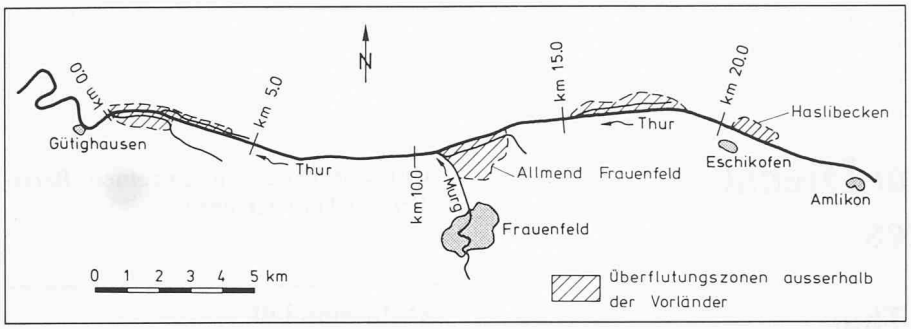
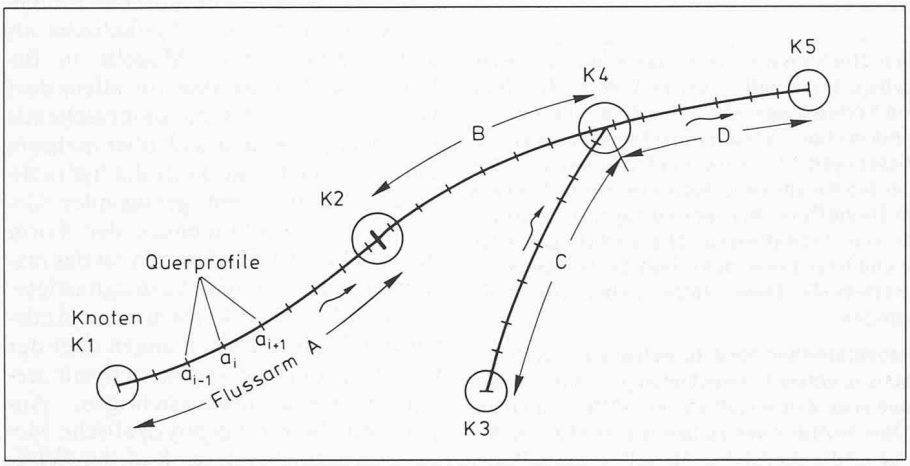


Bild 2. Thur zwischen Amlikon und Gütighausen; Situationsskizze des untersuchten Flussabschnitts

Bild 3. Grundelemente Querprofil, Flussarm und Knoten, mit denen sich ein Flussgebiet mathematisch beschreiben lässt



dern sich - im Gegensatz zum mäandrierenden Gerinne - nicht, wenn der Fluss bei Hochwasser das Mittelgerinne verlässt. Es genügt also, das Abflussverhalten in der dominanten Richtung, d. h. *eindimensional,* zu betrachten.

Zweidimensionale Effekte können dort massgebend werden, wo das Wasser das vorgesehene Profil verlässt, sich ins Hinterland ergiesst und über die Nebenflüsse an anderer Stelle dem Hauptfluss wieder zugeführt wird. Dieser Situation kann annähernd Rechnung getragen werden, indem an den Austrittstellen des Wassers die Nebenflüsse und der Hauptfluss *netzwerkartig* miteinander verbunden werden.

Die Rückhaltewirkung des Hinterlandes hat zur Folge, dass das Wasser, welches den Hauptfluss verlässt, diesem erst nach einer gewissen Verzögerung wieder zufliesst. Dieses *zeitabhängige* Verhalten muss berücksichtigt werden.

Computerprogramm FLORIS

Für ein mathematisches Modell, das den vorgenannten Anforderungen genügt, wurde an der VAW in Zusammenarbeit mit der Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden, das Computerprogramm FLORIS (*FLO*odrouting in *RI*ver *S*ystems) entwickelt. Es berechnet den instationären eindimensionalen Abfluss in Flussnetzwerken auf der Basis der vollständigen Differentialgleichungen von de Saint-Venant [1]. Die Differentialgleichungen werden mit einem impliziten Differenzenverfahren integriert. Die resultierenden Differenzengleichungen sind nichtlinear; sie werden iterativ nach der Newton-Raphson-Methode gelöst.

Grundelemente von FLORIS

Die mathematische Beschreibung eines Flussgebiets mit dem Computerprogramm FLORIS basiert auf drei Grundelementen, nämlich Querprofilen, Flussarmen und Knoten (Bild 3).

Querprofile

Die Geometrie des Gerinnes wird mit Hilfe von Querprofilen erfasst, die beliebig geformt sein können.

Flussarme

Als Flussarm wird eine Flussstrecke bezeichnet, auf deren ganzer Länge das Fliessgeschehen mit den Gleichungen von de Saint-Venant beschrieben wird. Das in diesen Gleichungen auftretende Reibungsgefälle wird mit dem Reibungsgesetz von Strickler berücksichtigt. Jeder Flussarm wird durch eine bestimmte Anzahl von Querprofilen in Zwischenintervalle unterteilt.

Knoten

Knoten sind Flussstellen, wo die de Saint-Venant'schen Gleichungen durch spezielle, für die lokalen Vorgänge zutreffende Beziehungen zu ersetzen sind. Dies können zum Beispiel Abflussganglinien oder Pegelrelationen sein, wenn sich der Knoten am Ende der Berechnungsstrecke befindet (vgl. Knoten *K1, K3* und *K5* in Bild 3). Bei «inneren» Knoten (vgl. Knoten *K2* und *K4* in Bild 3) sind Gleichungen, die den Zusammenfluss von mehreren Flussästen oder das Abflussgeschehen im Bereich eines Flussbauwerks beschreiben, zu formulieren.

Abfluss-Simulation für die Thur

Modellierung der Thur

Wie beeinflussen einzelne Korrektionsmassnahmen das Abflussverhalten der Thur? Diese Frage galt es mit Hilfe von numerischen Simulationen zu beantworten. Dabei stellte sich zunächst das Problem, das Abflussmodell am interessierenden Flussabschnitt zu eichen. Eine Eichung wird in der Regel so durchgeführt, dass gemessene Hochwasserspuren von früheren Ereignissen mit den Resultaten von entsprechenden Berechnungen verglichen werden. Dabei werden die Eichparameter - im vorliegenden Fall die k-Werte nach Strickler - so angepasst, dass sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergibt. Dementsprechend mussten für die vorliegende Untersuchung zwei Modelle entwickelt werden. Das eine, das dem heutigen Zustand der Thur entspricht, diente zur Überprüfung der ermittelten k-Werte. Mit dem zweiten, dem das Richtprojekt zugrunde liegt, wurden die gewünschten Prognoserechnungen durchgeführt.

Für die numerischen Simulationen wurde der rund 26 km lange Thur-Abschnitt zwischen TG km 23.930 und ZH km 14.800 (2,3 km unterhalb TG km 0.000) modelliert. In Bild 4 ist - für das Richtprojektmodell - die Aufteilung der Berechnungsstrecke in die einzelnen Flussäste dargestellt. Die Gliederung ergab sich aus der natürlichen Situation. Die Lage der Knoten war durch Flussverzweigungen, Wehre, Schwellen und Randbedingungen vorgezeichnet. Im betrachteten Flussgebiet gibt es fünf seitliche Zuflüsse. Sie wurden insofern modelliert, als sie relevante Hochwasser-Rückhaltegebiete repräsentieren. Auch das Haslibecken wurde durch einen separaten Flussast dargestellt.

Mit einer zusätzlichen Querverbindung zwischen Thur und Binnenkanal in der Allmend Frauenfeld wurde ein geplantes Streichwehr simuliert, das bei extremen Hochwassern ein optimales Auffüllen des Überflutungsgebiets sicherstellt. Für die Nachbildung des etwa 26 km langen Abschnitts der Thur wurden 28 Flussäste mit insgesamt 181 Querprofilen verwendet.

Erfassung der Querprofile

Die Aufnahme der Querprofile und die computergerechte Aufarbeitung der entsprechenden Daten bilden einen sehr arbeitsintensiven Teil bei der Anwendung eines mathematischen Modells. Im Fall der Thur nahm man im Jahre 1982 etwa 150 Querprofile neu auf (Bild 5). Pro Querprofil wurden bis zu 50 Geländepunkte vermessen. Die grosse Anzahl von Punkten war nötig, weil mit den Profilen nicht nur das eigentliche Gerinne der Thur, sondern auch das Hinterland mit den Binnenkanälen erfasst werden sollte. Gleichzeitig mit der koordinatenmässigen Erfassung der Geländepunkte beschrieb man mit Hilfe eines Codes auch die Oberflächenbeschaffenheit. Aufgrund des Codes - er enthält eine Charakterisierung des vorliegenden Materials, der Oberflächenbeschaffenheit und der Vegetation - wird im Computerprogramm der Reibungswert nach Cowan [2] berechnet.

Die Querprofile für das Richtprojektmodell wurden konstruiert, indem die aufgenommenen (heutigen) Profile entsprechend den Angaben der zuständigen Stellen modifiziert wurden (Bild 6).

Die wesentlichen Änderungen betreffen - je nach Streckenabschnitt - die Sohle und das Vorland, die zum Teil gesenkt werden, sowie die Dämme, die erhöht werden. Mit diesen Massnahmen wird die Abflusskapazität des Gerinnes erhöht. Bild 7 zeigt die entsprechenden Auswirkungen für das Querprofil bei km 6.000.

Bemessungshochwasser

In den letzten 20 Jahren betrug der durchschnittliche jährliche Abfluss der Thur bei der Messstation Halden rund 40 m³/s. Während des Hochwassers vom August 1978 stieg der Abfluss innerhalb von 11 Stunden von 80 auf rund 1200 m³/s. Für die Murg wurde bei Frauenfeld ein Spitzenabfluss von 150 m³/s gemessen. Jenes Ereignis, es entspricht etwa einem 70jährlichen Hochwasser, diente als Grundlage für die Wahl des Bemessungshochwassers nach Bild 8.

Die Zuflüsse zu den Binnenkanälen wurden aufgrund einer Schätzung des Amtes für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau angenommen. Die Abflusswerte schwanken, je nach Kanal, zwischen 5 und 30 m³/s.

Auf der Basis dieser Randbedingungen wurde der Ablauf der Hochwasserwellen im korrigierten Gerinne simuliert. Dabei ermittelte man längs der Berechnungsstrecke die höchsten Wasserstände (Hochwasserspur). Ferner wurden verschiedene Phänomene, die sich primär lokal auswirken, rechnerisch untersucht. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse führte man die meisten Rechnungen zusätzlich mit einer gegenüber dem Bemessungshochwasser um 10% erhöhten Wassermenge durch.

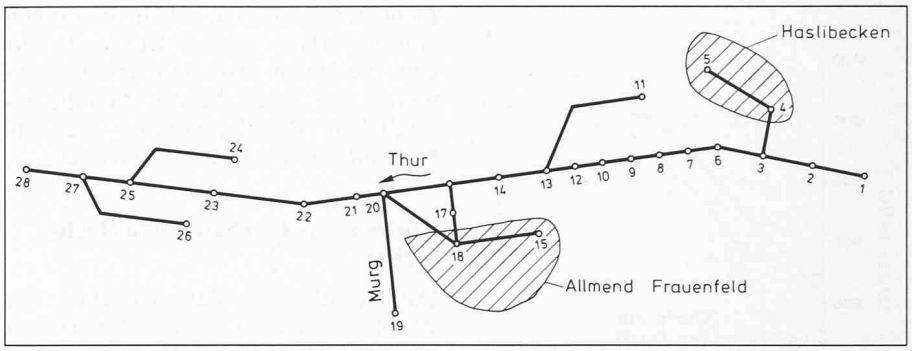


Bild 4. Aufteilung der Berechnungsstrecke in Flussäste und Knoten für das Richtprojekt 1979; Knoten 1: oberes Ende der Berechnungsstrecke bei TG km 23.930, Knoten 19: Murg bei der hydrometrischen Station Frauenfeld, Knoten 20: Zusammenfluss von Murg und Thur, Knoten 28: unteres Ende der Berechnungsstrecke bei ZH km 14.800 (2,3 km unterhalb TG km 0.000)

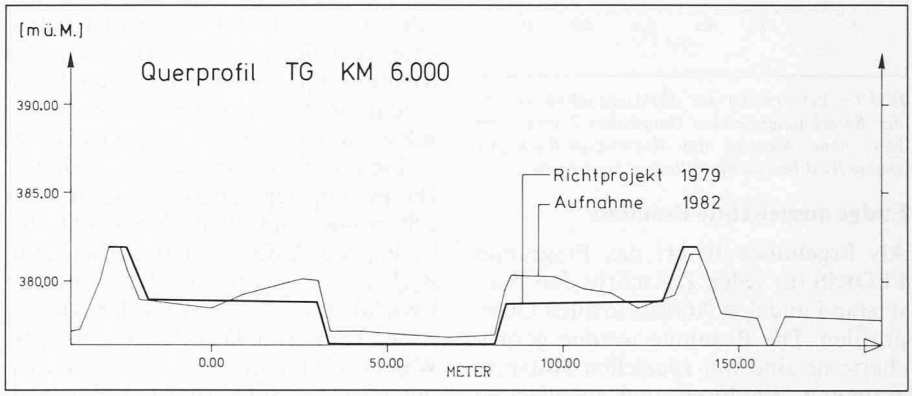


Bild 6. Modifikationen im heutigen Thurquerschnitt aufgrund des Richtprojekts; Beispiel: Querprofil bei TG km 6.000

Bild 5. Aufnahme eines Querprofils im Bereich des Mittelgerinnes

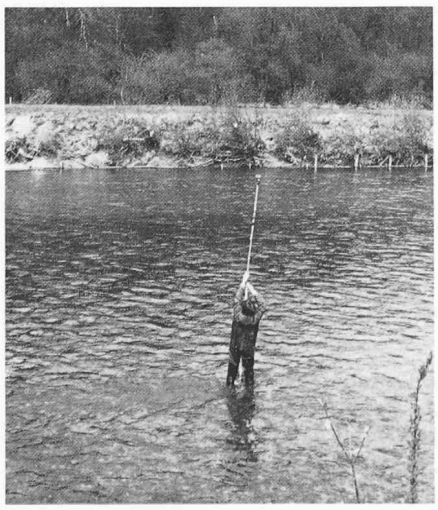


Bild 7. Erhöhung der Abflusskapazität der Thur als Folge der geplanten Korrektionsmassnahmen; Beispiel: Querprofil bei TG km 6.000

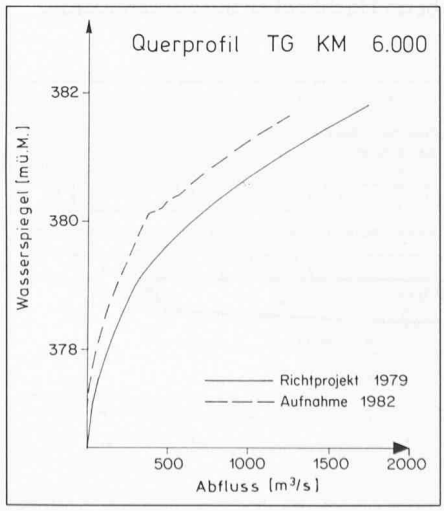
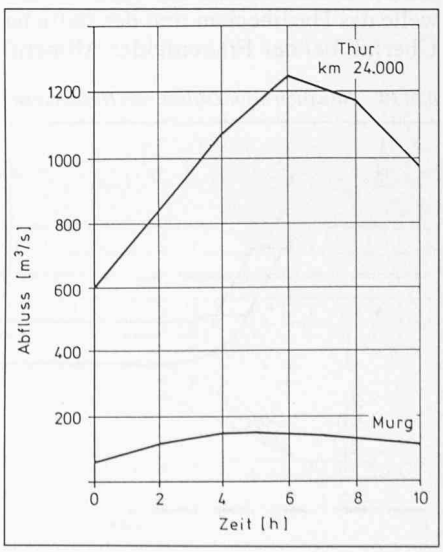


Bild 8. Der Berechnung zugrunde gelegte Abflussganglinien



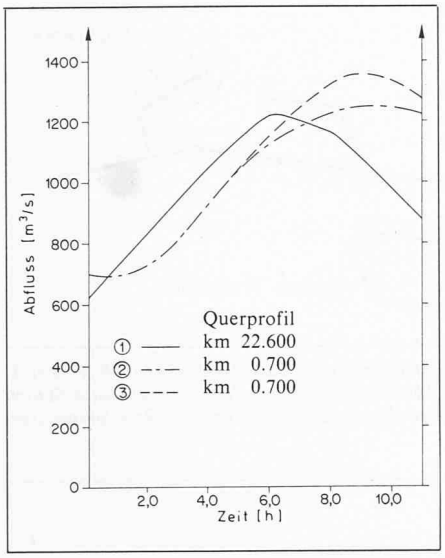


Bild 9. Verformung der Abflussganglinie entlang der Berechnungsstrecke; Ganglinien 2 und 3 mit bzw. ohne Nutzung der Hochwasser-Rückhalteräume Haslibecken und Allmend Frauenfeld

Einige ausgewählte Resultate

Als Ergebnisse liefert das Programm FLORIS für jeden Zeitschritt den Wasserstand und den Abfluss in allen Querprofilen. Die Resultate werden gespeichert; sie sind mit speziellen Hilfsprogrammen graphisch und tabellarisch als Längenprofil oder in Form von Ganglinien darstellbar. Im folgenden werden anhand von zwei Beispielen einige Ergebnisse der Berechnungen präsentiert.

Verformung der Hochwasserwelle

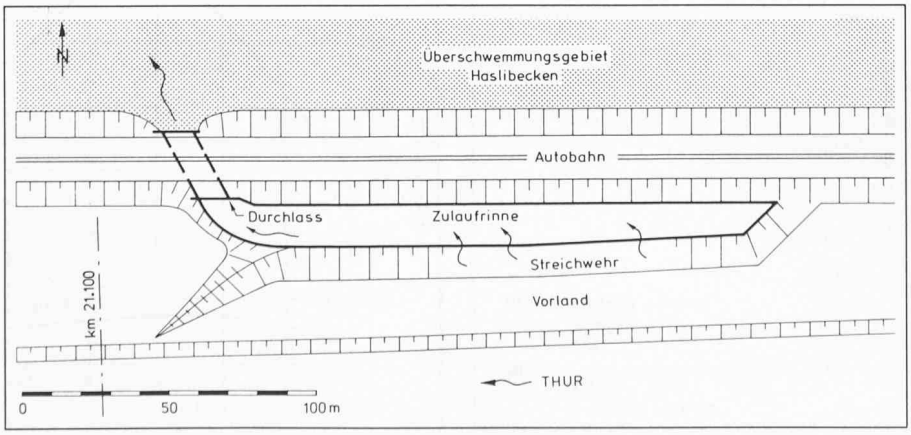
Die Überschwemmungsgebiete und die Gerinnereibung bewirken, dass eine Hochwasserwelle im Laufe der Zeit gedämpft wird. Bild 9 zeigt dies für einen etwa 22 km langen Abschnitt der Thur zwischen Amlikon und Gütighausen. Die Abflussspitze nimmt längs der Berechnungsstrecke trotz der verschiedenen seitlichen Zuflüsse von insgesamt 212 m³/s nur unwesentlich zu (vgl. Ganglinien *1* und *2*). Wird bei der Simulation des Ablaufs der Hochwasserwelle das Haslibecken und der seitliche Überfall bei der Frauenfelder Allmend nicht berücksichtigt, erhält man einen Abflussverlauf gemäss Kurve *3*. Aus dem Vergleich zwischen den Ganglinien *2* und *3* geht hervor, dass die zusätzlichen Rückhalteräume die Abflussspitze um etwa 10% reduzieren.

Hochwasser-Rückhalteraum Haslibecken

Das Haslibecken liegt zwischen km 20.500 und km 21.750 auf der rechten Seite der Thur. Es wird von Dämmen umschlossen und hat ein Retentionsvolumen von etwa 0,7 Mio m³. Bild 10 zeigt die Gegebenheiten beim Zulauf zum Becken. Mit dem Bau einer Zufahrt zur Autobahn N7 ist inzwischen eine spezielle Situation entstanden. Das Richtprojekt sieht vor, dass dem Strassendamm, der das Überschwemmungsgebiet von der Thur abschneidet, im rechten Vorland ein zweiter, kleinerer Damm vorgelagert wird. Dieser ist etwa 200 m lang und dient als Streichwehr. Er hat die Aufgabe, den Zufluss zum Becken zu regulieren. Der seitliche Überfall springt an, wenn der Abfluss in der Thur etwa 950 m³/s erreicht. Das Wasser füllt dann ein schmales Zwischenbecken und fliesst schliesslich durch eine Unterführung unter der Autobahn in das eigentliche Rückhaltebecken.

In dieser Untersuchung ging es nun hauptsächlich darum, die Höhe der Wehrkrone festzulegen. Sie ist massgebend für den Zufluss zum Haslibecken. Liegt die Wehrkrone zu tief, ist das Bekken schon gefüllt, bevor das Maximum des Hochwassers erreicht ist. Die eigentliche Hochwasserspitze kann dann nicht mehr wirksam reduziert werden. Ist das Streichwehr zu hoch, wird das Becken zu wenig genutzt, da es sich nicht oder nur teilweise füllt. Bei ähnlichen Anlagen wurde beobachtet, dass in der Umgebung des Streichwehrs das Vorland auflanden kann. Deshalb interessierte auch hier die Frage, wie sich das entsprechende Phänomen beim Haslibecken auswirken würde.

Bild 10. Situation beim Zufluss zum Haslibecken



Die optimale Höhe der Wehrkrone wurde aufgrund von mehreren Probeberechnungen ermittelt. Aus Kostengründen beschränkte man die entsprechenden Berechnungen auf einen kleinen Ausschnitt am oberen Ende des Richtprojektmodells. Dieser wurde so gewählt, dass Ungenauigkeiten bei den Randbedingungen sich nicht auf die Berechnung des Abflussgeschehens beim Streichwehr auswirken.

Der seitliche Überfall (vgl. Knoten *4* in Bild 4) wurde nach den Formeln von Jacoby berechnet [3]. Damit konnte dem unterschiedlichen Abflussverhalten des Wehres bei freiem und eingestautem Überfall Rechnung getragen werden. Das seitliche Anströmen des Streichwehres wurde berücksichtigt, indem die rechnerische Länge der Überfallkrone um 5% verringert wurde.

In Bild 11 ist für ein Querprofil im Haslibecken die Ganglinie des Wasserstandes und für ein Thur-Querprofil unmittelbar unterhalb des Streichwehres jene des Abflusses aufgetragen, beide für verschiedene Berechnungsfälle.

Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass für das Bemessungshochwasser mit einer Kronenhöhe von 410.00 m ü. M. eine optimale Wirkung erzielt wird. Die Abflussspitze in der Thur wird im Vergleich zum Fall «ohne Haslibecken» um etwa 70 m³/s reduziert. Der Wasserspiegel im Haslibecken steigt nicht ganz bis auf die höchstzulässige Grenze von 410.50 m ü. M. In einer weiteren Rechnung hat sich gezeigt, dass diese Reserve auch dann nicht aufgebraucht wird, wenn – infolge einer Verlandung des rechten Vorlandes der Thur um 50 cm – der Wasserspiegel im Haslibecken um zusätzliche 6 cm angehoben wird.

Die numerische Simulation ergibt, dass mit dem Retentionsvolumen des Haslibeckens allein zwar keine spektakuläre Reduktion der Abflussspitze erreicht werden kann. Man darf aber bei der Beurteilung von solchen Hochwasserschutz-Massnahmen das einzelne Werk nicht isoliert betrachten. Eine Gesamtübersicht zeigt nämlich, dass bei konsequenter Nutzung aller vorhandenen Retentionsgebiete ein namhafter Beitrag zur Dämpfung einer Hochwasserwelle gemäss Bild 8 geleistet werden kann.

Schlussbemerkungen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die eingangs gestellten Fragen mit Hilfe der mathematischen Simulation effizient beantwortet werden konnten. Die Erfahrungen mit dem Computer-

Literatur

[1] *Kühne, A.:* «Berechnung des Ablaufes von Hochwasserwellen in Gerinnen (Flood Routing)». Schweiz. Ing. u. Arch. (1980) H. 40, S. 985–989

[2] *Cowan, W. L.:* «Estimating Hydraulic Roughness Coefficients». Agricult. Engng. 37 (1956) H. 7, S. 473–475

[3] *Jacoby, E.:* «Die Berechnung der Stauhöhe bei Wehren». Wasserkraft u. Wasserwirtsch. 28 (1933) H. 7, S. 79–82

programm FLORIS haben gezeigt, dass es instationäre Abflussvorgänge in Fluss-Systemen sehr gut wiederzugeben vermag, sofern die notwendigen Grundlagen für die Anwendung des Programms vorhanden sind.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation sind sorgfältig zu interpretieren. Vor allem in jenen Fällen, in denen eine absolute Grösse (z. B. ein Wasserstand) gefragt ist, gilt es zu beachten, dass die Resultate immer unter gewissen Annahmen bezüglich Randbedingungen und Parameterwahl zustande kommen. Die sensitivsten Parameter sind dabei die Reibungsbeiwerte, die geometrischen Grössen und natürlich das zugrunde gelegte Bemessungshochwasser. Eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich dieser Einflussgrössen drängt sich darum auf. Die eigentliche Stärke des mathematischen Modells zeigt sich denn auch dort, wo es gilt, durch systematische Rechnungen den Einfluss der verschiedenen Parameter zu untersuchen (z. B. bei den Simulationen im Zusammenhang mit dem Einlauf zum Haslibecken). Daraus ergibt sich, dass numerische Simulationen in einer frühen Planungsphase (Variantenstudium) vorzunehmen sind. So angewandt, ist das mathematische Modell ein wertvolles Hilfsmittel für eine umweltgerechte und kostengünstige Planung.

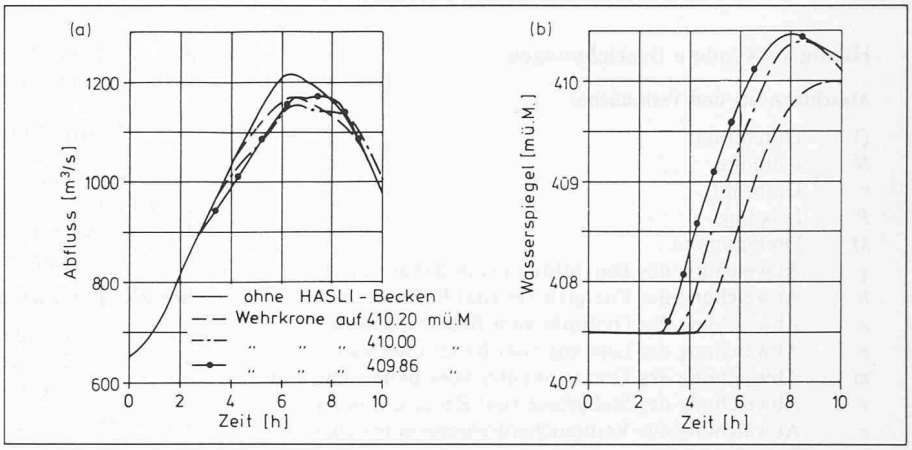


Bild 11. Rückhaltewirkung des Haslibeckens bei unterschiedlicher Höhe des Streichwehres; a) = Abflussganglinie beim Thur-Querprofil km 21.100, b) = Wasserstandsganglinie im Haslibecken

Die Autoren danken dem Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau dafür, dass sie die in Kapitel 3 beschriebenen Rechenergebnisse veröffentlichen durften.

Adresse der Verfasser: Dipl.-Ing. ETH *R. Fäh* und Dr. *A. Kühne*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Regelung von Wasserturbinenanlagen mit langem Zuleitungskanal

Von Siegbert Etter und Günter Lein, Stuttgart

Es ist seit langem bekannt, dass die Drehzahlregelung von Wasserturbinenanlagen, die einen längeren Zuleitungskanal haben, instabil sein kann und dass in solchen Fällen mit den Einstellbereichen der Reglerparameter eines üblichen PI-Reglers keine Stabilität zu erreichen ist. Im folgenden wird für solche Anlagen die Stabilitätsuntersuchung auf der Basis der Frequenzgangmethode vorgestellt. Sie gestattet es, mit ausreichender Genauigkeit vorauszusagen, ob eine solche Anlage stabil betrieben werden kann. Auch bei Leistungsregelung sind mit einer solchen Anlage Stabilitätsschwierigkeiten zu erwarten. Diese Betriebsart kann ebenso rechnerisch behandelt werden.

Regelkreis einer Wasserturbinenanlage im Inselbetrieb (Drehzahlregelung) und im Netzbetrieb (Leistungsregelung)

Unter *Inselbetrieb* wird der Betrieb einer einzelnen Turbinenanlage mit einem isolierten Netz ohne weitere Energieeinspeisung verstanden. Der Leerlauf kann als Sonderfall des Inselbetriebes aufgefasst werden. Der Signalflussplan, Bild 1, stellt den Regelkreis normiert (Index *r*) in vereinfachter Form dar.

Die Blöcke 1 bis 6 ersetzen die Turbine. Die Konstanten K_{my}, K_{mh}, K_{Tmx}, K_{qy}, K_{qh}, K_{qx} ergeben sich für jeden Betriebspunkt aus dem Kennfeld. Die Blöcke 7 und 8 erfassen das Netz, Block 9 den Regler – hier ein PIP-Regler mit einstufigem Verstärker – und Block 10 das Wasserführungssystem, um dessen

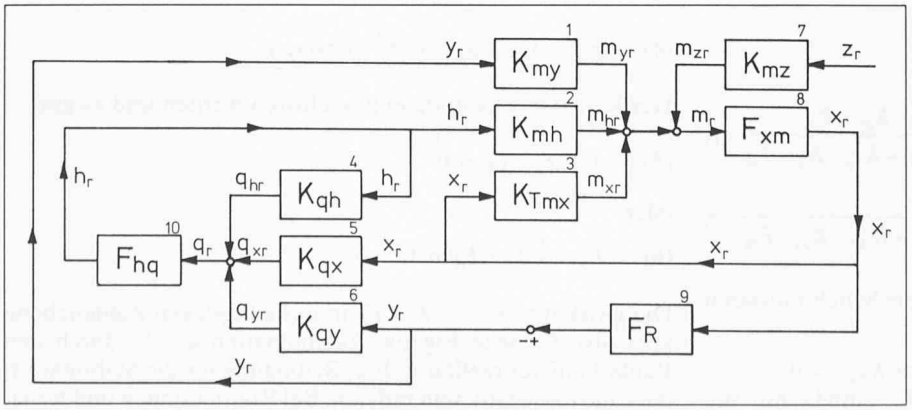


Bild 1. Blockschaltbild für den Inselbetrieb einer Turbinenanlage

Bild 2. Aufgeschnittener Regelkreis

